

## Neutrini Solari

Formazione stellare: cluster di gas primordiale (71%  $H_2$ , 27.1%  $He^4$ , 1.96%  $z > 2$ , in massa) collassa per gravita'  $\Rightarrow$  aumento della densita' del nucleo, temperatura  $\Rightarrow$  ignizione di reazioni di fusione nucleare.

Radiazione + pressione cinetica bilanciano la gravita'  $\rightarrow$  equilibrio idrostatico.

La principale reazione di fusione responsabile del rilascio di energia del sole:



con rilascio di energia  $Q = (4m_p - m_{He^4} - 2m_e)c^2 = 24.68 MeV$

Energia prodotta sotto forma di calore:  $W = Q + 4m_e c^2 - \langle E(2\nu_e) \rangle = 26.1 MeV$

La luminosita' del Sole e'  $L_\odot = 3.846 \cdot 10^{26}$  watt

$\Rightarrow$  Il numero di neutrini emessi dal Sole al secondo:  $N(\nu_e) = 2 \frac{L_\odot}{1.6 \cdot 10^{-13} \times 26.1} \simeq 1.8 \cdot 10^{38} \nu_e / s$

La distanza media Sole-Terra e'  $1.496 \cdot 10^{11}$  m  $\Rightarrow$  Flusso di  $\nu_e$  solari sulla terra:  $\simeq 6.4 \cdot 10^{10} \nu_e / cm^2 \cdot s$

Frequenza di interazioni rivelabili:  $\sum (\text{Flusso}) \times (\text{Sezione d'urto}) \sim 10^{10} cm^{-2} s^{-1} \times 10^{-46} cm^2$

Unita' di misura del flusso di interazioni di neutrini  $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$  Interazioni per atomo per secondo

## Standard Solar Model (SSM)

### ASSUNZIONI:

- Equilibrio idrostatico
- Energia prodotta da processi di fusione
- Equilibrio termico (energia prodotta = luminosita')
- Trasporto di energia nel sole dominato dalla radiazione

### IL METODO:

- Parametri iniziali ( $t=0$ , la composizione iniziale uguale alla composizione attuale alla superficie)
- Evoluzione a  $t = 4.4 \cdot 10^9$  anni (oggi)
- Confronta i parametri predetti e misurati
- Se necessario modifica i parametri iniziali e reitera

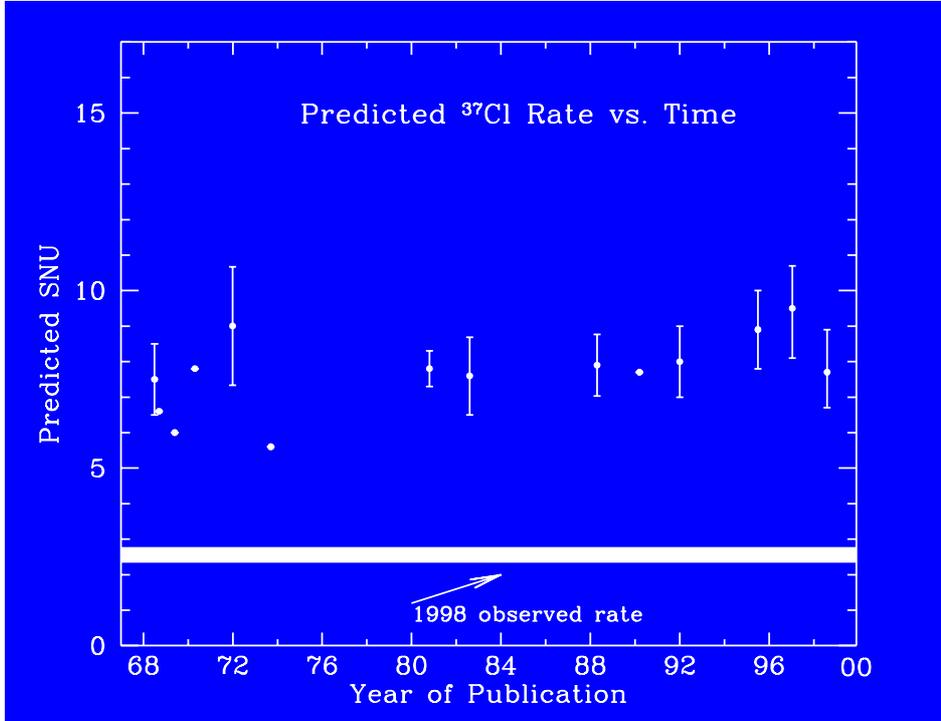
### PARAMETRI D'INGRESSO:

- Abbondanze iniziali di elio e metalli,  $Y_{in}, Z_{in}$
- Opacità in funzione vs. raggio
- Sezioni d'urto delle reazioni di fusione

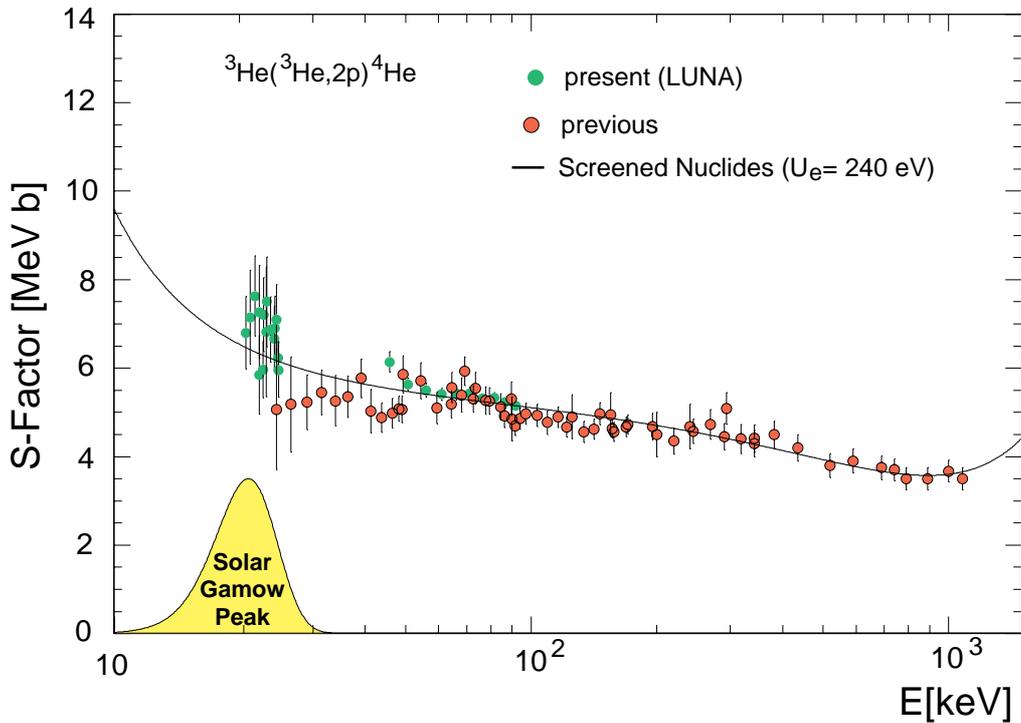
### PROPRIETÀ ATTUALI:

- $R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^5$  km
- $L_{\odot} = 3.846 \cdot 10^{26}$  W
- $M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30}$  kg
- $T_C = 15.6 \cdot 10^6$  °K
- $T_S = 5773$  °K
- Massa di idrogeno: 34.1% (71% a  $t=0$ )
- Massa di elio: 63.9% (27.1% a  $t=0$ )

Lo “standard solar model” é in evoluzione da piú di 30 anni, e diversi gruppi lo stanno sviluppando indipendentemente. Il pioniere di questa attività é John Bahcall, e suo l’attuale modello di riferimento: BP00.



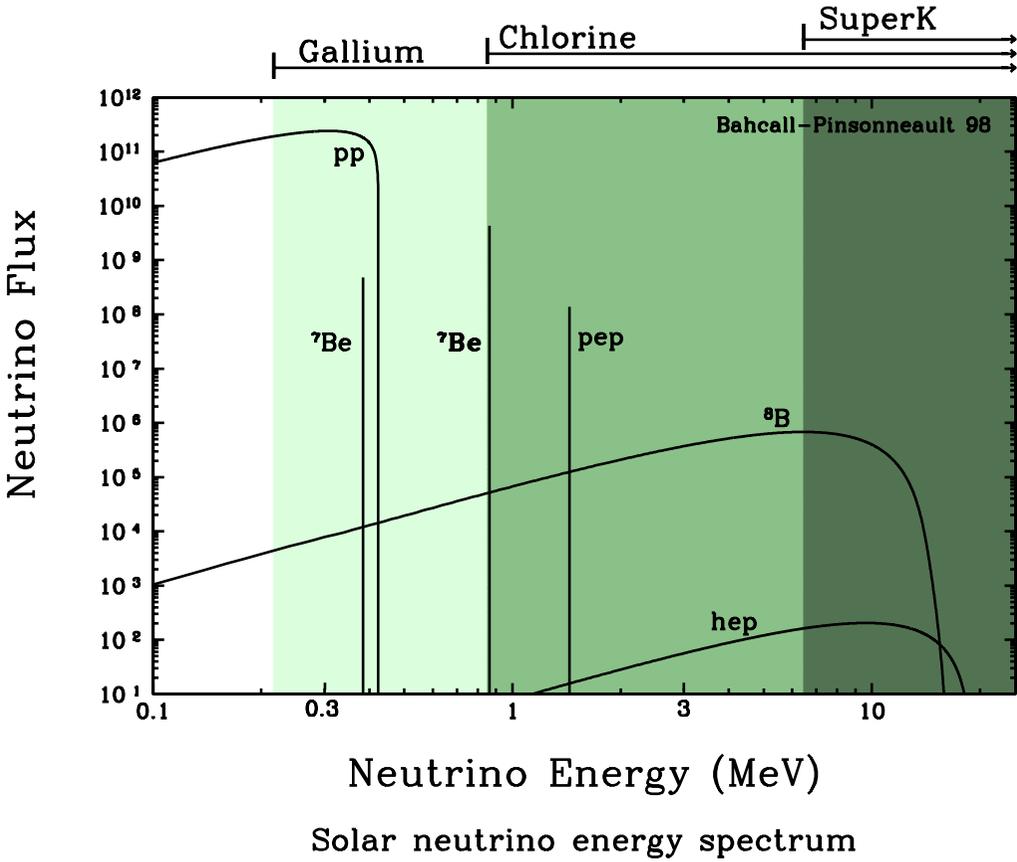
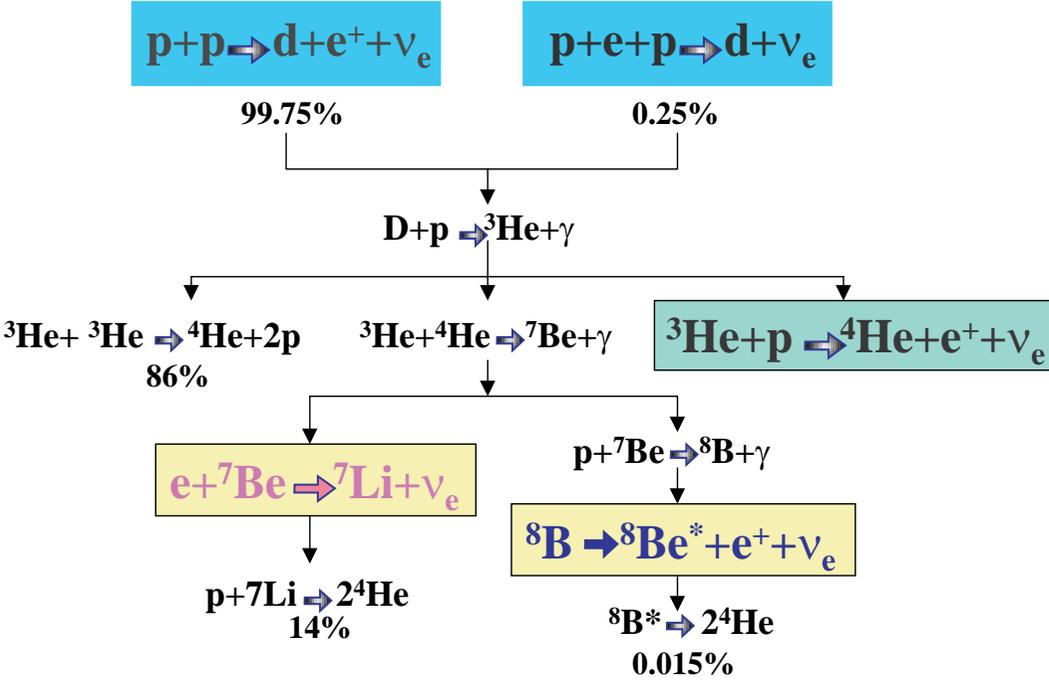
Nel frattempo le sezioni d’urto coinvolte sono state oggetto di continue revisioni:



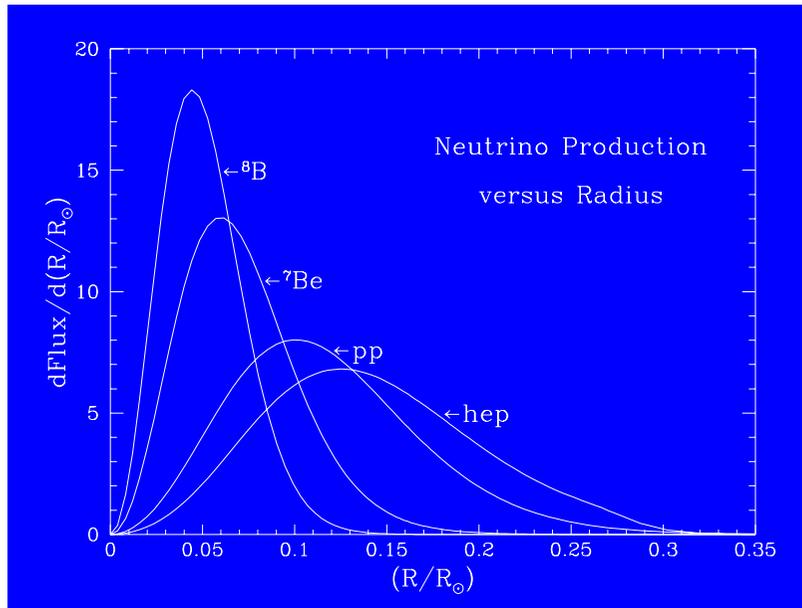
# Predizioni dello SSM (Standard Solar Model) sul flusso di neutrini

## Neutrini solari

### La catena pp



I neutrini dei vari cicli vengono prodotti in zone diverse del sole:



e hanno dipendenze molto diverse dalla temperatura  $T_C$  del nucleo del sole (questo perché ci sono potenziali coulombiani da superare):

- $\nu_{PP} \propto T_C^{0.8}$
- $\nu_{Be} \propto T_C^8$
- $\nu_B \propto T_C^{18}$

Gli unici neutrini veramente sotto controllo sono quelli della reazione principale  $pp$ , direttamente correlati a  $L_\odot$

**NOTA BENE:**

- $\nu_e$  raggiungono la terra circa 500 s dopo la loro produzione
- La luminosità arriva  $\sim 10^6$  anni dopo



Lo SSM assume la stabilità del sole su un periodo di  $10^6$  anni  
 $\Rightarrow$ Questo non è un problema: il sole è una stella “della sequenza principale” ed è stabile su periodi di  $10^9$  anni (così garantiscono gli astronomi).

# Eliosismologia

Osservazione di oscillazioni sismiche nel Sole

Misura delle frequenze di oscillazione.

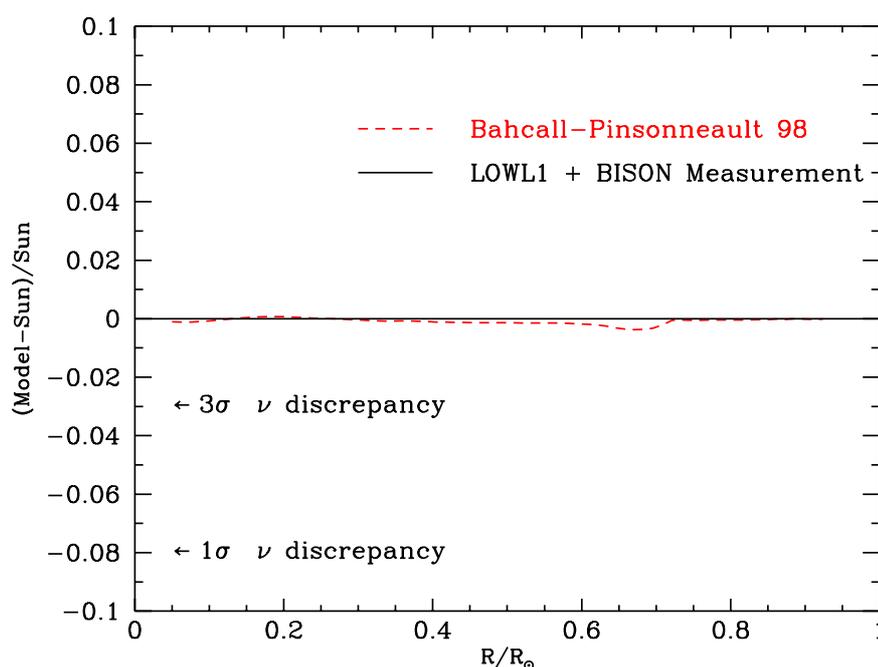
Si misura la velocità di propagazione del suono all'interno del sole:

$$v_s = v(R) \propto \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R: \text{distanza dal centro del sole} \\ T: \text{temperatura locale} \\ \mu: \text{peso molecolare medio locale} \end{array} \right.$$

Aggiunge ulteriori proprietà da verificare e corrobora la credibilità delle previsioni dello SSM:

- Raggio della zona convettiva:  $R_b$
- Velocità del suono al confine fra la zona convettiva e la zona radiativa,  $c_b$
- Abbondanza di elio nella fotosfera,  $Y_{ph}$

$$\left| \frac{v_{SM} - v^{mis}}{v^{mis}} \right| < 7 \times 10^{-4}, \quad \frac{\Delta T}{T} \sim 2 \frac{\Delta v}{v} \Rightarrow \Delta T \sim 0.14\%$$



## Esperimenti sui neutrini solari

Gli esperimenti finora condotti confrontano il flusso di neutrini predetto dallo SSM con il flusso di neutrini misurato sperimentalmente.

Si possono suddividere in due categorie principali:

**Esperimenti Radiochimici:** confrontano gli spettri integrali, integrano gli eventi raccolti per qualche mese. Possono portare le soglie di rivelazione a valori molto bassi, fino a poter rivelare i neutrini prodotti nel ciclo principale pp.

**Esperimenti in tempo reale:** producono uno spettro differenziale e per l'appunto sono in tempo reale. Misurano le singole proprietà delle interazioni di neutrino (energia, direzione). Sono finora caratterizzati da soglie relativamente alte ( $> 5.0 \text{ MeV}$ ) e quindi sono sensibili solo ai neutrini prodotti dal ciclo del Boro e *hep*.

Tutti gli esperimenti richiedono un bassissimo livello di rumore a bassa energia  $\Rightarrow$  devono essere condotti “deep underground”.

**In esperimenti di flusso assoluto é  
indispensabile controllare TUTTE le  
efficienze, i fondi e i tempi morti**

## Esperimento Homestake (R. Davis & coll.)

Nella miniera d'oro Homestake, Sud Dakota, USA.

L'esperimento é in corso dal 1967. ( Pubblicazioni con referee fino ad oggi  $\Rightarrow$  **2!**)

Misura il processo  $\nu_e + Cl^{37} \rightarrow e^- + Ar^{37}$  con soglia  $E_\nu = 814 KeV \rightarrow$  sensibile ai neutrini del ciclo del berillio, boro ed hep.

Rivela gli atomi di  $Ar^{37}$  prodotti in una tanica di  $390 m^3$  riempita con  $C_2Cl_4$ : 520 ton di  $Cl$ , 24% di  $Cl^{37}$ . SSM predice  $\sim 1.5$  atomi di  $Ar^{37}$  prodotti al giorno.

- Ogni qualche mese si estrae l'Argon dalla tanica flussando Azoto  $\rightarrow$  dopo aver separato l'Azoto si riempiono delle camere proporzionali
- Vengono rivelati i raggi x o gli elettroni Auger prodotti dalla reazione di cattura-k  $e^- + Ar^{37} \rightarrow \nu + Cl^{*37}$  ( $\tau_{1/2} = 34$  giorni). La distribuzione temporale dei decadimenti é la firma della produzione di  $Ar^{37}$ .

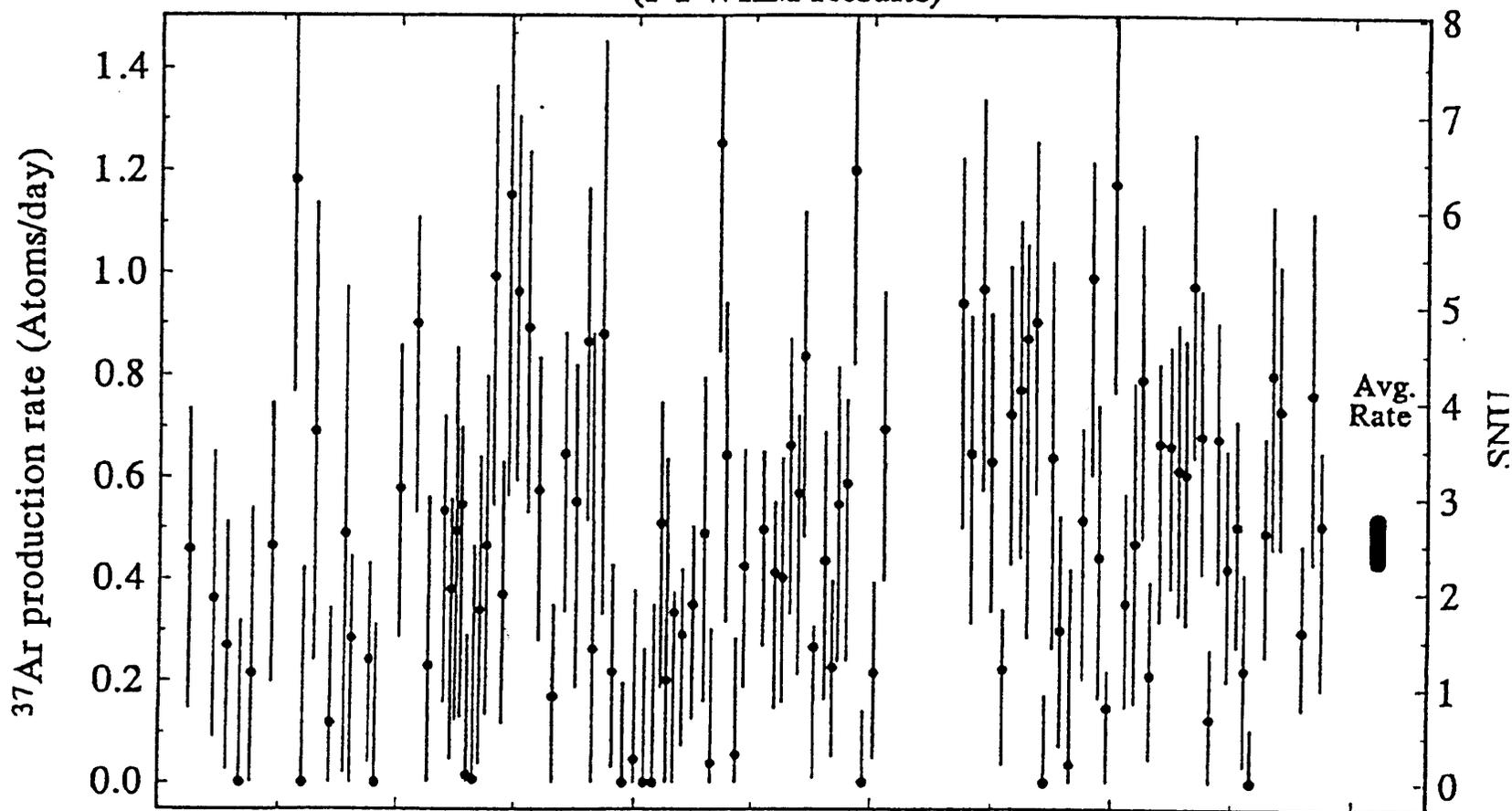
### Errori sistematici:

- **Efficienza di estrazione: 1.3%**. Misurato iniettando una quantità nota di isotopi radioattivi nell'Azoto.
- **Efficienza dei contatori: 2.8%**. Stimata dalla determinazione del volume effettivo dei contatori e dalla correzione dei conteggi di background.
- **Background ambientale: 5%**. Da fondo di neutroni nella caverna e dal flusso di muoni atmosferici. Il fondo di neutroni é stato misurato 20 anni fa.

**Manca una misura globale dell'efficienza della misura.**

## Risultati di Homestake

### Homestake Chlorine Experiment (1 FWHM Results)

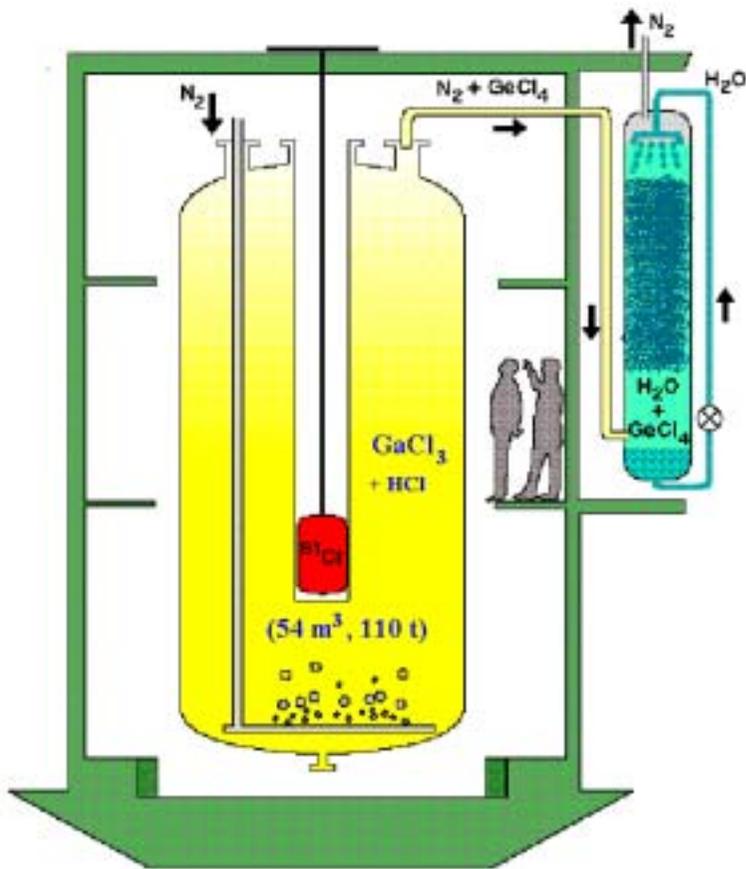


$$R(\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.16 (\text{stat}) \pm 0.16 (\text{syst}) \text{ SNU} \leftrightarrow \text{SSM} : 7.7_{-1.0}^{+1.2} \text{ SNU}$$

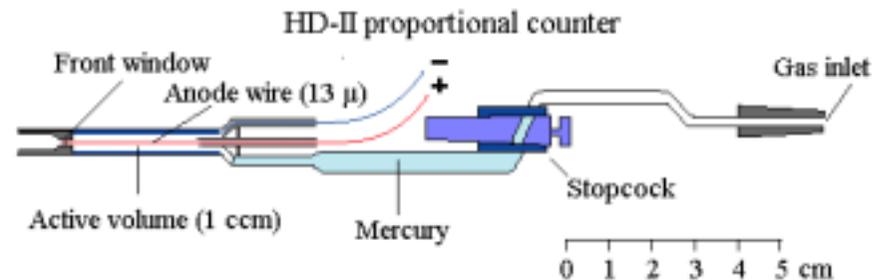
## Esperimento Gallex-GNO

30.3 ton di gallio sotto forma di soluzione  $GaCl_3 - HCl$ .

La reazione di neutrino é  $\nu_e + Ga^{71} \rightarrow Ge^{71} + e^-$  Soglia:  $E_\nu = 233 MeV$  sensibile ai neutrini del ciclo pp.



- Ogni  $\sim 3$  settimane gli atomi di  $^{71}Ge$  prodotti dai neutrini (assieme agli atomi inattivi di Ge aggiunti alla soluzione all'inizio di ogni run), sotto forma del composto volatile  $GeCl_4$ , sono estratti dalla soluzione fluendo azoto.
- L'azoto viene separato mentre il  $GeCl_4$  viene convertito in  $GeH_4$ , mescolato con xenon e introdotto in contatori proporzionali

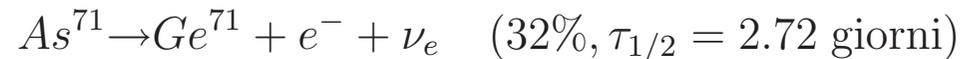


- Gli atomi di  $Ge^{71}$  sono rivelati attraverso i raggi x dal processo  $e^- + Ge^{71} \rightarrow Ga^{71} + \nu$ . ( $\tau_{1/2} = 11.43$  giorni)

La distribuzione temporale dei conteggi e l'energia dei raggi X sono la firma della produzione di  $Ge^{71}$

## VERIFICHE SPERIMENTALI

- **Ge-carrier:** Ogni run é monitorato da circa 1 mg di Ge-carrier. Questa quantità deve essere ritrovata nel conteggio finale.
- **Blank run:** Il sole non può essere spento ma in run di un solo giorno si può assumere di non avere avuto interazioni di neutrini e misurare il livello di fondo.
- **Esperimento  $As^{71}$ :** é stata iniettata una quantità nota di  $As^{71}$  nella tanica:



Possibile solo alla fine dell'esperimento, l'arsenico poteva contaminare la tank. Risultato: efficienza =  $(100 \pm 1)\%$

- **Sorgente di  $Cr^{51}$**  da 1.6 Mci!  $\rightarrow e^{-} + Cr^{51} \rightarrow \nu_e + V^{51}$

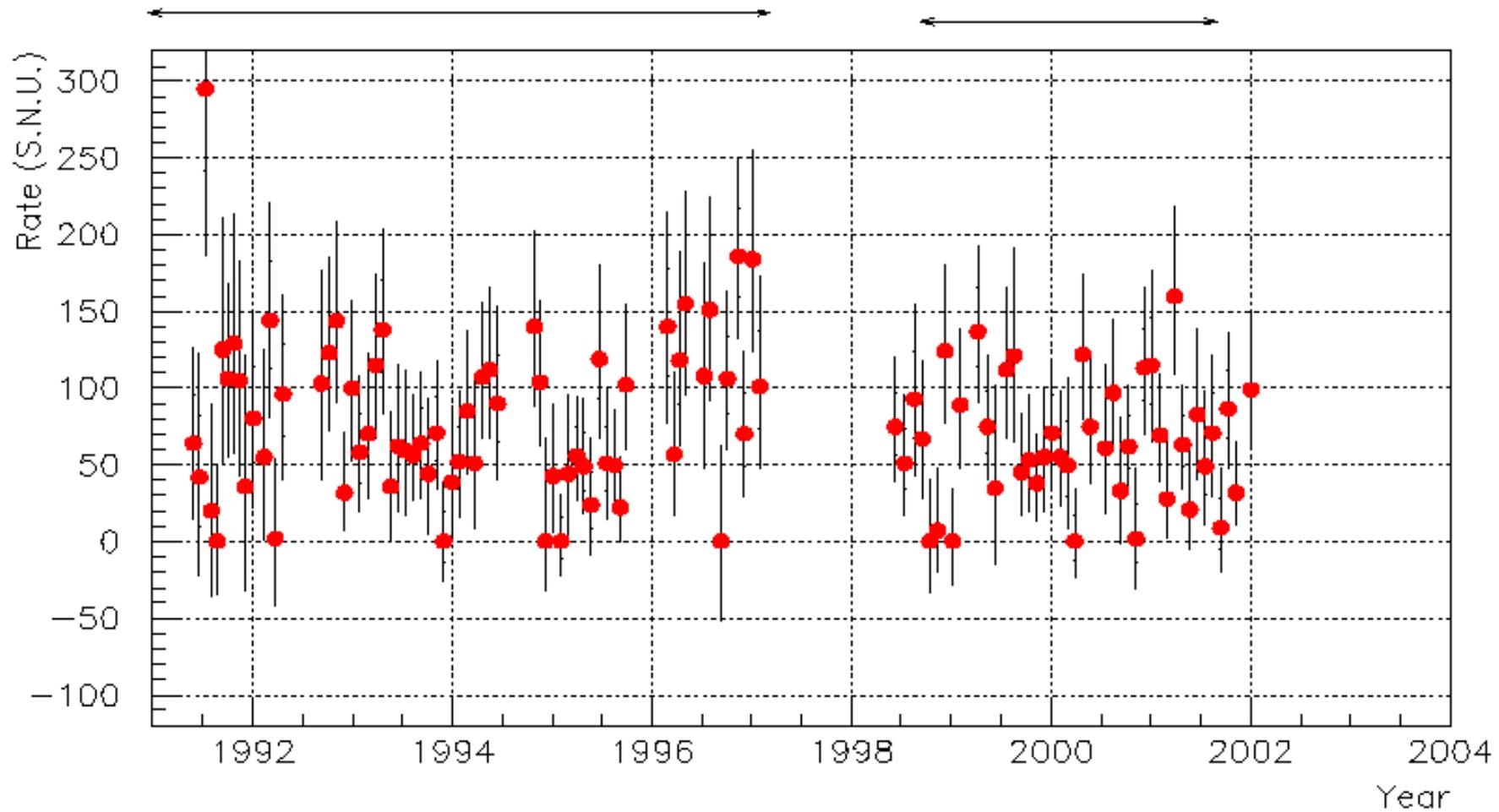
$E_{\nu_e} = 0.75 \text{ MeV}$ . Il flusso iniziale di  $\nu_e$  era circa 5 volte il flusso di  $\nu_e$  solari. Due run  $\rightarrow$  risposta del rivelatore:  $95 \pm 8\%$ .

Energy-RT analysis

**GALLEX**

Energy-PS/NN analysis

**GNO**



**GALLEX**

**65 SR**

**77.5 ± 6.2 (stat) ± 4.5 (sys) SNU**

**GNO**

**43 SR**

**65.2 ± 6.4 (stat) ± 3.0 (sys) SNU**

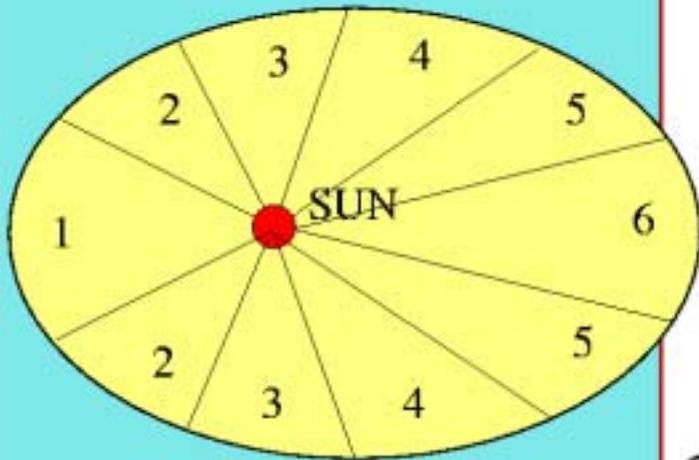
**GNO+GALLEX**

**108 SR**

**70.8 ± 4.5 (stat) ± 3.8 (sys) SNU**



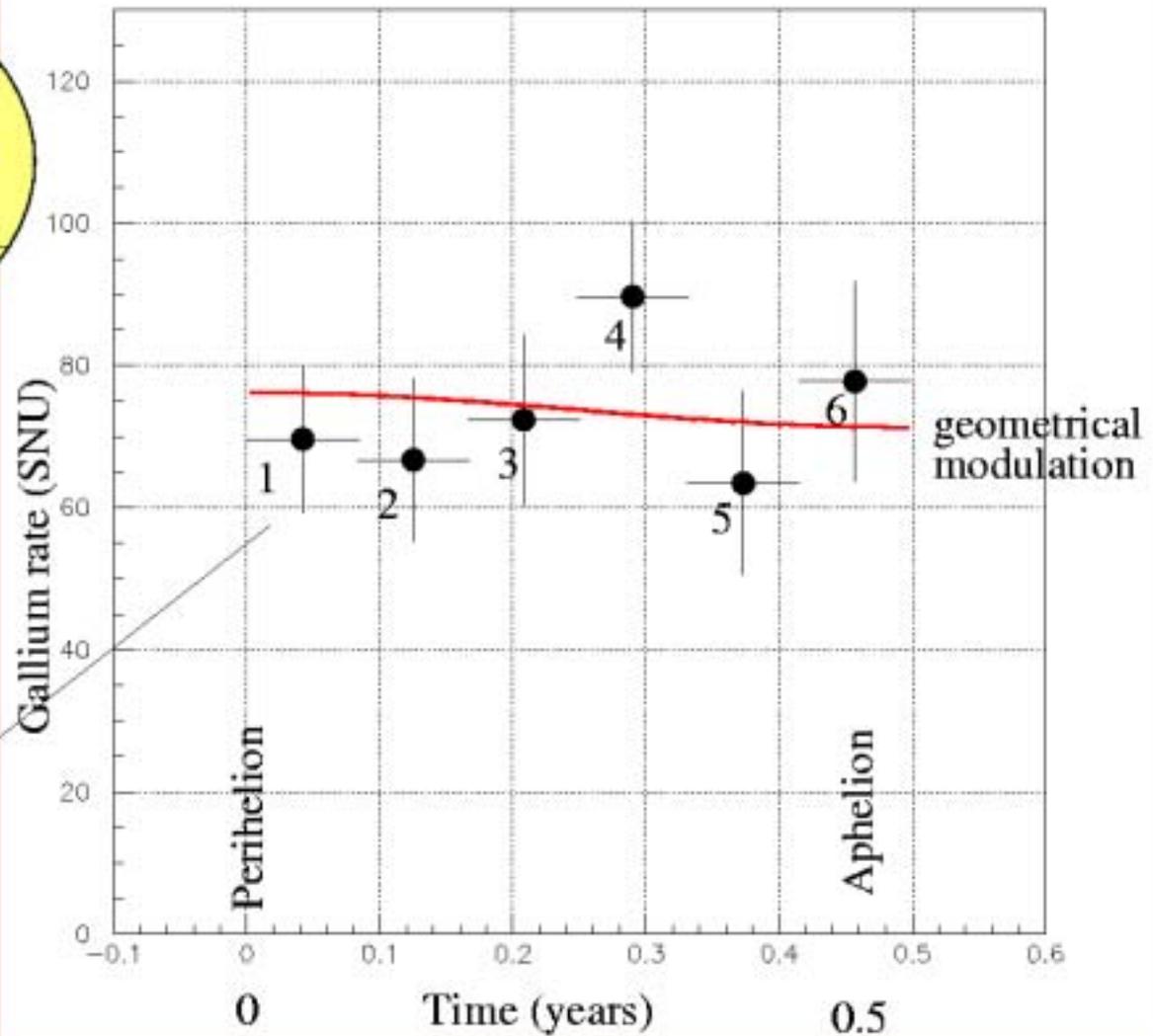
## GALLEX/GNO data binned with distance from the Sun



Earth Orbit

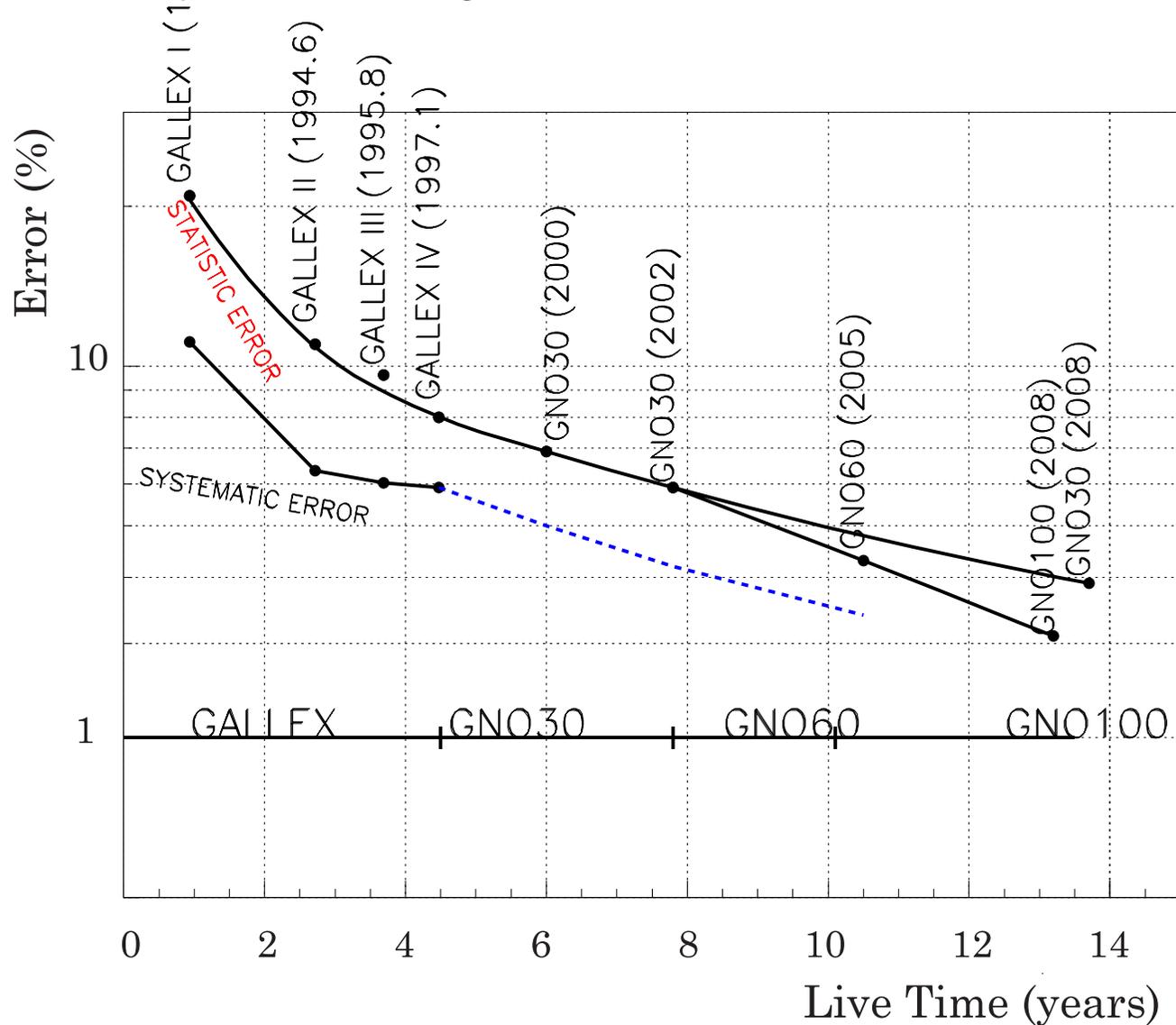
$W-S = -9 \pm 10$  SNU  
 expected geom. modulation  
 $+2.5$  SNU

$\chi^2 = 4.1 / 5$  DOF  
 C.L. = 53 %



GNO sar  per lungo tempo l'unico esperimento in grado di rivelare i neutrini del ciclo pp.

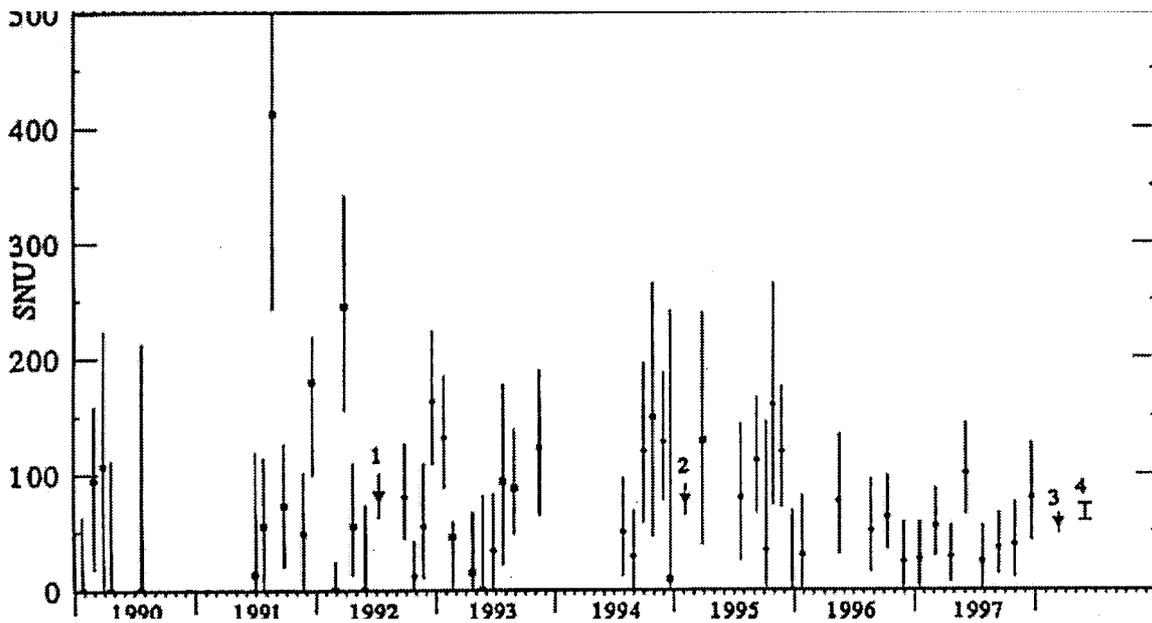
Ha comunque senso continuare l'esperimento solo se gli errori sistematici verranno ridotti al di sotto degli errori statistici



# Esperimento SAGE (Soviet American Gallium Experiment)

Baksan valley - Caucaso - Russia

Molto simile a Gallex, ha preso dati nello stesso periodo. Fino a 57 ton di gallio metallico (liquido sopra i 30°).



Risultato:  $66.6^{+7.8}_{-8.1}$  SNU,    Predizione:  $129^{+8}_{-6}$  SNU.

## Progetto (Super)Kamiokande

Miniera Kamioka - Takayama - Giappone.

**Esperimento KAMIOKANDE.** Operativo dal 1984, inizialmente progettato per studiare il decadimento del protone. É costituito da una vasca sferica riempita da 3000 tonnellate d'acqua (fiduciale=670 ton), equipaggiata con 1071 PMT da 20" (con copertura del 20% della superficie)

**KAMIOKANDE II.** Dall'inizio del 1986 il rivelatore é migliorato con un veto attivo a  $4\pi$ , elettronica multi-hit + timing e un sistema potenziato di purificazione dell'acqua. Questo permette di abbassare la soglia di rivelazione a 7 MeV aprendo la possibilità di rivelare i neutrini solari.

Nel 1987 esplode la supernova SN1987A e l'esperimento ne rileva i neutrini.

Dal 1988 la soglia sugli elettroni é portata a 5.2 MeV.

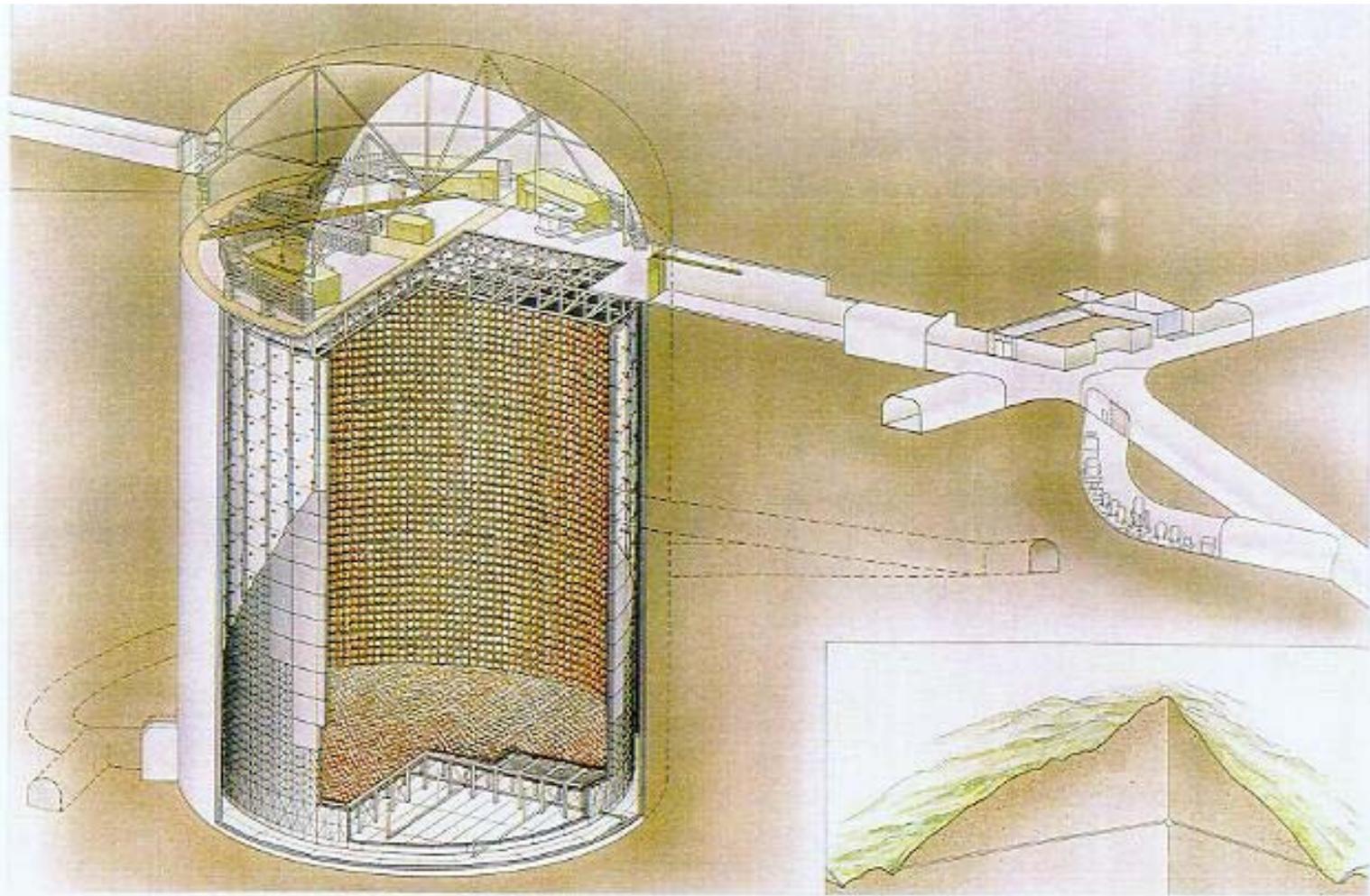
**Esperimento SuperKamiokande.** Operativo dal 1 aprile 1996, é una vasca sferica da 50000 ton, con un fiduciale di 22000 ton. La soglia sui neutrini solari é inizialmente a 7.5 MeV ed e' stata progressivamente portata agli attuali 5.0 MeV (settembre 2000).

**Progetto K2K** Il primo fascio Long Baseline operativo. Usa neutrini prodotti a KeK e SuperKamiokande come far detector. Inizio della presa dati nel 1999.

L'esperimento é lo stato dell'arte attuale nei seguenti campi

- Proton decay.
- Neutrini solari.
- Neutrini atmosferici.
- Neutrini da supernova.
- Neutrini da fasci Long Baseline.

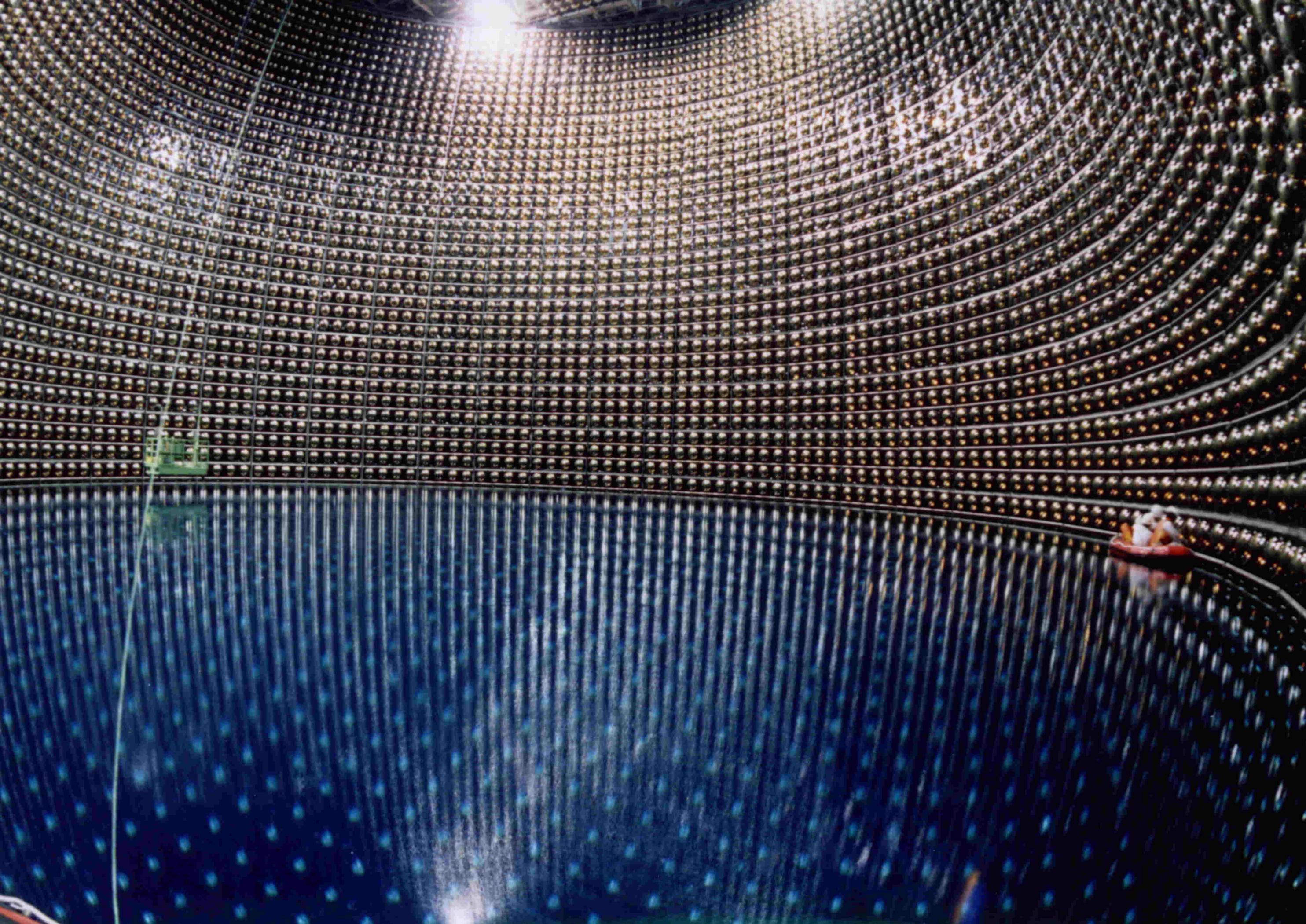
# Rivelatore SuperKamiokande

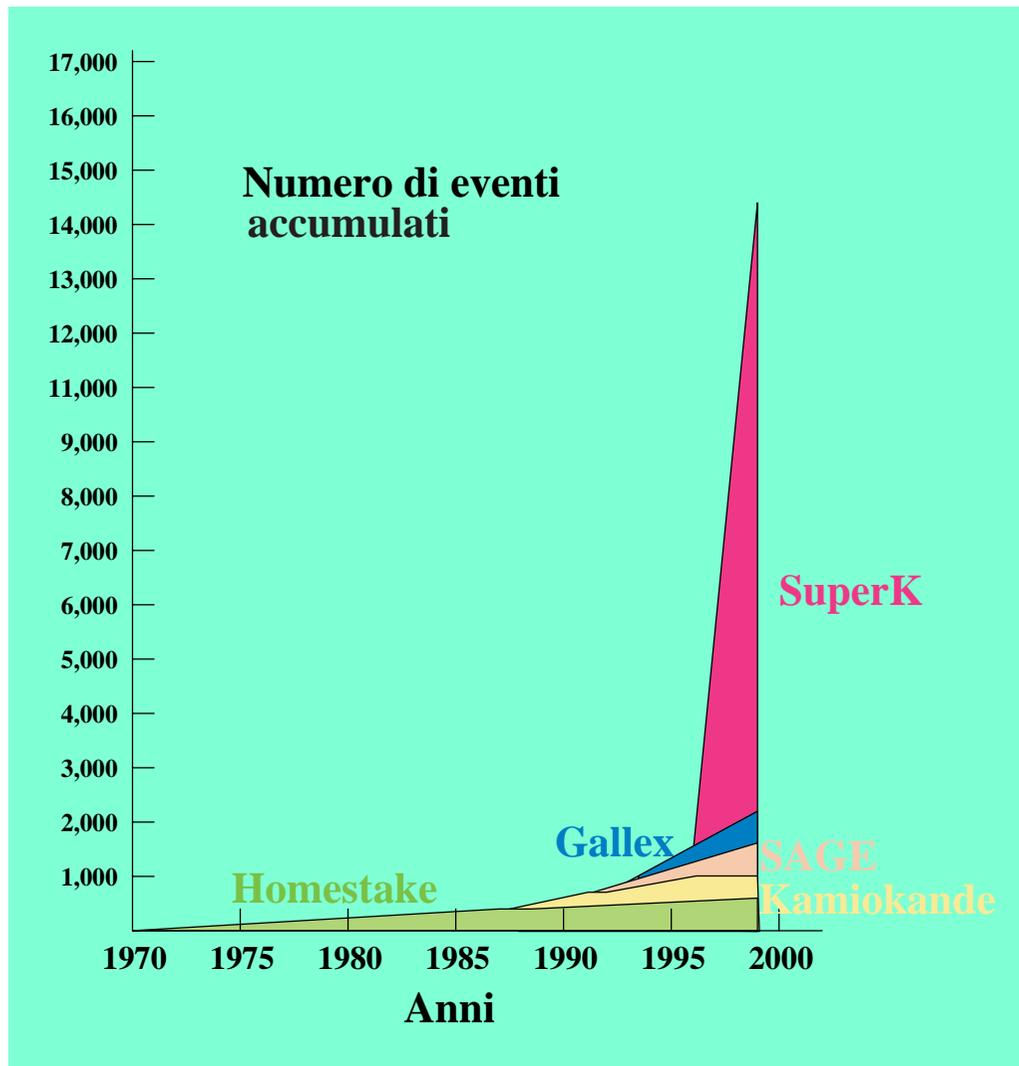


SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

NIKSEN SENKE

Tank	Dimensioni	$\phi = 39.3 \text{ m}, h = 41.4 \text{ m}$
	Volume	50 kton
Rivelatore Esterno	Spessore	2.6 m ( $7.2X_0$ e $4.3\lambda_0$ )
	Volume	18 Kton
	Num. di PMT	302 (top), 308 (bottom), 1275 (barrel)
Rivelatore Interno	Dimensioni	$\phi = 33.8 \text{ m}, h = 36.2 \text{ m}$
	Volume	32 kton
	Num. di PMT	1748 (basi), 7650 (lati), 40.4% coverage
Fiduciale	Spessore	2m ( $5.5X_0, 3.3\lambda_0$ ) dall'inner wall
	Volume	22 kton





## Rivelazione di luce Čerenkov

In un mezzo a indice di rifrazione  $n$  la velocità della luce é  $c/n$ . Quando una particella carica attraversa un mezzo con velocità maggiore della velocità della luce, emette luce Čerenkov . L'energia minima della particella per emettere luce Čerenkov é:

Particella	Soglia Čerenkov (Energia totale in MeV)
$e$	0.768
$\mu$	158.7
$\pi$	209.7

La luce Čerenkov é emessa in un cono di mezza ampiezza  $\theta$  nella direzione della traccia:

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$$

$\theta = 42^\circ$  per  $\beta = 1.0$  in acqua.

Lo spettro della luce Čerenkov in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  é:

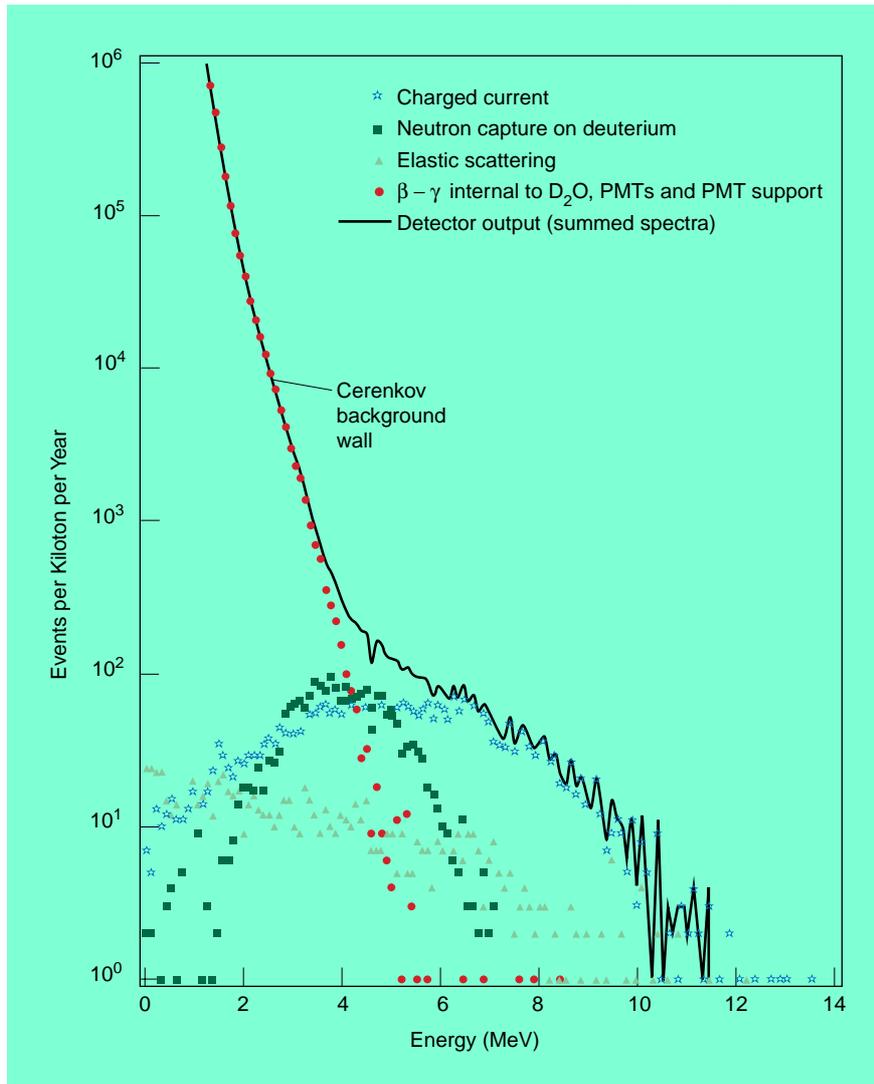
$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha l}{c} \left(1 - \frac{n^2}{\beta^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}$$

dove  $\alpha$  é la costante di struttura fine e  $l$  é la lunghezza della traccia.

Una particella carica emette circa 390 fotoni per 1cm di lunghezza in acqua nel range  $300 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ .

## Il Čerenkov wall

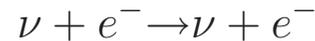
La presenza di Radon pone un limite inferiore all'energia degli elettroni rivelabile.



N.B. La concentrazione di Radon nel rivelatore é di  $1500 \text{ Bq/m}^3$  d'estate e  $30 \text{ Bq/m}^3$  d'inverno, questo perché l'aria soffia nella miniera d'inverno e fuori dalla miniera in estate. Il rivelatore é rivestito da "Mineguard", un poliuretano che blocca il radon emanato dalla roccia; aria purificata é flussata nei 60 cm di intercapedine fra la roccia e il rivelatore.

## Interazioni di neutrini in SuperK

I neutrini solari sono rivelati in SuperK attraverso la reazione



Nel range di energia dei neutrini solari le sezioni d'urto sono

$$\begin{cases} \sigma_{total} = 8.96 \times 10^{-44} \text{cm}^2 & \text{per } \nu_e \\ \sigma_{total} = 1.58 \times 10^{-44} \text{cm}^2 & \text{per } \nu_\mu, \nu_\tau \end{cases}$$

La differenza fra  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  sta nel fatto che i primi interagiscono sia attraverso CC che NC, mentre  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  possono interagire solo attraverso NC. Ovviamente il sole emette solo  $\nu_e$ , ma se oscillano possono trasformarsi in  $\nu_\mu$  e/o  $\nu_\tau$ .

Massima energia cinetica  $T_{max}$  di un elettrone:

$$T_{max} = \frac{E_\nu}{1 + m_e/2E_\nu}$$

Distribuzione di energia degli elettroni di rinculo:

$$F(T_e)dT_e = \left[ \int_0^{E_\nu^{max}} \Phi(E_\nu) \frac{d\sigma}{dT_e} dE_\nu \right] dT_e$$

dove  $\Phi(E_\nu)$  è il flusso di neutrini solari e  $E_\nu^{max}$  è la massima energia di un neutrino solare.

Angolo  $\theta$  fra la direzione dell'elettrone di rinculo e la direzione del neutrino:

$$\cos\theta = \frac{1 + m_e/E_\nu}{\sqrt{1 + 2m_e/T_e}}$$

e la distribuzione angolare è

$$F(\theta)d\theta = \left[ \int_0^{E_\nu^{max}} \Phi(E_\nu) \frac{d\sigma}{dT_e} \frac{dT_e}{d\theta} dE_\nu \right] d\theta$$

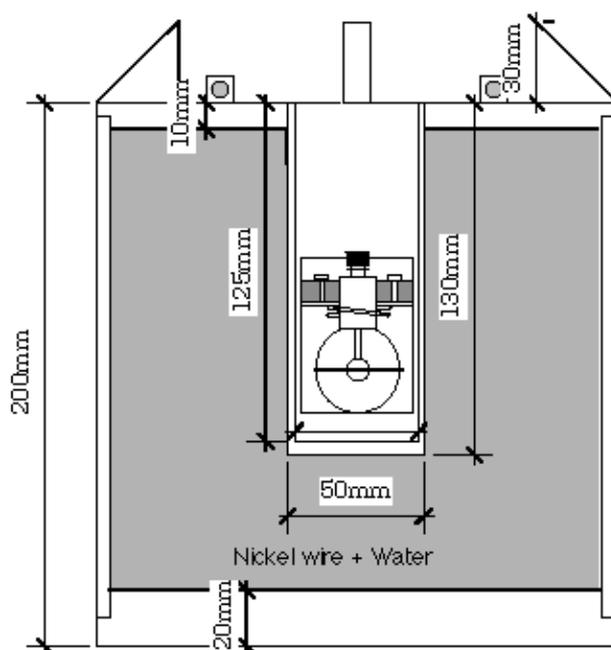
# Calibrazioni in SuperK

## Fototubi

- **Guadagno dei PMT** Lampada allo Xenon con luce diffusa da una “Scintillator Ball” posizionabile a scelta nel rivelatore.

### Distribuzioni di singolo fotoelettrone

Sorgente di Nickel. La sorgente di Nickel é attivata da neutroni emessi da una sorgente di  $^{252}\text{Cf}$ . I vari isotopi del Nickel –  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{62}\text{Ni}$ ,  $^{64}\text{Ni}$ , – emettono  $\gamma$  a 9.0, 7.82, 6.84 e 6.10 MeV rispettivamente. La sorgente puó essere spostata in varie zone del rivelatore. Ogni segnale é praticamente di singolo elettrone.

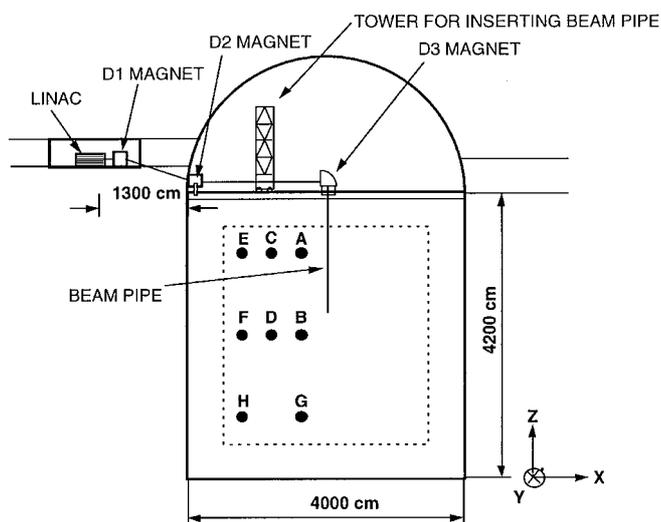


- **Timing Laser  $N^2$** , su dye, su “diffuser ball”. Calibrazione a 1 ns.

## Trasparenza dell'acqua

- **Laser  $N^2$** , il segnale viene raccolto da una telecamera a CCD
- **Elettroni da decadimento dei  $\mu$  passanti**, con energia fra i 37 e 53 MeV.
- **Muoni passanti**:  $Q_i = K \frac{a(\theta_i)}{L_i} \exp -\frac{L_i}{\lambda}$ ,  $Q_i$ : carica sul i-mo PMT,  $L_i$ : distanza traccia-PMT,  $\theta_i$ : angolo luce-PMT,  $\lambda$ : lunghezza di attenuazione dell'acqua (mediata sulle lunghezze d'onda della luce Čerenkov ).

## Energia



● **LINAC** Un Linac da  $5 \sim 16 \text{ MeV}$ ,

stabilità allo 0.3% (misurata da un germanio), spara nell'acqua, dall'alto, attraverso una beam-pipe. Posizione e angolo della beam-pipe possono essere variate.

● **Sorgente di Nickel**

● **Elettroni da decadimento dei  $\mu$  passanti**

Efficienza di Trigger

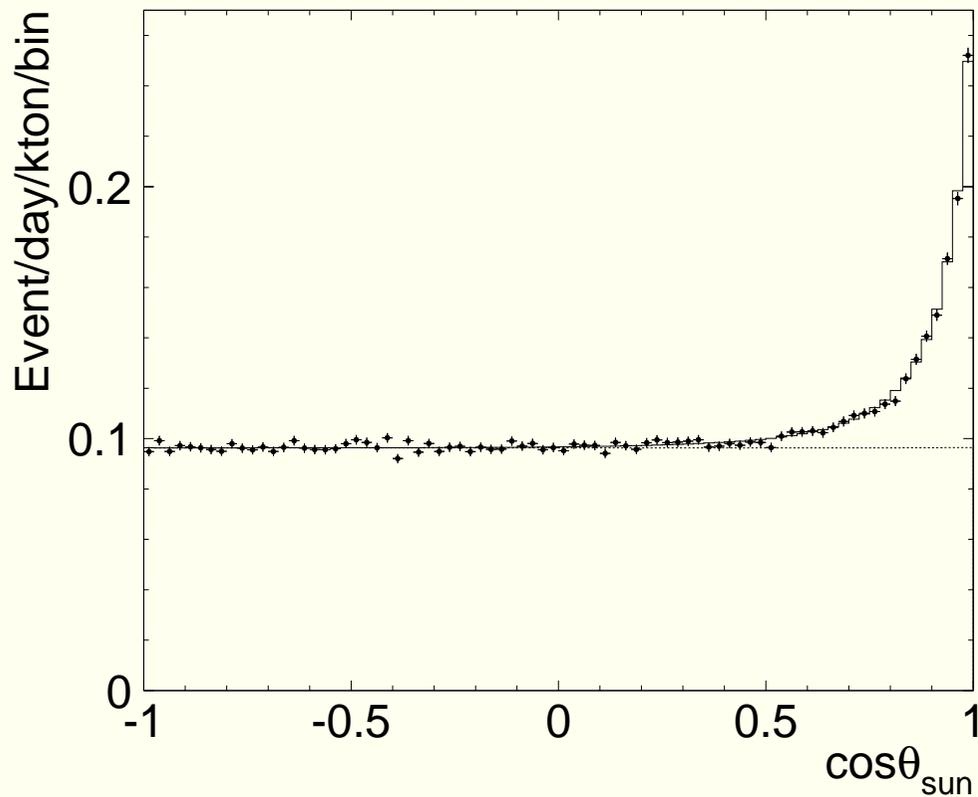
● **Sorgente di Nickel**

Sistematiche finali sulla scala di energia: 1.4%

**Systematic Errors**      **for 22.5 kton,**      **1258days**  
**5.0-20MeV sample**

	<b>Flux</b>	<b>Seasonal</b>	<b>Day-Night binned data</b>
<b>E-Scale, Resolution</b>	<b>+ 1.4</b> <b>- 1.4</b>	<b>+ 1.2</b> <b>- 1.1</b>	<b>+ 1.2</b> <b>- 1.1</b>
<b><sup>8</sup>B spectrum</b>	<b>+ 1.2</b> <b>- 0.9</b>	—	—
<b>Trigger Efficiency</b>	<b>+ 0.5</b> <b>- 0.3</b>	<b>± 0.1</b>	—
<b>2nd level Trigger Efficiency</b>	<b>± 0.2</b>	<b>± 0.1</b>	—
<b>1st Reduction</b>	<b>± 1.0</b>	—	—
<b>2nd Reduction</b>	<b>+ 1.9</b> <b>- 1.3</b>	<b>± 0.5</b>	—
<b>Spallation Dead Time</b>	<b>± 0.2</b>	<b>± 0.1</b>	<b>± 0.1</b>
<b>Gamma cut</b>	<b>± 0.5</b>	<b>± 0.25</b>	—
<b>Vertex Shift</b>	<b>± 1.3</b>	—	—
<b>Non-flat BG</b>	<b>± 0.1</b>	—	<b>± 0.4</b>
<b>Angular Resolution</b>	<b>± 1.2</b>	—	—
<b>Cross Section</b>	<b>± 0.5</b>	—	—
<b>Live time</b>	<b>± 0.1</b>	<b>± 0.1</b>	<b>± 0.1</b>
<b>Total</b>	<b>+ 3.5</b> <b>- 3.0</b>	<b>+ 1.3</b> <b>- 1.3</b>	<b>+ 1.3</b> <b>- 1.2</b>

## I neutrini vengono dal Sole



Run period	$N_{hit}$ threshold	50/95% efficiency (MeV)	Analysis threshold (MeV)	Live-time (days)
(1) May 1996 ~	40.6	5.7 / 6.2	6.5	280
(2) May 1997 ~	34.5	4.7 / 5.2	5.0	650
(3) Sep. 1999 ~	30.4	4.2 / 4.6	5.0	320
(4) Sep. 2000 ~	27.7	3.7 / 4.2	5.0	246

Numero di neutrini solari:

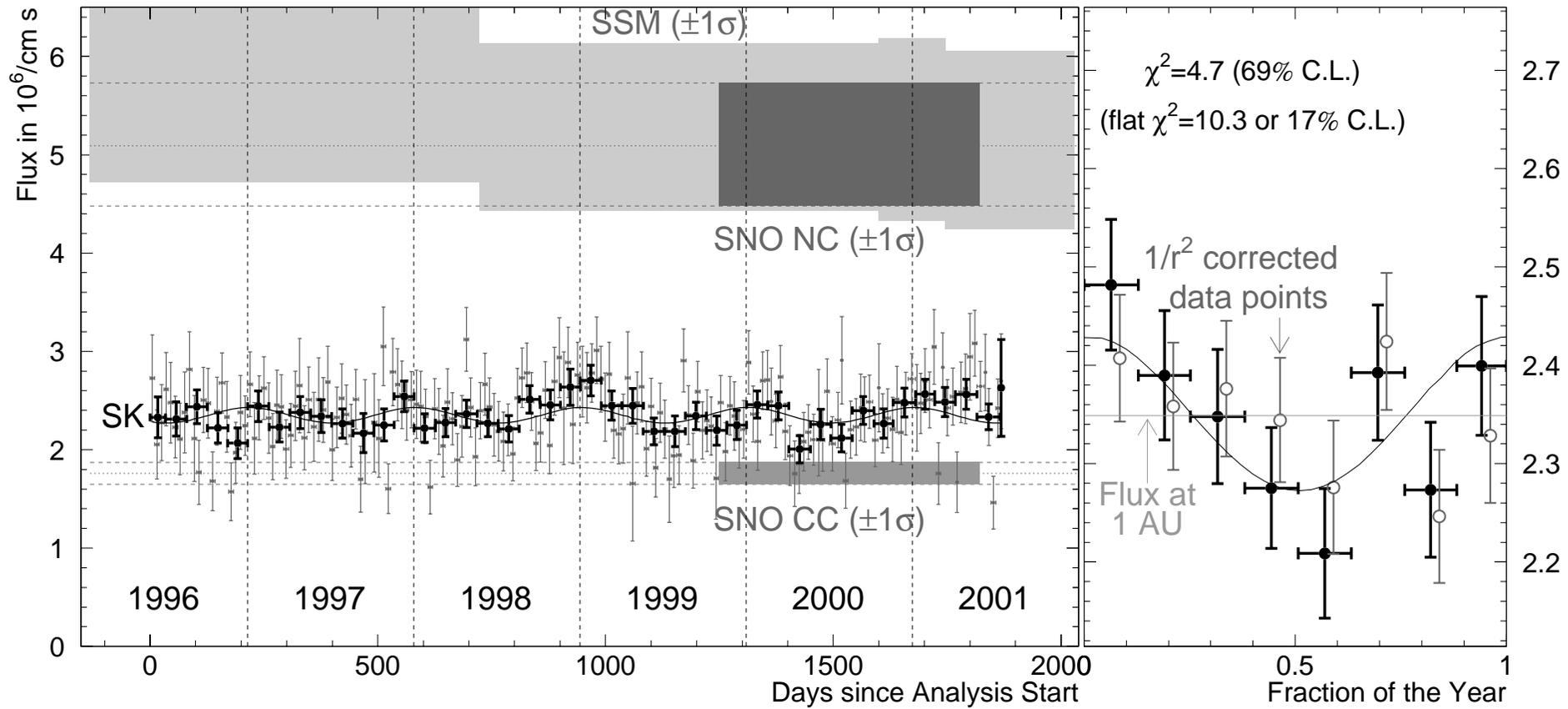
$$22400 \pm 88 \text{ (stat. + sys)}$$

(~ 13 eventi al giorno)

$$\text{Flusso} = 2.35 \pm 0.02 \text{ (stat.)} \pm 0.08 \text{ (syst.)} \times 10^6 / \text{cm}^2 \text{ s}$$

$$\text{Data}/SSM_{BP02} = 0.451 \pm 0.05 \text{ (stat)} \pm_{0.014}^{0.016} \text{ (syst)}$$

# Variazioni Temporal



**Il flusso é stabile indipendentemente dall'attività solare**

## Il puzzle dei neutrini solari

I risultati sperimentali vengono da SuperK, sensibile ai  $\nu_B$ , da Homestake, sensibile a  $\nu_{Be} + \nu_B$  e dagli esperimenti del gallio, sensibili a  $\nu_{pp} + \nu_{Be} + \nu_B$ . Le incognite sono i flussi dei neutrini del Boro, del Berillio e pp  $\rightarrow$  Tre equazioni e tre incognite.

Se  $x$  é il rapporto fra i flussi misurati e quelli predetti dal MC:  $x = \phi_m / \phi_{BP98}$ , la soluzione e'

Assumendo contributi da altri componenti uguali a quelli predetti:

- $x_B = 0.47 \pm 0.02$
- $x_{Be} = -0.68 \pm 0.22$
- $x_{PP} = 1.03 \pm 0.14$

Assumendo contributi da altri componenti = 0:

- $x_B = 0.47 \pm 0.02$
- $x_{Be} = -0.18 \pm 0.22$
- $x_{PP} = 1.03 \pm 0.14$

Controprova: Flusso di SuperK  $\rightarrow 2.40 \pm 0.10 \times 10^6 \nu/cm^2/s$ .

Moltiplicato per la sezione d'urto dei neutrini in  $^{37}Cl$  ( $1.14 \pm 0.03 \times 10^{-42} cm^2$ )  $\rightarrow 2.78 \pm 0.14 SNU$  in Homestake da  $^8B$ .

Flusso di Homestake ( $^8B + ^7Be + PeP + CNO$ ) =  $2.56 \pm 0.23 SNU$

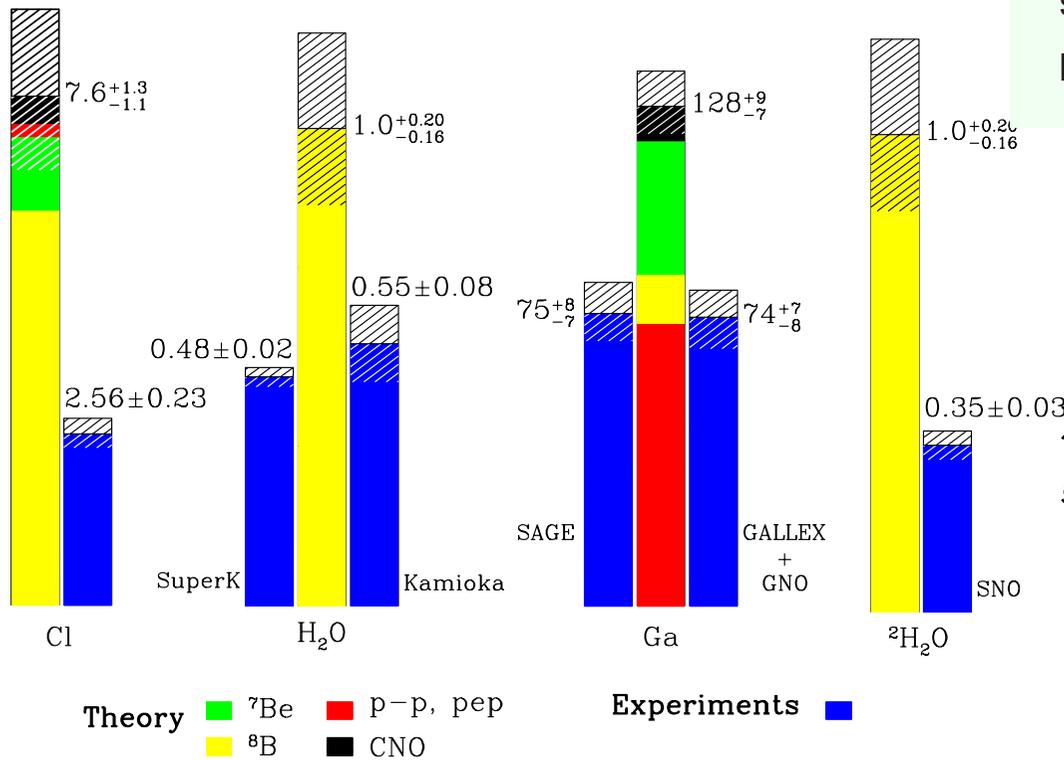
$\Rightarrow ^7Be + PeP + CNO$  in Homestake =  $-0.22 \pm 0.26 SNU$

In ogni caso  $x_{Be}$  risulta consistente con zero (forzato dal risultato di Homestake).

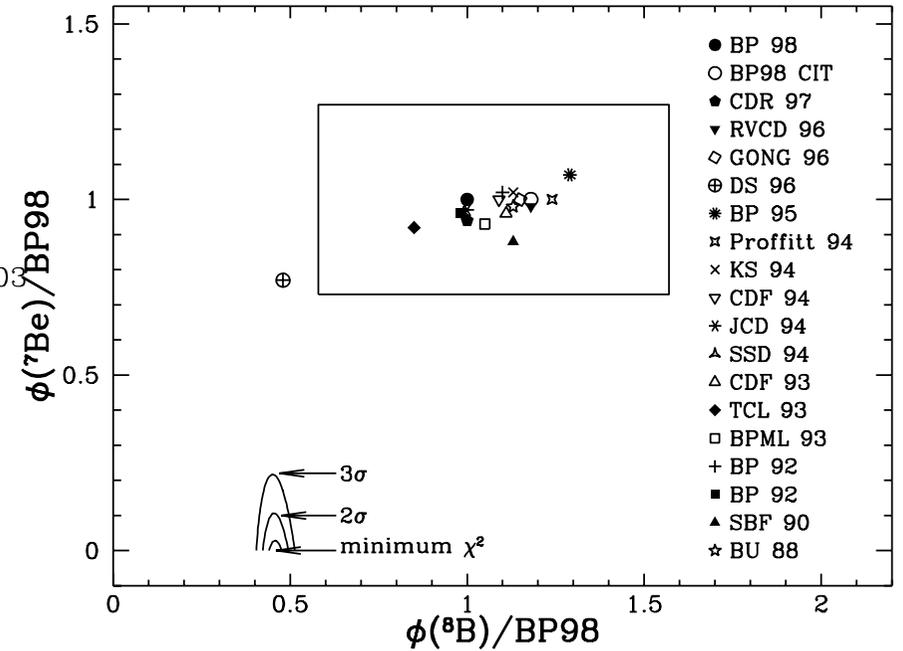
**MA i neutrini il ciclo del boro derivano dal ciclo del berillio**

## Ancora sul puzzle dei neutrini solari

Total Rates: Standard Model vs. Experiment  
Bahcall-Pinsonneault 2000



Nessun modello del sole, anche forzato, riesce a spiegare il rapporto misurato fra il flusso dei neutrini del boro e quello dei neutrini del berillio.



## SPIEGAZIONI del Solar Neutrino Puzzle

1. Esperimenti sbagliati
2. C'e' qualcosa che non va in Homestake, o per lo meno nelle sue sistematiche e calibrazioni.
3. I neutrini del berillio non sono piú  $\nu_e$  quando raggiungono i rivelatori → oscillazione di neutrini.

## FIT globale ai dati dei neutrini solari

Le soluzioni al fit globale sulle oscillazioni di neutrini solari si dividono in due categorie:

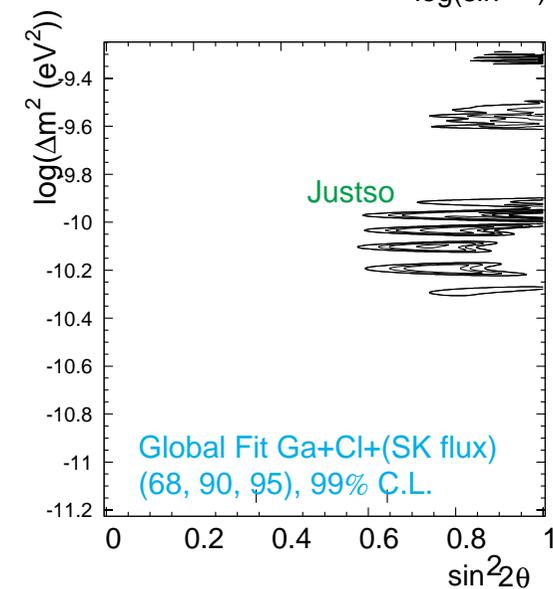
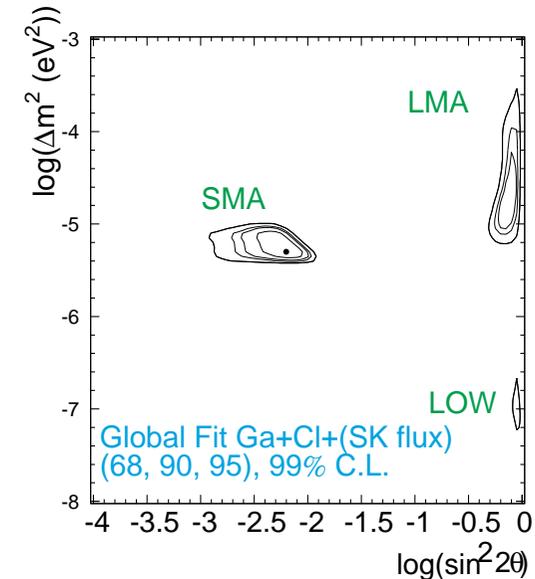
**MSW** Sono soluzioni presenti grazie al meccanismo MSW all'interno del sole. Ci sono tre di queste soluzioni:

**SMA** (Small Mixing Angle),

**LMA** (Large Mixing Angle)

**LOW**.

**Just So** Detta anche oscillazione nel vuoto: la distanza terra-sole é esattamente (e curiosamente) proprio quella caratteristica delle oscillazioni solari.



All the results have very strong deficits and the oscillation interpretation works very well over other explanations.

Why do people have not convinced that the solar neutrinos are oscillating?

Why solar neutrinos could not get a credit for the discovery of neutrino oscillations.

Atm  $\nu$  has won!!

Reason1. People working on solar  $\nu$  is too shy to claim that.

Reason2. Doubt on the flux

No body has looked inside of the sun

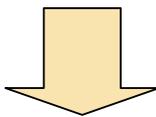
Although

the astrophysical solution is not favored, and the recent development of the Helioseismology have proved that the SSM is correct.

Reason3. Possible solutions are not unique.

At least four solutions.

Need

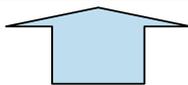


Flux independent evidence

Like atm-? zenith angle distribution

Obtain unique solution

By



Smoking Guns

energy spectrum distortion  
day/night flux difference  
seasonal variations

## Possibili Smoking Guns

1) **Modulazione dello spettro dei neutrini:** Le diverse soluzioni di oscillazione distorcono in modo diverso lo spettro dei neutrini solari. Le distorsioni sono evidenti sotto 1 MeV.

2) **Effetto day/night:** Le soluzioni MSW prevedono effetti di rigenerazione dei  $\nu_e$  nell'attraversare la terra  $\rightarrow$  il flusso misurato di giorno risulta diverso dal flusso misurato di notte.

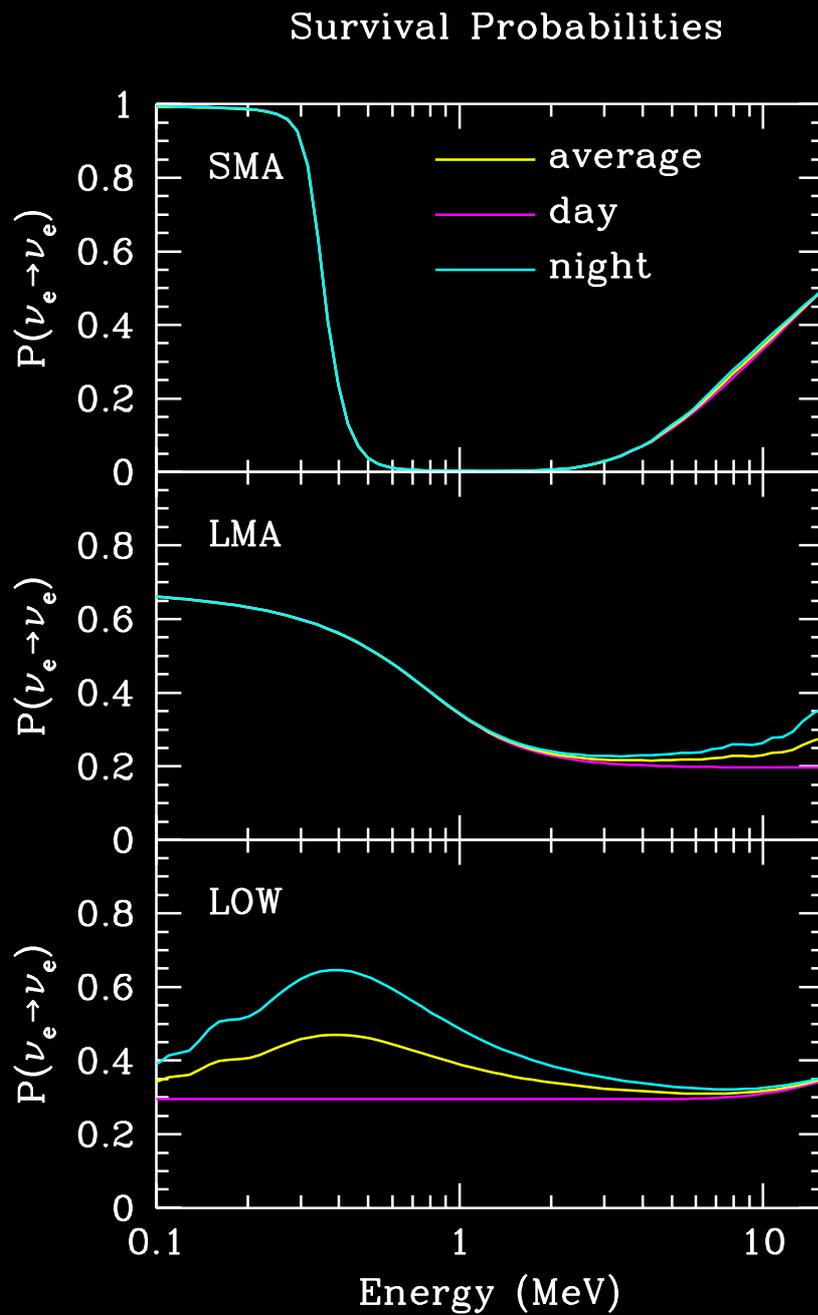
3) **Variazioni Stagionali:** la soluzione "just-so", calibrata sulla distanza sole-terra, varia il flusso in funzione della distanza sole-terra in modo sensibilmente maggiore dalle correzioni di angolo solido.

**Rapporto NC/CC o ES/CC:** I  $\nu_e$  si trasformano in  $\nu_\mu$  o in  $\nu_\tau$  (o al limite in  $\nu$  sterili) a causa dell'oscillazione. s: Command not found. però possono interagire attraverso le correnti neutre o lo scattering elastico su elettrone. Un rivelatore sensibile alle correnti neutre ottiene la normalizzazione al flusso totale di neutrini (non sterili), mentre con le correnti cariche ottiene il flusso di  $\nu_e$ . Una differenza dei due flussi è la firma delle oscillazioni.

1), 2) e 3) sono accessibili a SuperK. 4) a SNO.

## Modulazione dello spettro dei neutrini solari

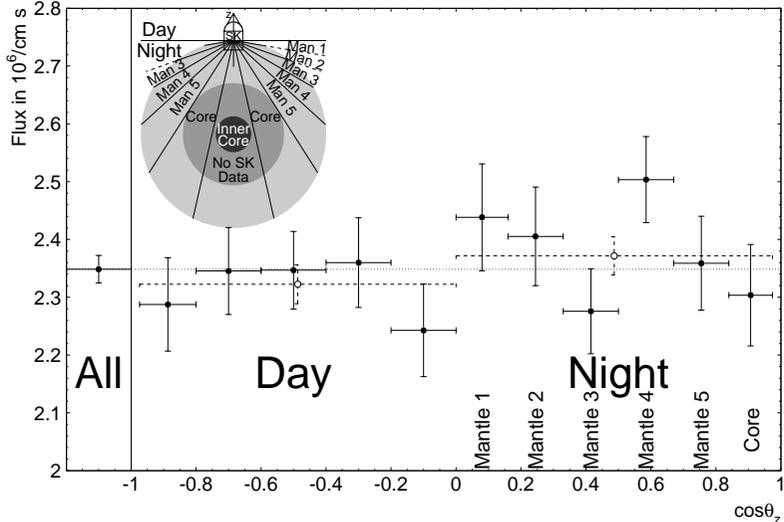
Nel caso delle soluzioni MSW lo spettro dei neutrini uscenti risulta fortemente modulato.



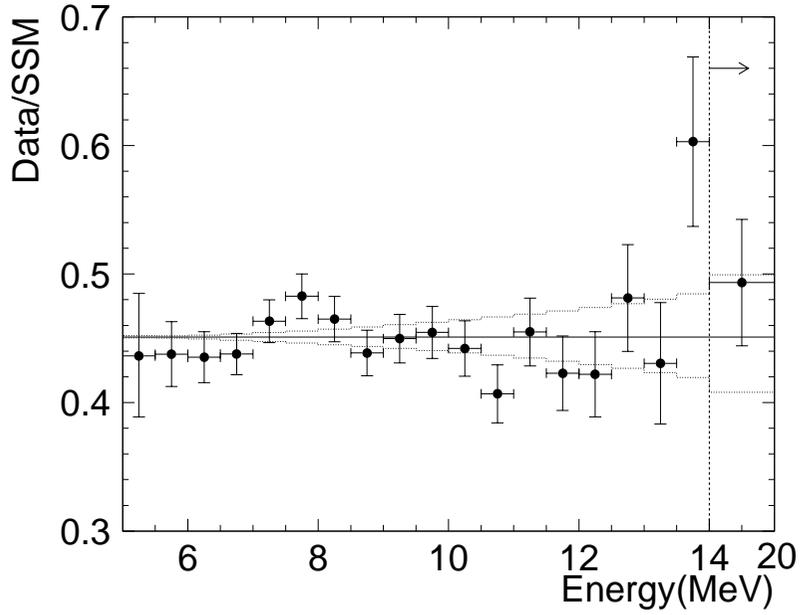
# Smoking guns a SuperKamiokande (cilecca)

- Nessun effetto Model Independent rivelato in SuperKamiokande.
- Non necessariamente in conflitto con l'ipotesi di oscillazione.
- Migliori (diverse) sensibilità sono richieste.

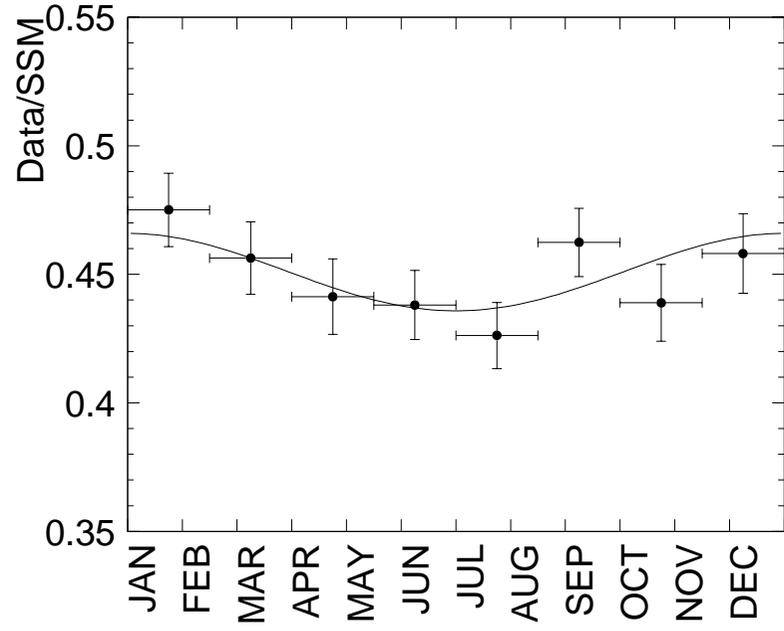
## Effetto Giorno/Notte



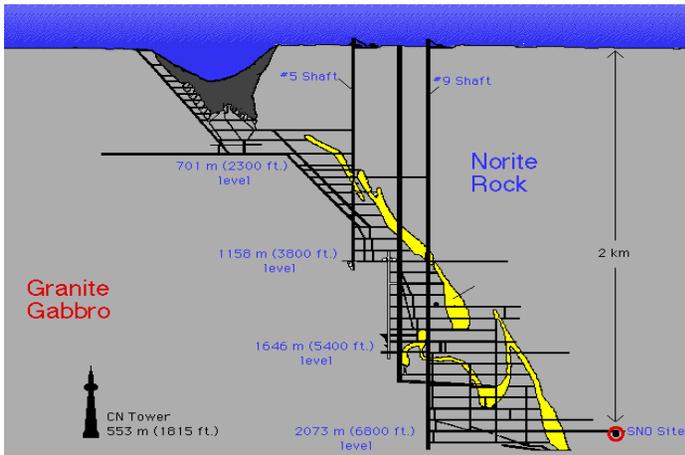
## Distorsioni dello Spettro



## Variazioni Stagionali



# Sudbury Neutrino Observatory



1000 tonnes  $D_2O$

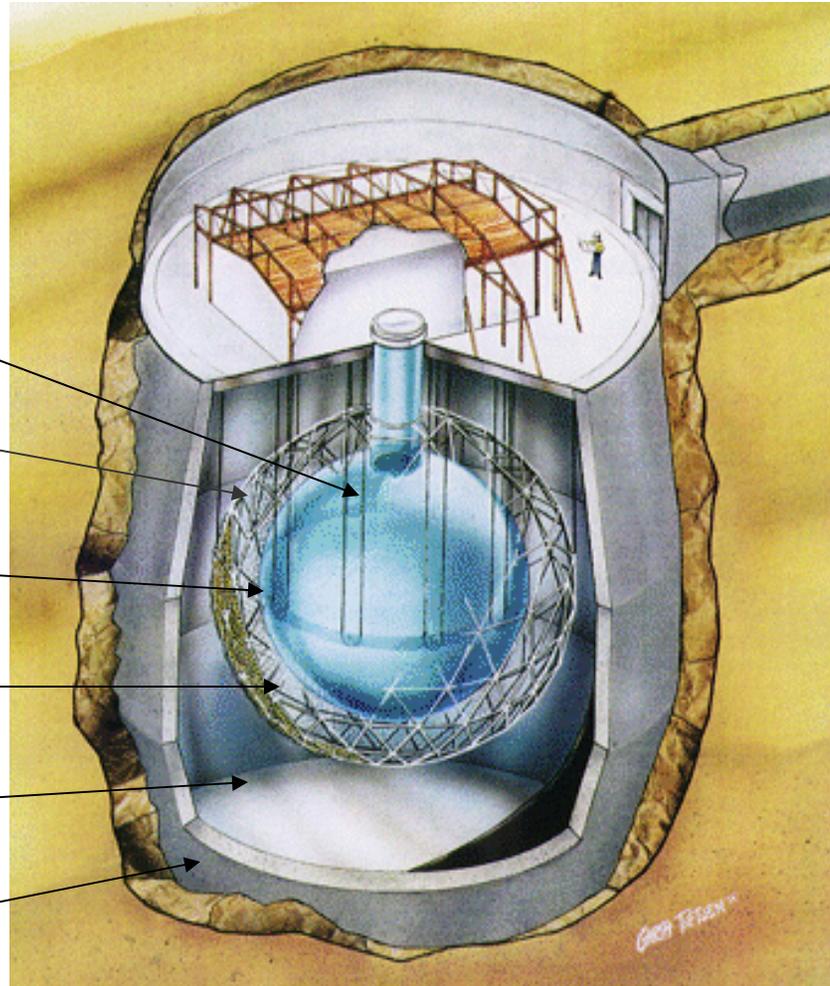
Support Structure for 9500 PMTs, 60% coverage

12 m Diameter Acrylic Vessel

1700 tonnes Inner Shielding  $H_2O$

5300 tonnes Outer Shield  $H_2O$

Urylon Liner and Radon Seal



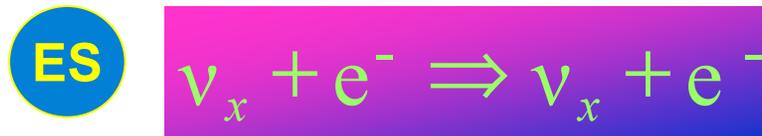
# $\nu$ Reactions in SNO



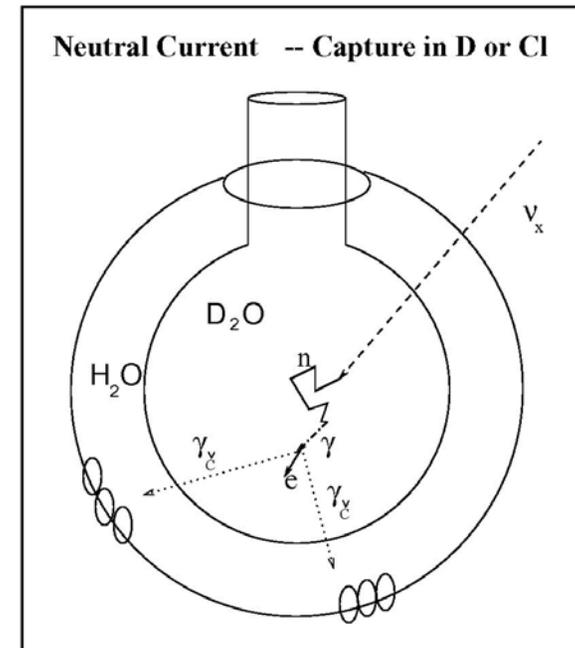
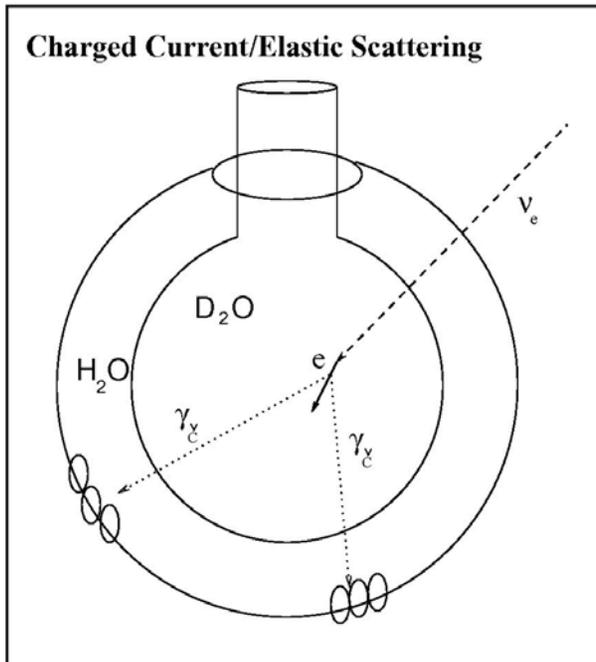
- Good measurement of  $\nu_e$  energy spectrum
- Weak directional sensitivity  $\propto 1 - 1/3 \cos(\theta)$



- Measure total  $^8\text{B}$   $\nu$  flux from the sun.
- Equal cross section for all  $\nu$  types



- Mainly sensitive to  $\nu_e$ , some sensitivity to  $\nu_\mu$  and  $\nu_\tau$
- Strong directional sensitivity



# Inclusive $\nu_{\mu\tau}$ Appearance

Two possibilities:

$$\frac{\text{CC}}{\text{NC}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + \nu_{\mu} + \nu_{\tau}}$$

Advantages:

- NC gives total flux directly
- Cross section uncertainties cancel

$$\frac{\text{CC}}{\text{ES}} = \frac{\nu_e}{\nu_e + 0.14(\nu_{\mu} + \nu_{\tau})}$$

Advantages:

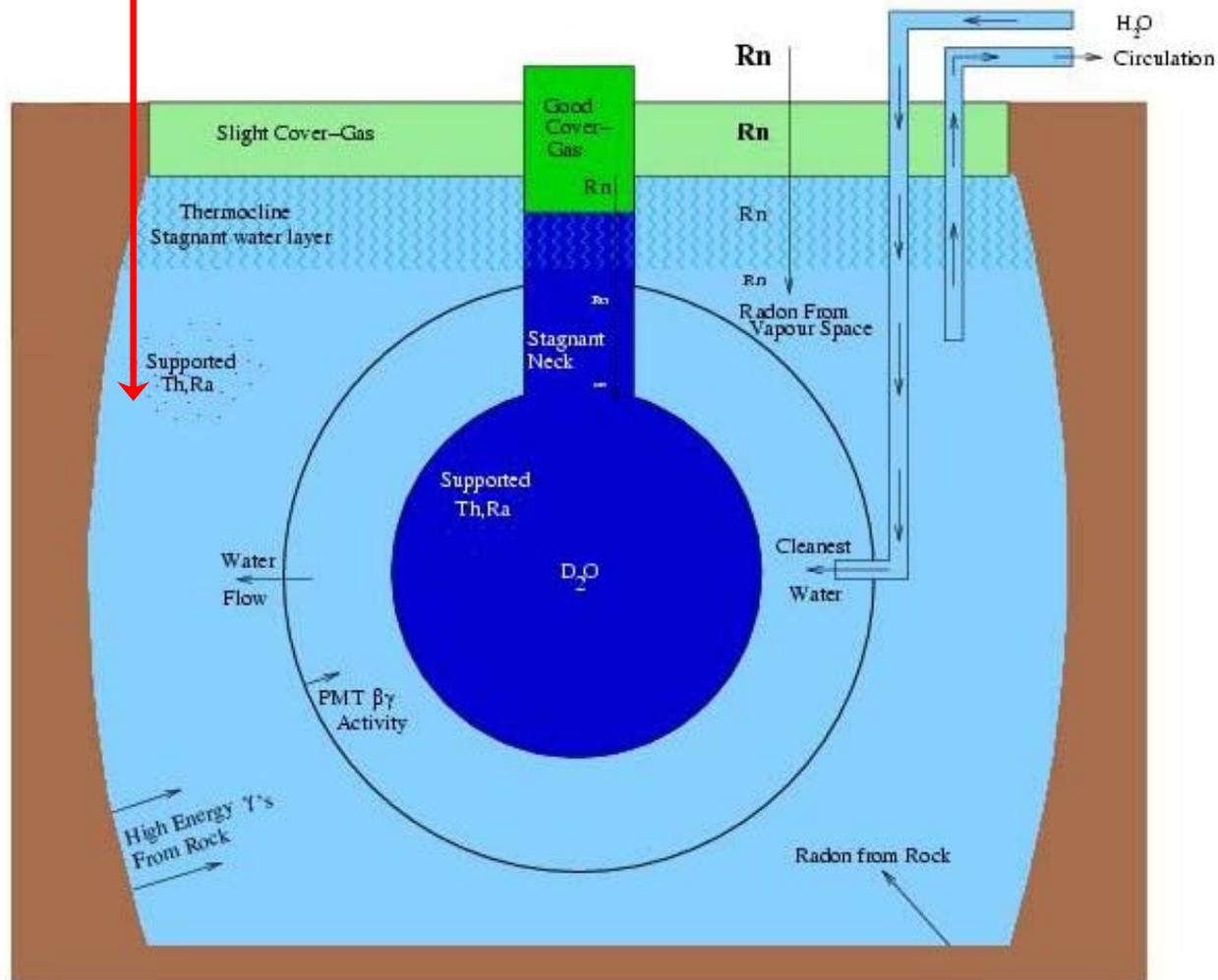
- ES excess points to Sun
- Can match energy regimes
- Super-K precision measurement

⇒ CC/ES used in this analysis

# Radioactive Backgrounds

Cosmic rays < 3/hour

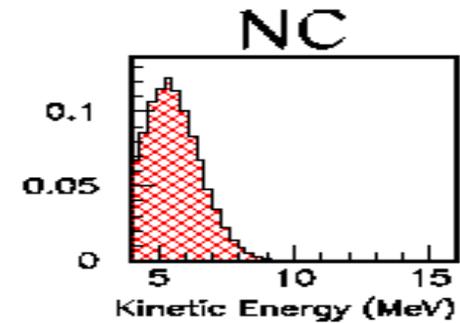
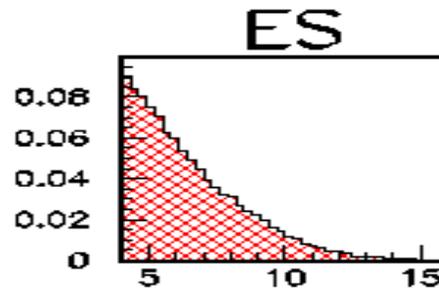
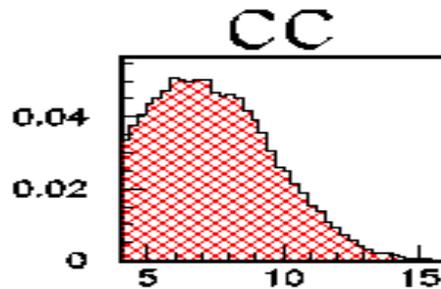
Sources of Activity in SNO Water Systems



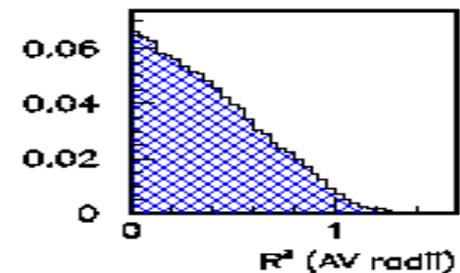
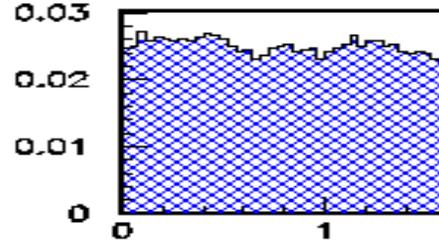
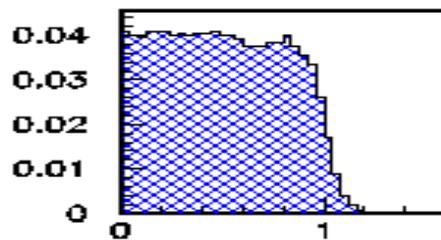
# Extracting Signals

➔ Can use derived observables ( $R^3$ ,  $\cos\theta_{\text{sun}}$ , and  $E$ ) to produce pdfs.

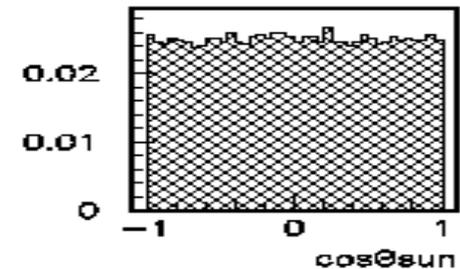
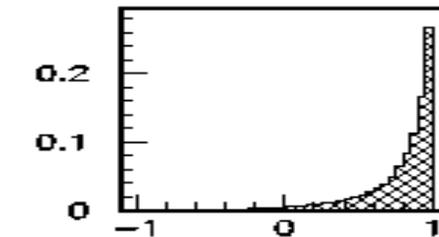
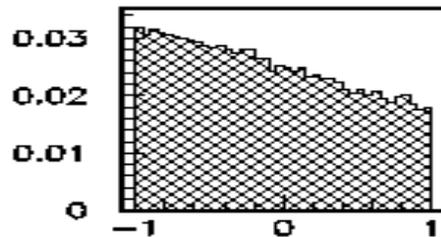
Energy Distribution



Radial Distribution ( $R^3$ ,  $R_{AV}=1$ )



Solar Direction Distribution

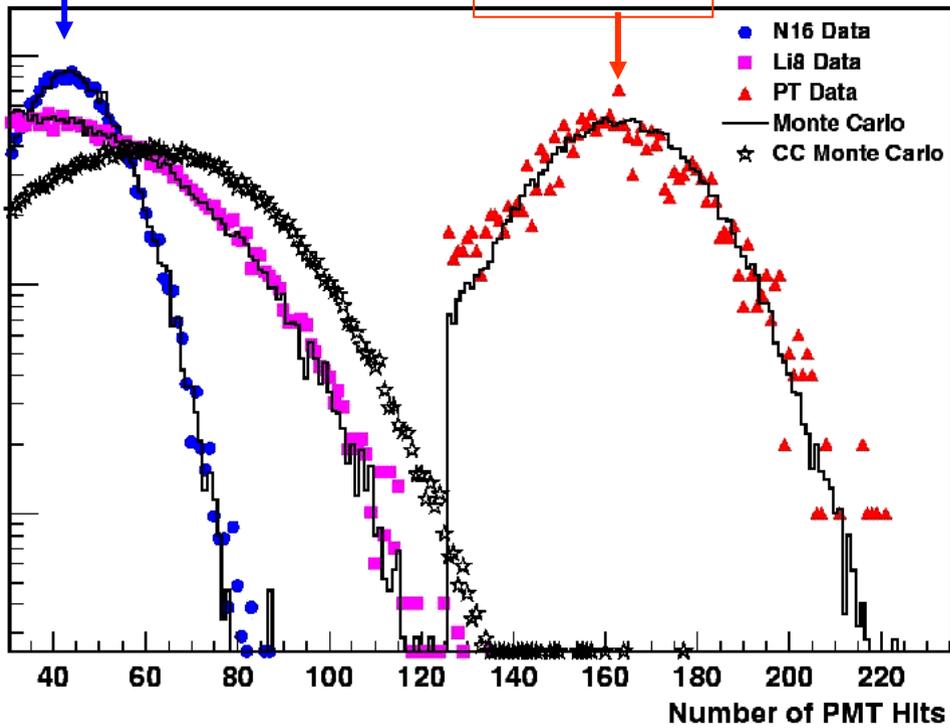


➔ Max. Likelihood fit for relative signal amplitudes

# SNO Energy Calibrations

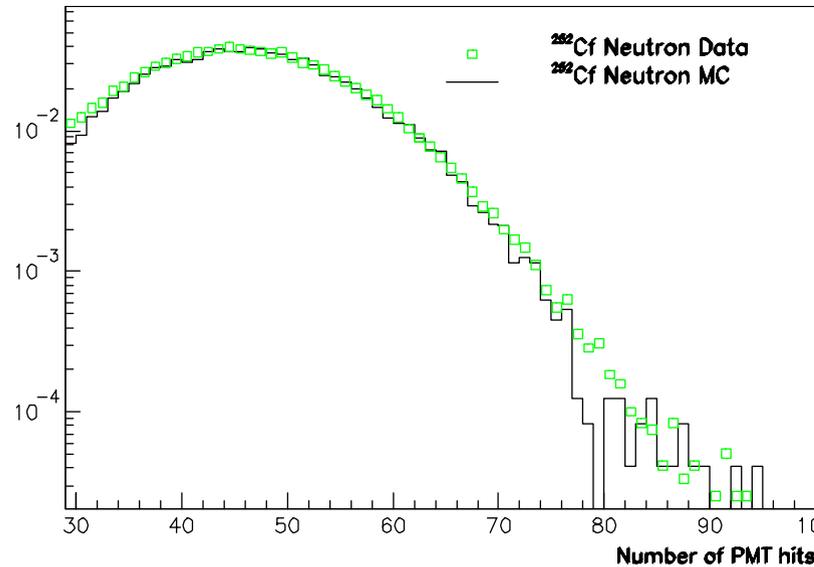
6.13 MeV

19.8 MeV



<sup>252</sup>Cf neutrons

β's from <sup>8</sup>Li  
γ's from <sup>16</sup>N and t(p,γ)<sup>4</sup>He



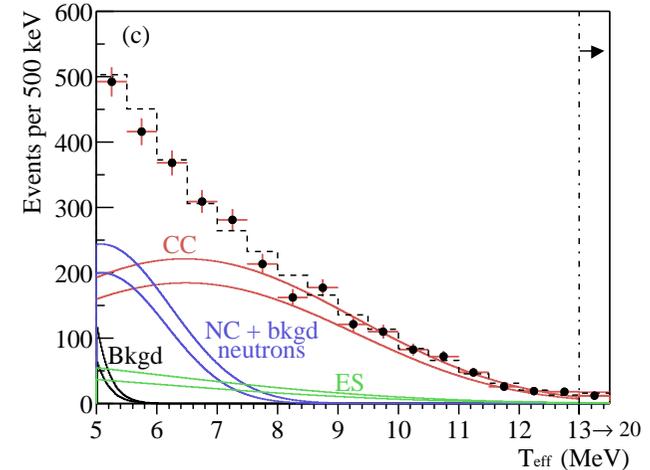
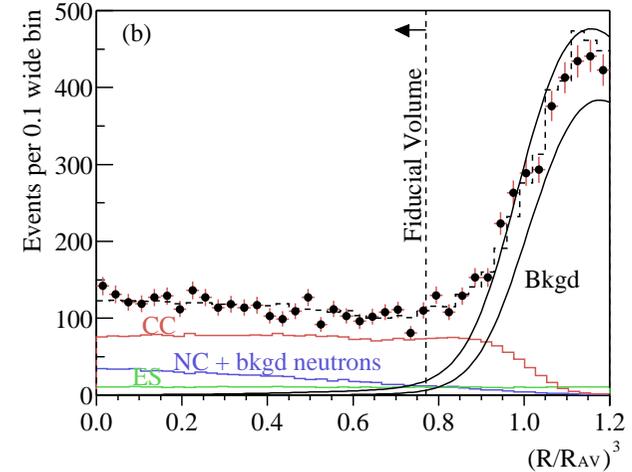
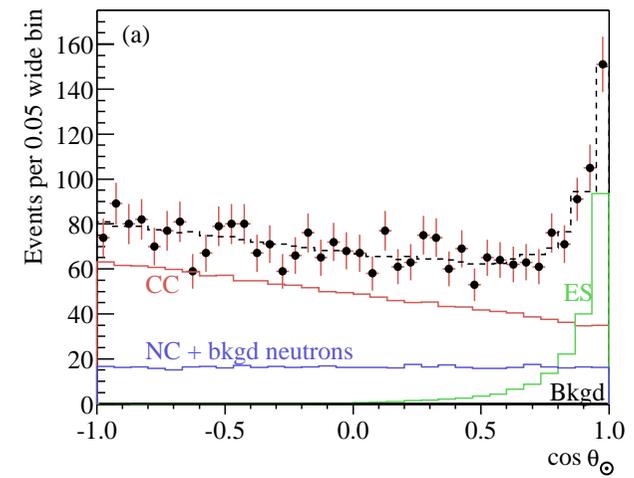
# Segnali e fondi in SNO

## Background events.

Source	Events
D <sub>2</sub> O photodisintegration	44 <sup>+8</sup> <sub>-9</sub>
H <sub>2</sub> O + AV photodisintegration	27 <sup>+8</sup> <sub>-8</sub>
Atmospheric $\nu$ 's and sub-Cherenkov threshold $\mu$ 's	4 $\pm$ 1
Fission	$\ll$ 1
<sup>2</sup> H( $\alpha$ , $\alpha$ )pn	2 $\pm$ 0.4
<sup>17</sup> O( $\alpha$ ,n)	$\ll$ 1
Terrestrial and reactor $\bar{\nu}$ 's	1 <sup>+3</sup> <sub>-1</sub>
External neutrons	$\ll$ 1
<b>Total neutron background</b>	<b>78 <math>\pm</math> 12</b>
D <sub>2</sub> O Cherenkov	20 <sup>+13</sup> <sub>-6</sub>
H <sub>2</sub> O Cherenkov	3 <sup>+4</sup> <sub>-3</sub>
AV Cherenkov	6 <sup>+3</sup> <sub>-6</sub>
PMT Cherenkov	16 <sup>+11</sup> <sub>-8</sub>
<b>Total Cherenkov background</b>	<b>45<sup>+18</sup><sub>-12</sub></b>

## Systematic errors.

Source	CC Uncert. (percent)	NC Uncert. (percent)	$\phi_{\mu\tau}$ Uncert. (percent)
Energy scale	-4.2,+4.3	-6.2,+6.1	-10.4,+10.3
Energy resolution	-0.9,+0.0	-0.0,+4.4	-0.0,+6.8
Energy non-linearity	$\pm$ 0.1	$\pm$ 0.4	$\pm$ 0.6
Vertex resolution	$\pm$ 0.0	$\pm$ 0.1	$\pm$ 0.2
Vertex accuracy	-2.8,+2.9	$\pm$ 1.8	$\pm$ 1.4
Angular resolution	-0.2,+0.2	-0.3,+0.3	-0.3,+0.3
Internal source pd	$\pm$ 0.0	-1.5,+1.6	-2.0,+2.2
External source pd	$\pm$ 0.1	-1.0,+1.0	$\pm$ 1.4
D <sub>2</sub> O Cherenkov	-0.1,+0.2	-2.6,+1.2	-3.7,+1.7
H <sub>2</sub> O Cherenkov	$\pm$ 0.0	-0.2,+0.4	-0.2,+0.6
AV Cherenkov	$\pm$ 0.0	-0.2,+0.2	-0.3,+0.3
PMT Cherenkov	$\pm$ 0.1	-2.1,+1.6	-3.0,+2.2
Neutron capture	$\pm$ 0.0	-4.0,+3.6	-5.8,+5.2
Cut acceptance	-0.2,+0.4	-0.2,+0.4	-0.2,+0.4
<b>Experimental uncertainty</b>	<b>-5.2,+5.2</b>	<b>-8.5,+9.1</b>	<b>-13.2,+14.1</b>
<b>Cross section [?]</b>	<b><math>\pm</math>1.8</b>	<b><math>\pm</math>1.3</b>	<b><math>\pm</math>1.4</b>



## Elastic Scattering

$263.6_{-25.6}^{+26.4}$  eventi

$$\phi_{ES}^{SNO} = 2.39_{-0.23}^{+0.24}(\text{stat.})_{-0.12}^{+0.12}(\text{syst.})$$

## Charged Currents

$1967.7_{-60.9}^{+61.9}$  eventi

$$\phi_{CC}^{SNO} = 1.76_{-0.05}^{+0.06}(\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst.})$$

## Neutral Currents

$576.5_{-48.9}^{+49.5}$  eventi

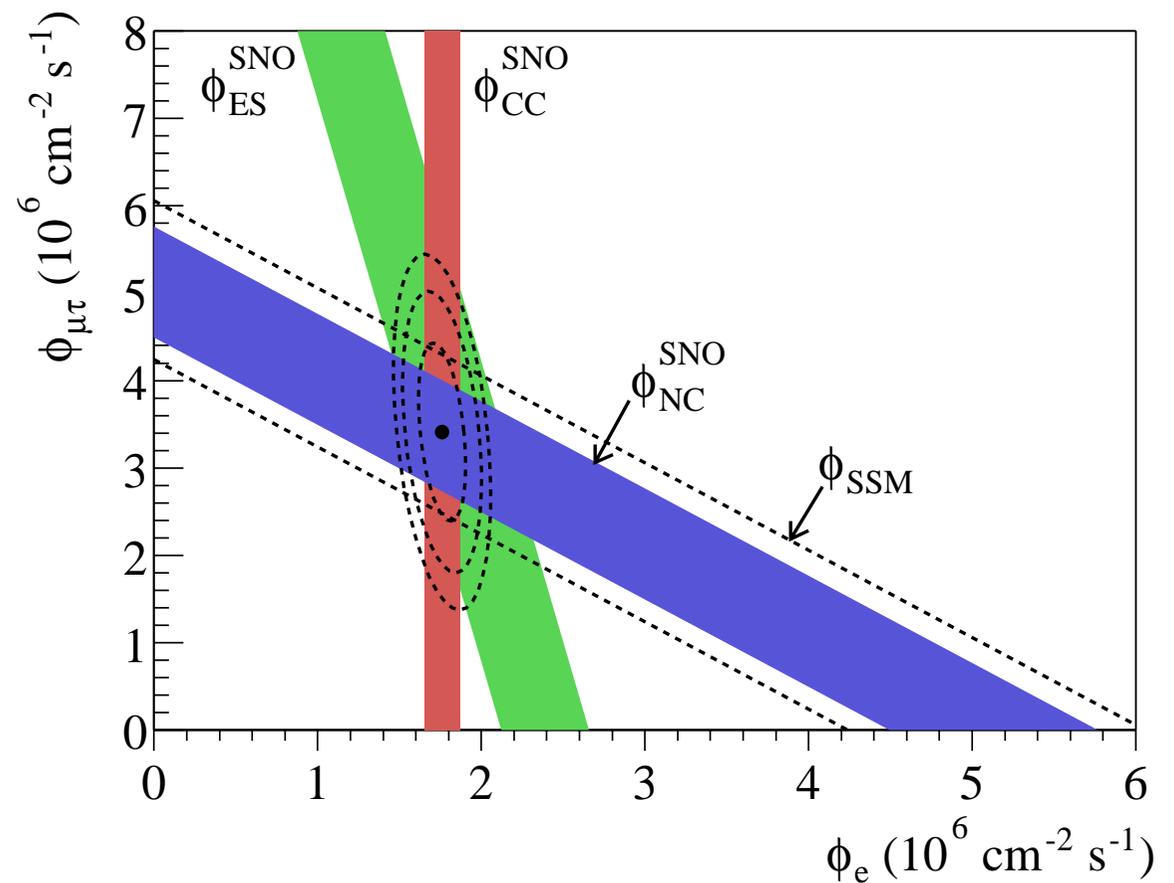
$$\phi_{NC}^{SNO} = 5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat.})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst.})$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.64}^{+0.66}: 5.3\sigma > 0$$

Combinando con SK:

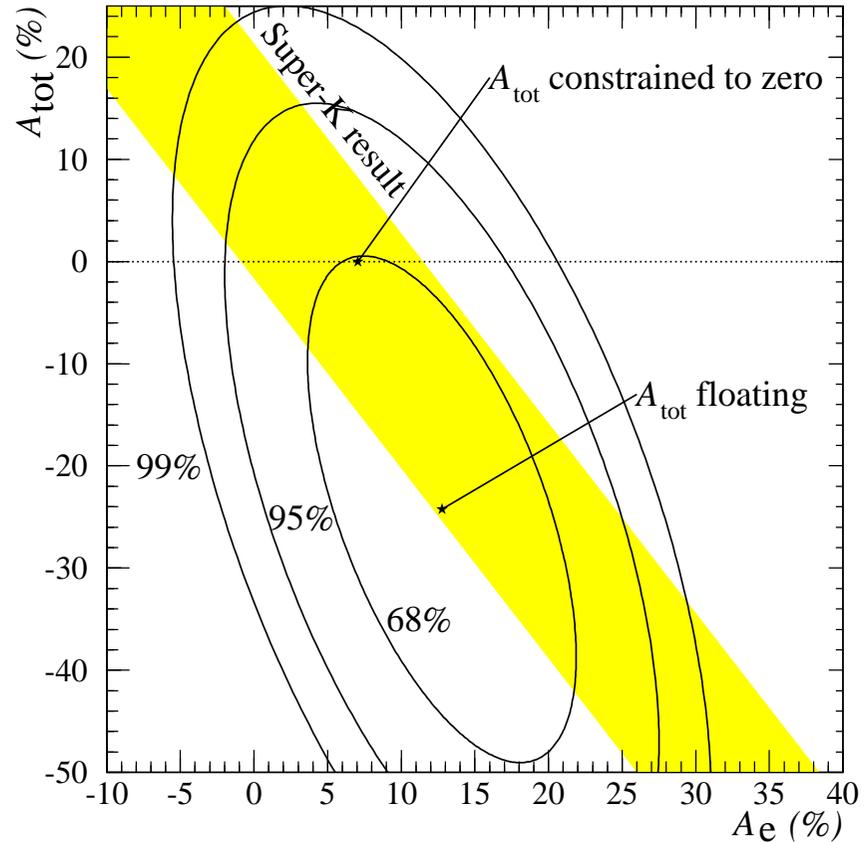
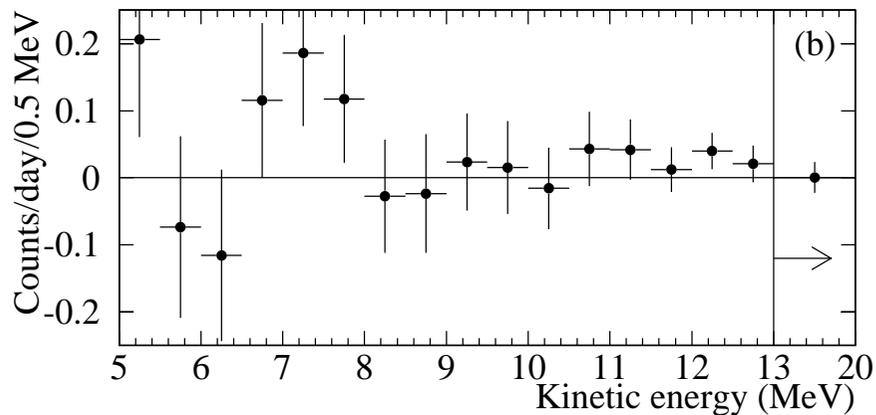
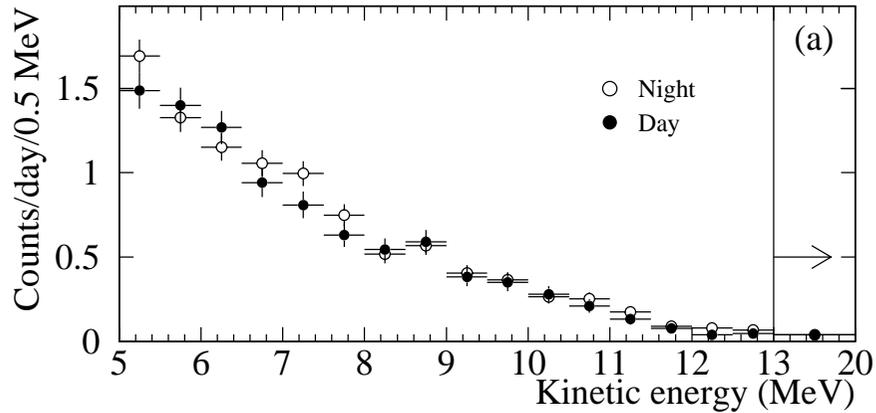
$$\phi_{\mu\tau} = 3.45_{-0.62}^{+0.65}: 5.5\sigma > 0$$

## Risultati di SNO

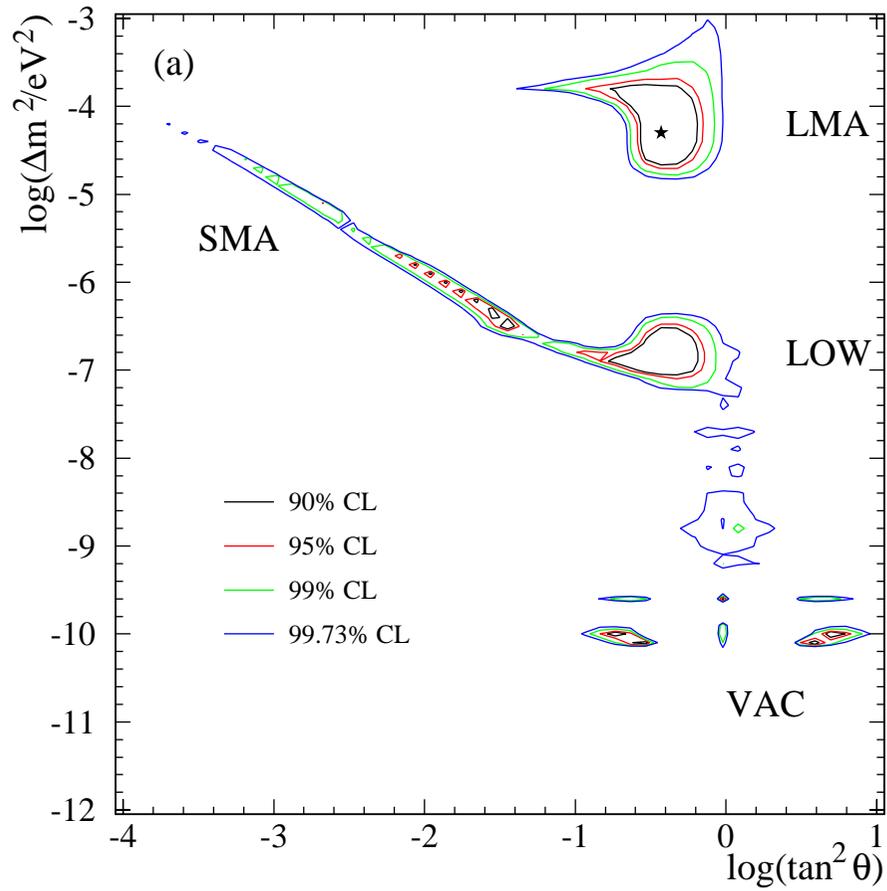


# DAY-NIGHT a SNO

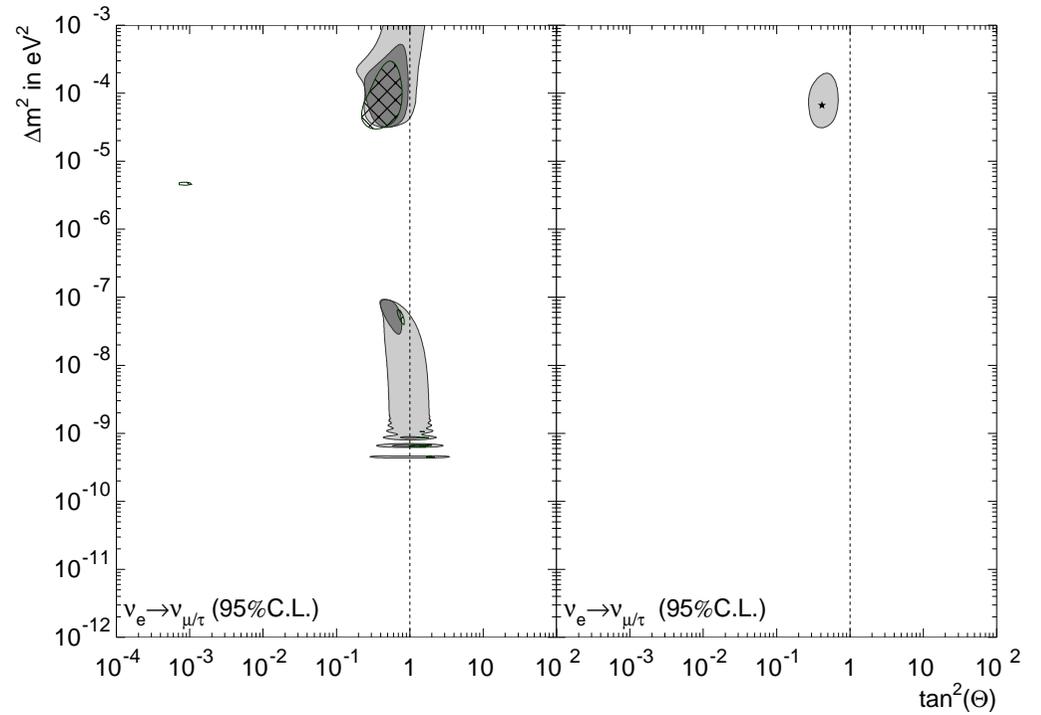
signal	Set 1		Set 2		Combined		$\mathcal{A}(\%)$
	$\phi_D$	$\phi_N$	$\phi_D$	$\phi_N$	$\phi_D$	$\phi_N$	
CC	$1.53 \pm 0.12$	$1.95 \pm 0.10$	$1.69 \pm 0.12$	$1.77 \pm 0.11$	$1.62 \pm 0.08 \pm 0.08$	$1.87 \pm 0.07 \pm 0.10$	$+14.0 \pm 6.3^{+1.5}_{-1.4}$
ES	$2.91 \pm 0.52$	$1.59 \pm 0.38$	$2.35 \pm 0.51$	$2.88 \pm 0.47$	$2.64 \pm 0.37 \pm 0.12$	$2.22 \pm 0.30 \pm 0.12$	$-17.4 \pm 19.5^{+2.4}_{-2.2}$
NC	$7.09 \pm 0.97$	$3.95 \pm 0.75$	$4.56 \pm 0.89$	$5.33 \pm 0.84$	$5.69 \pm 0.66 \pm 0.44$	$4.63 \pm 0.57 \pm 0.44$	$-20.4 \pm 16.9^{+2.4}_{-2.5}$



## SNO only

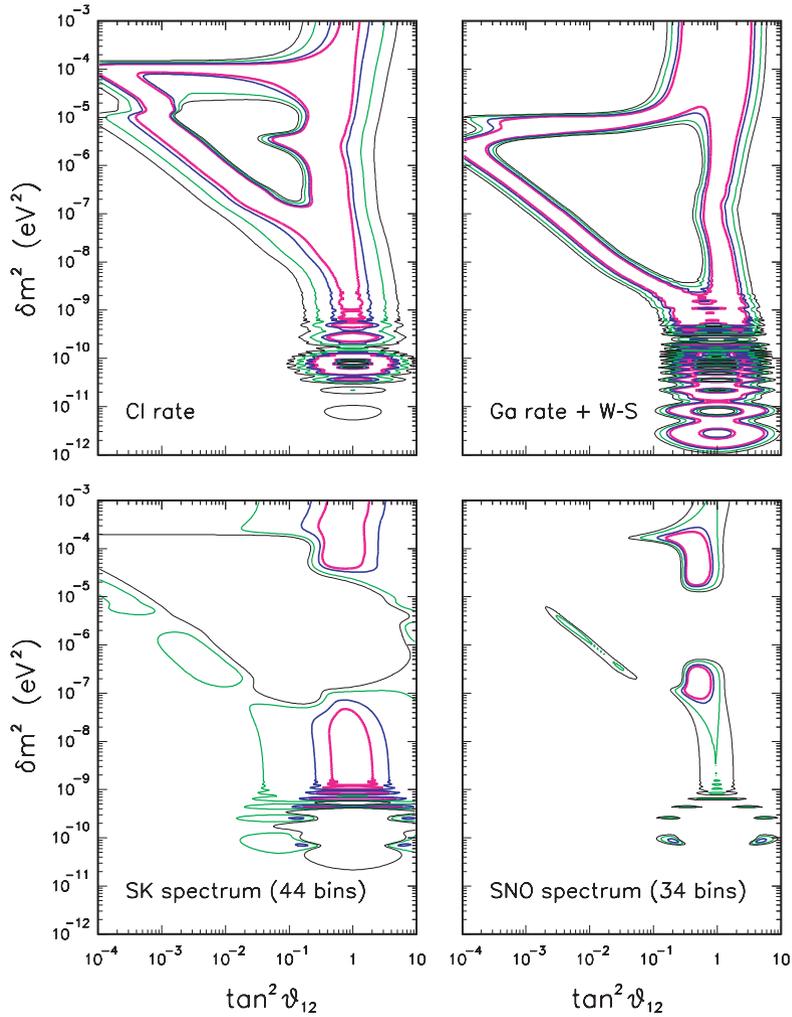


## SK only



# Solar neutrinos before KamLAND

$2\nu$  active oscillations



Four types of solar neutrino experiments:

- Chlorine (rate)
- Gallium (Ga rate + W-S effect)
- SK spectrum (44 bins)
- SNO spectrum (34 bins)

An interesting point:

High  $\delta m^2$  or, equivalently,  $\langle P_{ee} \rangle \sim 1/2$  not ruled out by any single experiment yet, although Cl and SNO disfavor this solution

# Solar problem: status before KamLAND

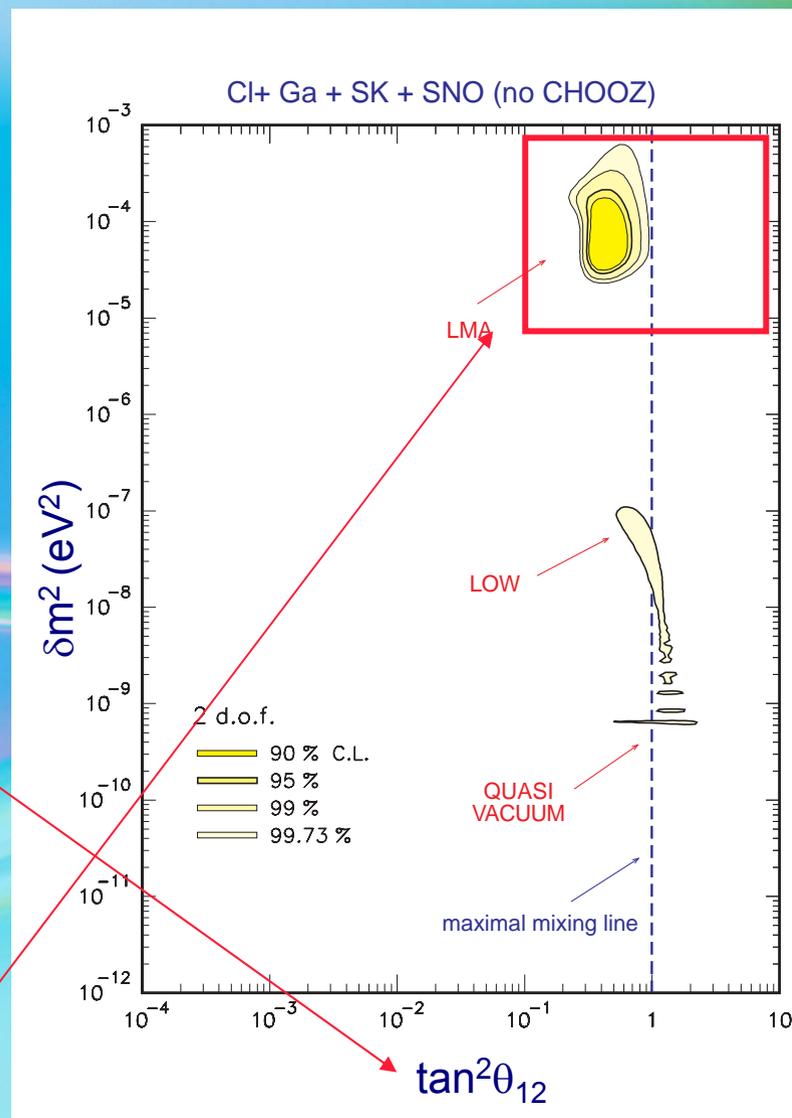
By combining the four solar experiments, only the large mixing angle solutions are seen to survive:

- LMA: preferred by data, below the maximal mixing line
- LOW: at lower  $\delta m^2$ , with a long tail in the quasi-vacuum region

Large mixing:  $\tan^2\theta_{12}$  (log)  $\longrightarrow$   $\sin^2\theta_{12}$  (linear)

Moreover, KamLAND selects only relatively high values of  $\delta m^2$

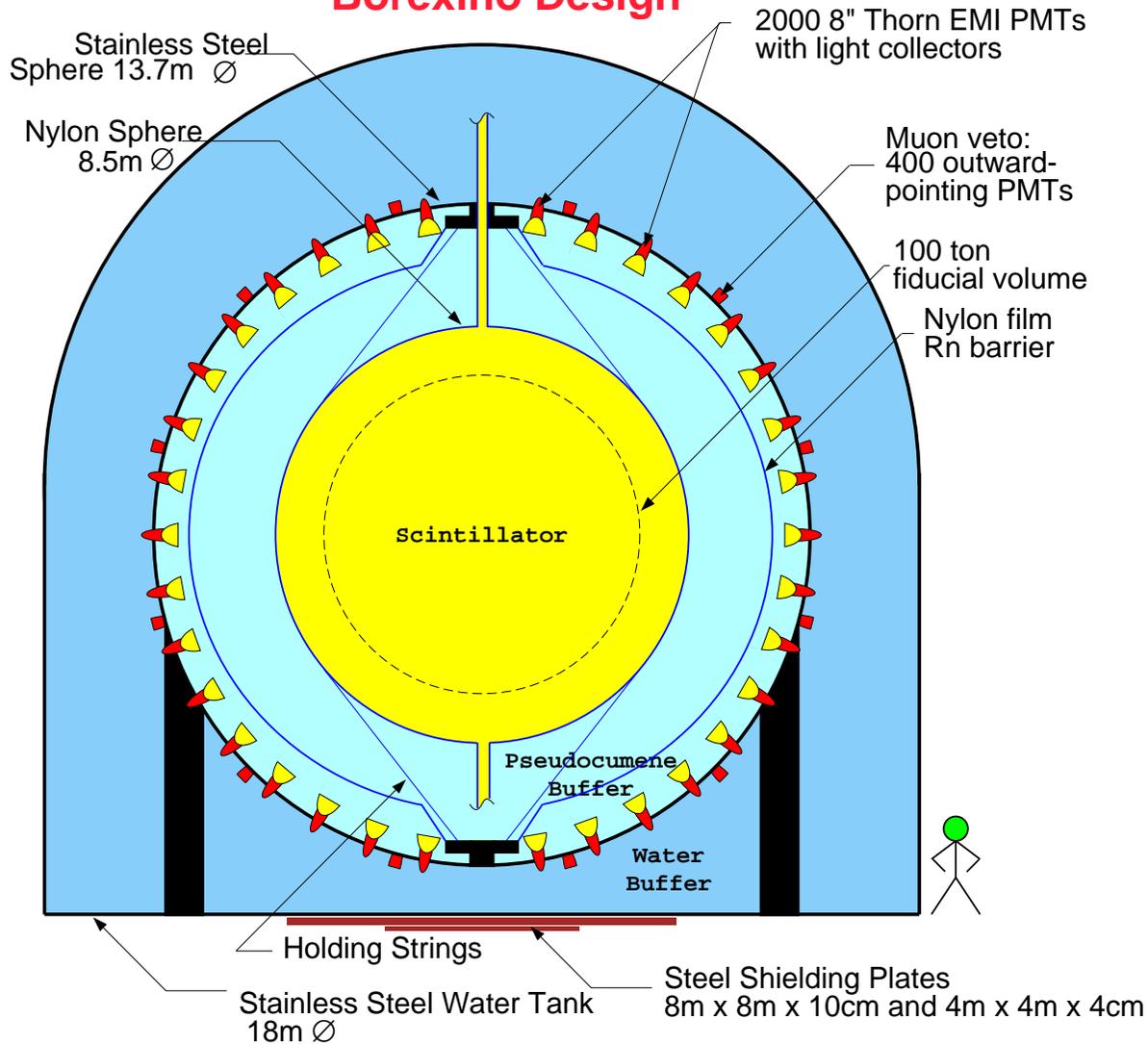
We are restricted to a very small region in the parameter space!



# Esperimento BOREX

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

## Borexino Design



300 ton di scintillatore liquido (fiduciale = 100 ton) a bassissima radioattivit .

Rivela lo scattering elastico  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$  con soglia a 250 keV  $\rightarrow$  rivela i neutrini del  ${}^7\text{Be}$  (linea a 863 keV, elettroni fino a 664 keV).

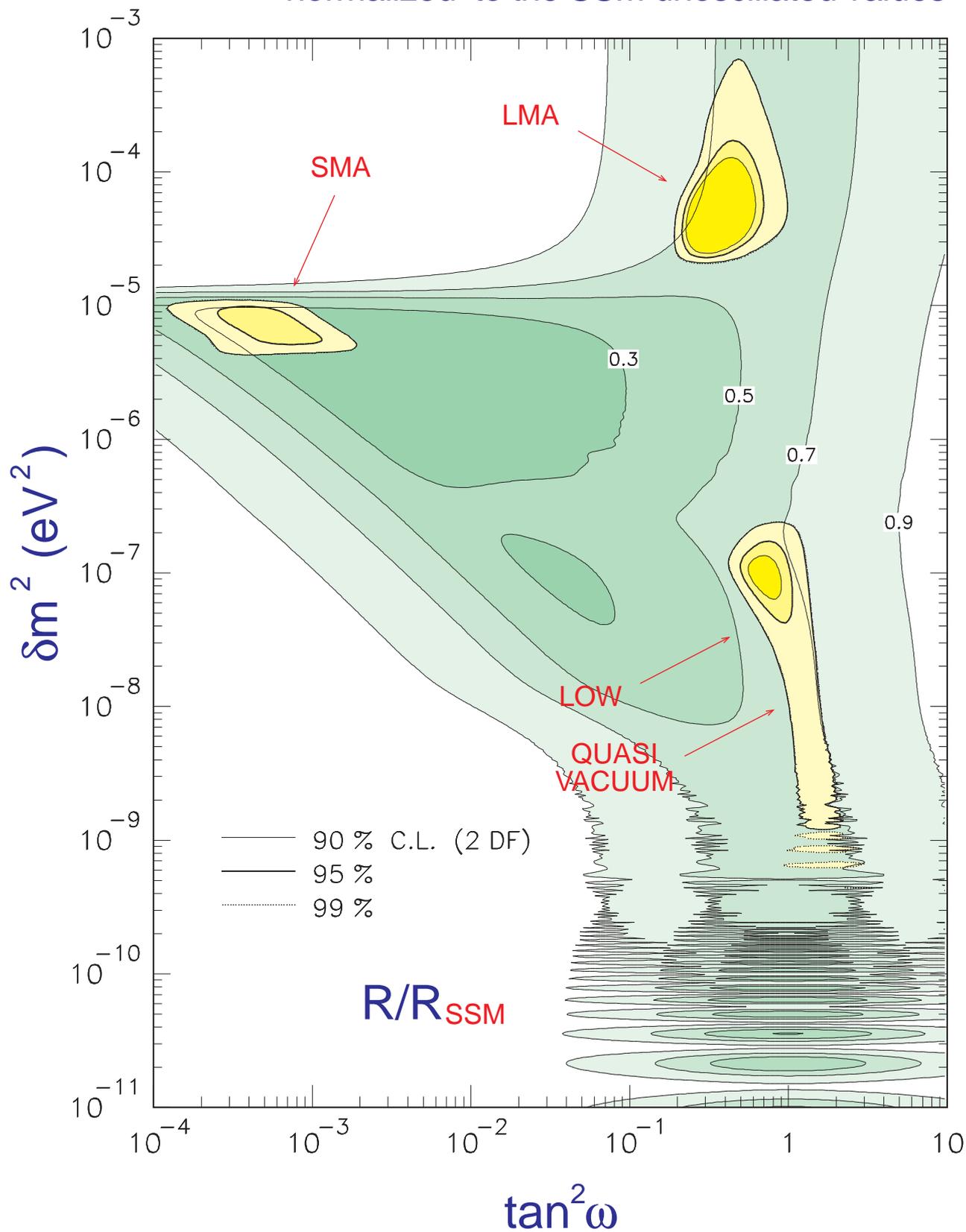
Attesi circa 46 ev/giorno secondo lo SSM.

- SMA  $\Rightarrow$  ~ completamente soppressi
- LMA  $\Rightarrow$  ~ soppressi a meta'
- V.O.  $\Rightarrow$  variazione stagionale

Inizio della presa dati previsto per il (?????)

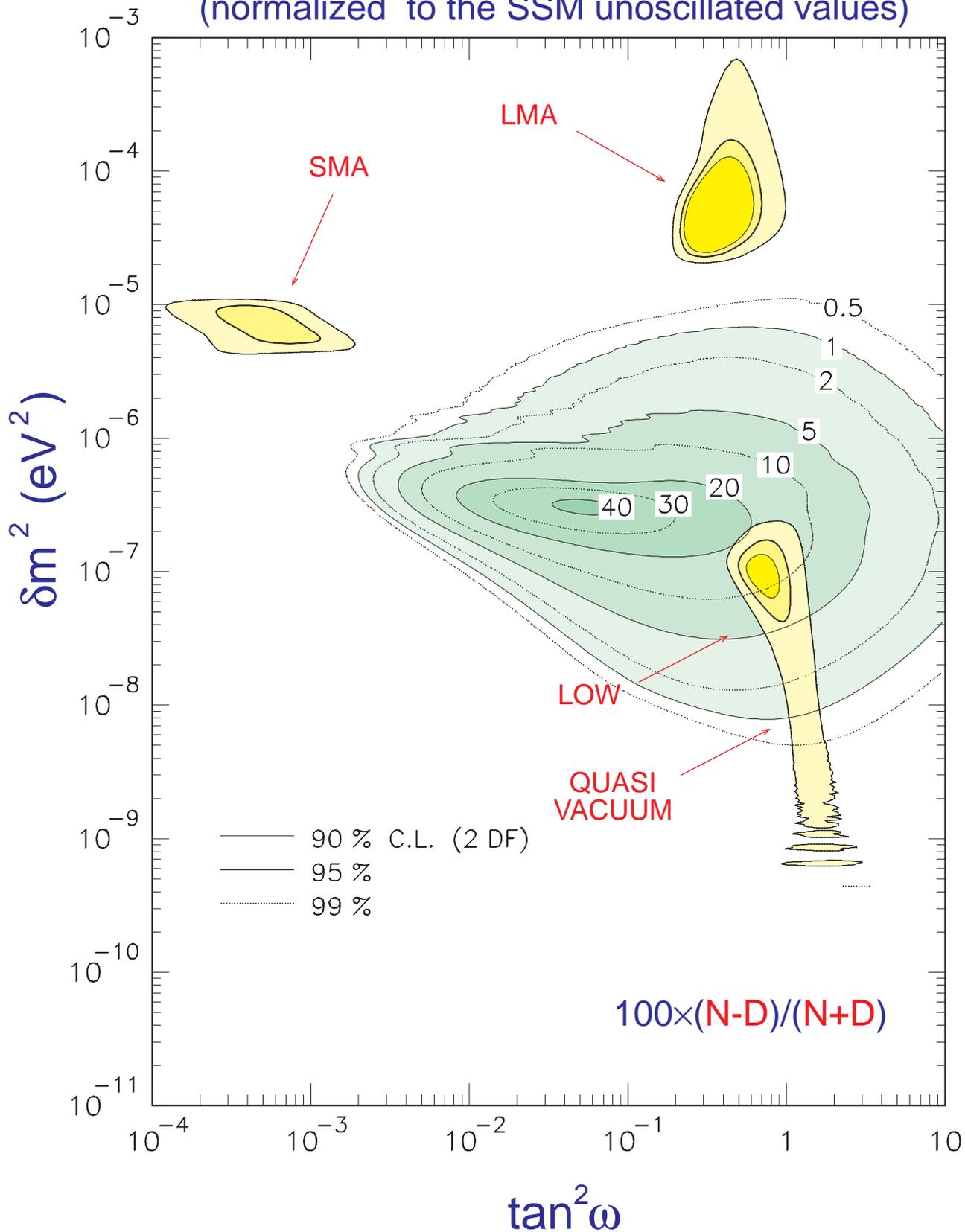
# Borexino total rates compared with the SMA, LMA and LOW solutions

yearly-averaged total rates (N+D)  
normalized to the SSM unoscillated values



# Borexino N-D asymmetry compared with the SMA, LMA and LOW solutions

yearly-averaged nighttime and daytime rates  
(normalized to the SSM unoscillated values)



# Borexino discovery potential compared with the SMA, LMA and LOW solutions

