

Risultati recenti e prospettive future dell'Esperimento Borexino



Nicola Rossi

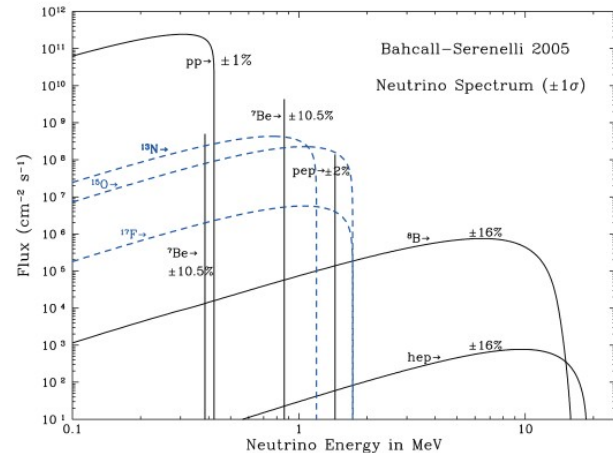
Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN)

Università degli Studi dell'Aquila

IFAE 2013

Cagliari, 3-5 Aprile 2013

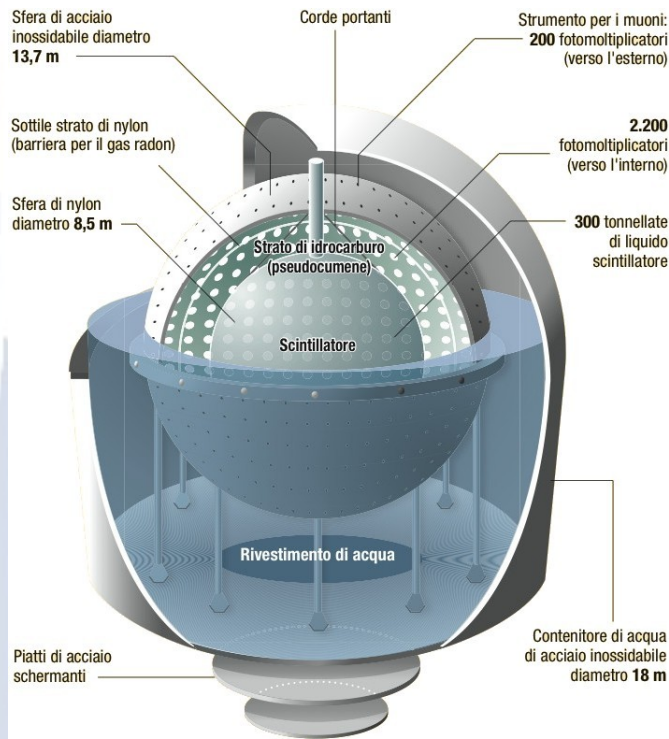
la fisica dei neutrini



BOREXINO FASE I

- Negli ultimi 40 anni gli esperimenti hanno mostrato che i neutrini solari ν_e subiscono una transizione di sapore ben descritta dal **modello MSW-LMA** (in accordo con anti- ν_e da reattore)
- **MSW predice una transizione per P_{ee} nella regione 1-4 MeV da vuoto con effetto di materia** (scarsamente testata)
- Studiare i neutrini solari: testare a fondo il modello proposto MSW-LMA o altri scenari, comprendere il **problema della metallicità**.
- Geoneutrini & Geofisica
- Neutrini Sterili, NSI, Astrofisica
- Misura di precisione del **flusso del ⁷Be** (rinculi elettronici) (5%) – assenza di asimmetria giorno notte (1.4%)
- **Misura del ⁸B** (soglia a 3 MeV)
- Prima misurare dei **neutrini pep**
- **Limite** più forte sui neutrini **CNO**
- Misura di **geoneutrini**
- **Limiti sulle transizioni proibite:** principio di esclusione di Pauli, ricerca di **assioni** da 5.5 MeV nella reazione $p(d, ^3\text{He})A$, velocità del neutrino
- **Cosmogenici**

L'esperimento BOREXINO



Istallato presso i **Laboratori Nazionali del Gran Sasso** (3800m we)

Primo esperimento di grande volume in **tempo reale** per la misura dei neutrini solari nella regione di energia **sotto il MeV**

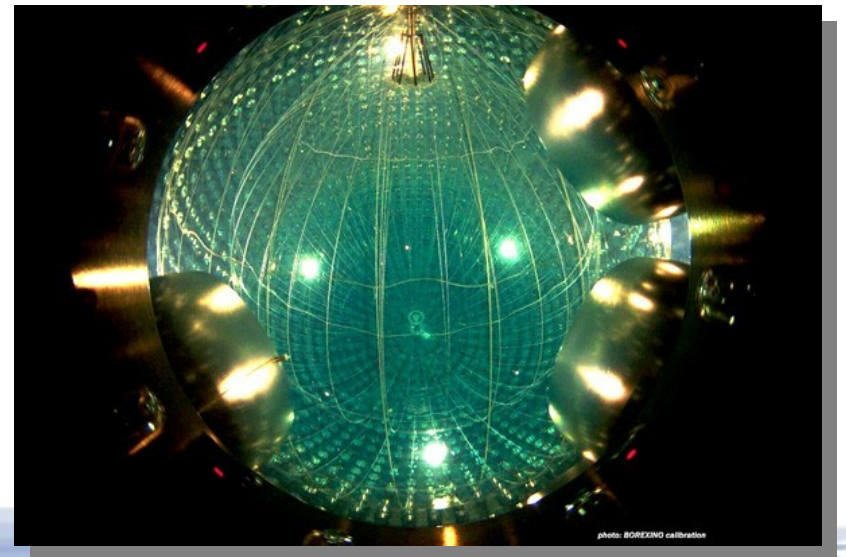
PC 124-trimetilbenzene + PPO difeniloxazolo (1.5 g/l) in pallone di nylon (125 μ m, R = 4.25 m)+2214 PMT's

Intercapedine (1000 ton con DMP (5 g/l) dimetilftalato, 13.7 m immerso in acqua ultra pura (2000 ton, veto per muoni 200 PMT))

Presi dati da maggio 2007

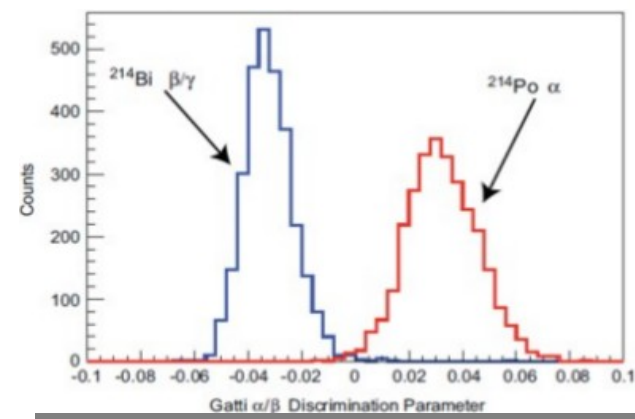
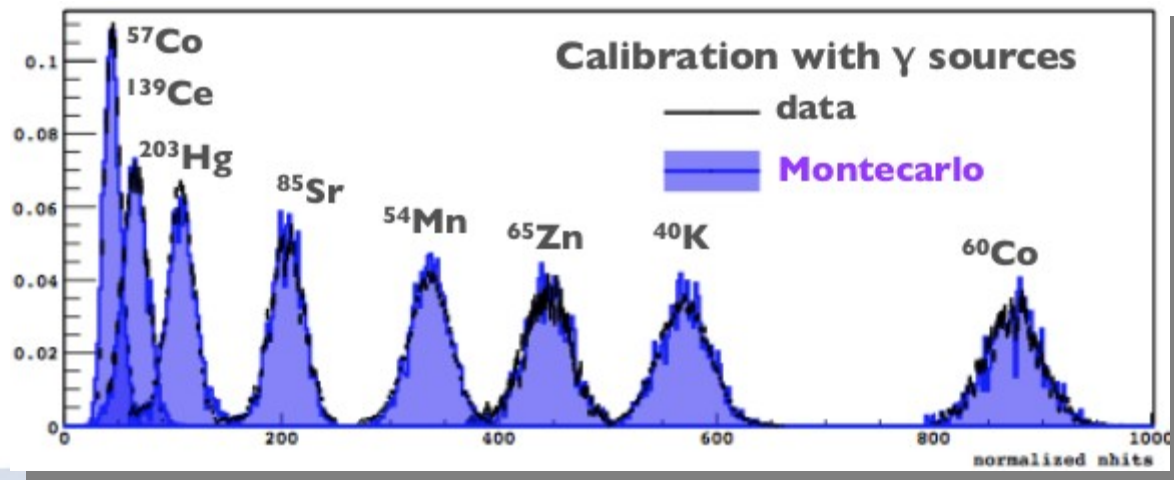
v-e: **diffusione elastica** su elettroni di circa 280 tonnellate di liquido scintillatore ultrapuro (no direzionalità, alta resa in luce 500 p.e./MeV)

Anti-v: decadimento **beta inverso**.



Caratteristiche

- Purificazione: Distillazione + Filtraggio + Water Extraction + vacuum stripping (N₂)
- Equilibrio secolare + coincidenza Bi-Po: $^{238}\text{U} = (1.6 \pm 0.1) \times 10^{-17} \text{ g/g}$, $^{232}\text{Th} = (6.8 \pm 1.5) \times 10^{-18} \text{ g/g}$ (9/10 ordini di grandezza di radiopurezza dei comuni materiali)
- ^{210}Bi e ^{210}Po fuori equilibrio, ^{85}Kr presente nell'aria sotto controllo per la misura del ^7Be
- Sistematiche ridotte tramite le campagne di calibrazioni per α β γ e neutroni nel volume dello scintillatore + Monte Carlo + Studio analitico della funzione di risposta del rivelatore

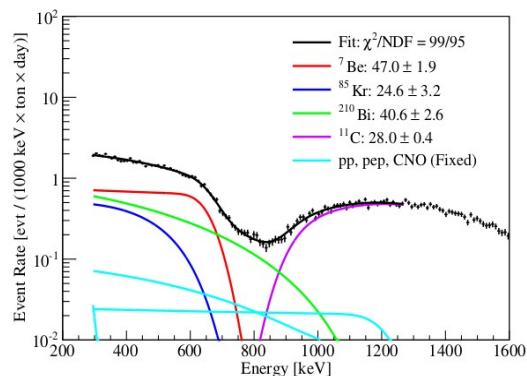
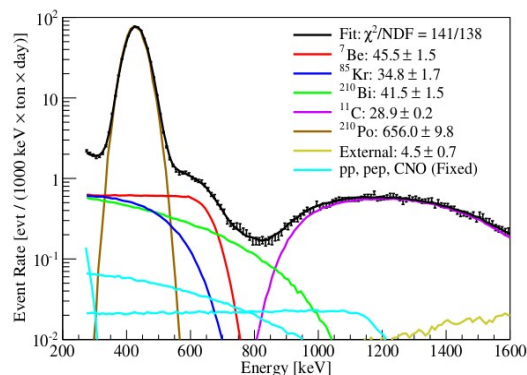


Discriminazione di
forma d'impulso

Neutrini del ^7Be

Source	[%]
Trigger efficiency and stability	<0.1
Live time	0.04
Scintillator density	0.05
Sacrifice of cuts	0.1
Fiducial volume	+0.5 -1.3
Fit methods	2.0
Energy response	2.7
Total Systematic Error	+3.4 -3.6

Dati filtrati



Esposizione 740 gg.

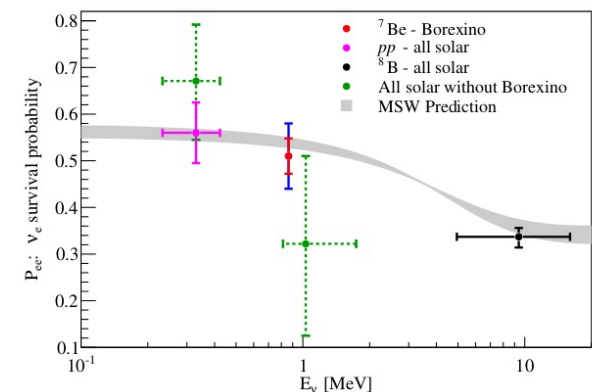
^7Be	$46.0 \pm 1.5(\text{stat})^{+1.5}_{-1.6}(\text{syst})$
^{85}Kr	$31.2 \pm 1.7(\text{stat}) \pm 4.7(\text{syst})$
^{210}Bi	$41.0 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 2.3(\text{syst})$
^{11}C	$28.5 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})$

Scattering elastico neutrino-elettrone (spalla a 665 keV) dai neutrini solari da 862 keV del ^7Be : $46.0 \pm 1.5(\text{stat})^{+1.5}_{-1.6}(\text{syst})$ counts/(day·100 ton), flusso $4.84 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Fondi ^{210}Po (440 keV) + ^{210}Bi + ^{85}Kr + ^{11}C (>800 keV) liberi

pp , pep , CNO, ^8B fissi al SSM+MSW+LMA

2 metodi per la risposta energetica = MC & risposta analitica

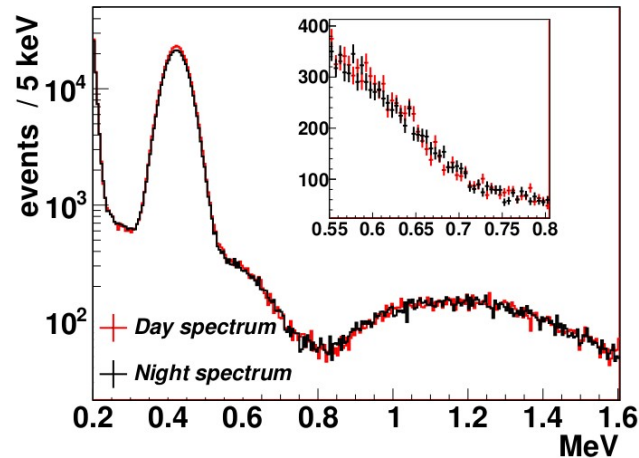


Probabilità di sopravvivenza $P_{ee} = 0.51 \pm 0.07$ a 862 keV
Ipotesi di non oscillazione esclusa a 5σ

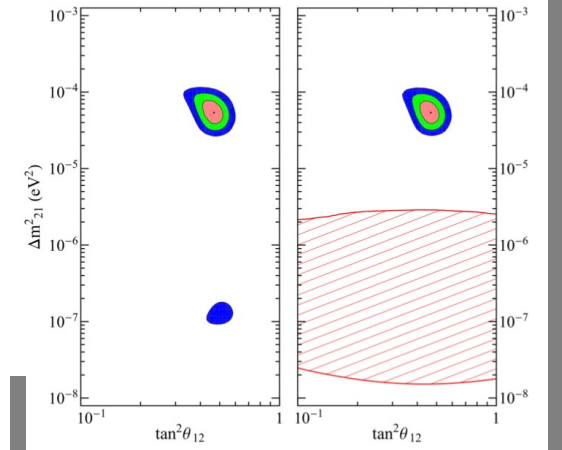
Asimmetria giorno/notte

Asimmetria misurata in accordo con
MSW-LMA $A_{g/n} = 0.001 \pm 0.012$ (stat) ± 0.007 (syst)
Consistente con "0".

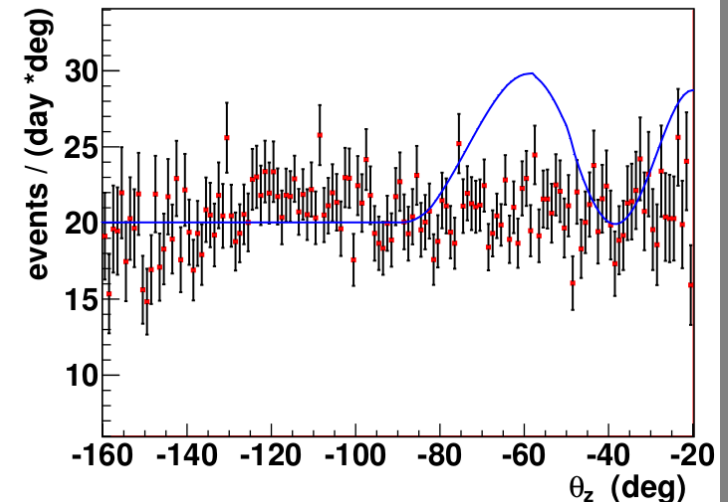
$$A_{g/n} = R_{\text{diff}} / \langle R \rangle$$



Source of error	Error on A_{dn}
Live-time	$< 5 \cdot 10^{-4}$
Cut efficiencies	0.001
Variation of ^{210}Bi with time	± 0.005
Fit procedure	± 0.005
Total systematic error	0.007



Il risultato per l'oscillazione MSW
con parametri di mescolamento
nella regione LOW è esclusa a più di 8.5σ
Effetto di materia con rigenerazione di ν_e .

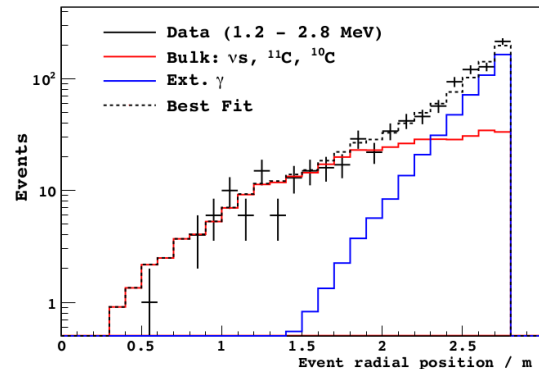
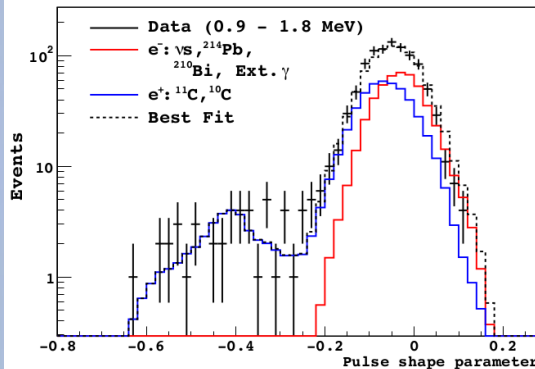


Neutrini pep e CNO

Pep Ve 1.44 MeV Test per la transizione MSW-LMA (incertezza 1.2 % vincoli di luminosità.). CNO varia a 40% (alta metallicità vs bassa).

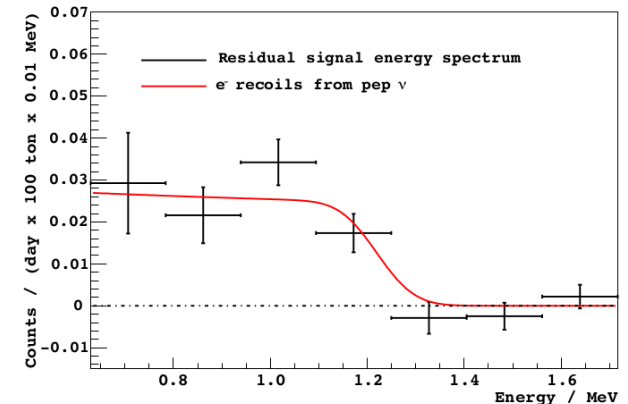
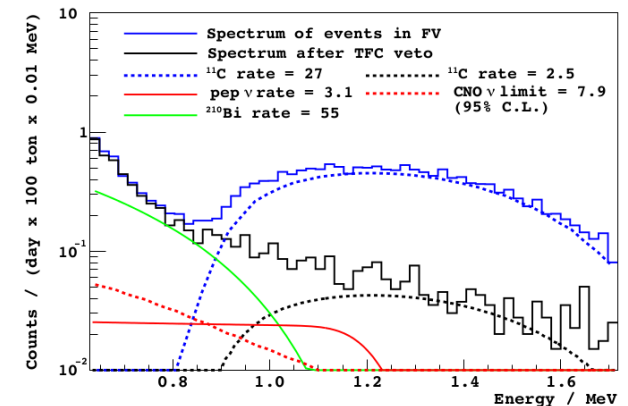
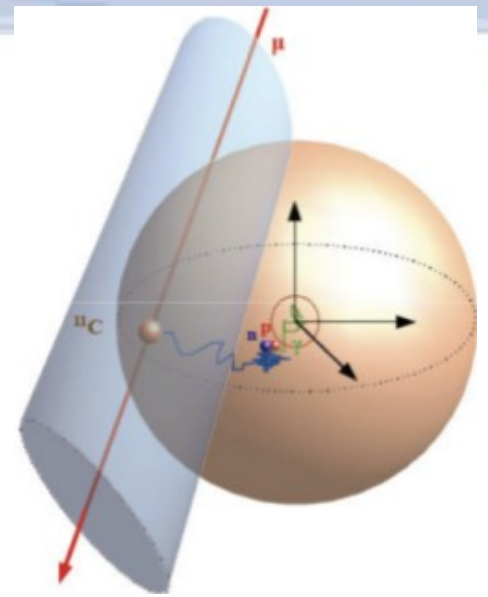
Flusso 10 volte + debole del ${}^7\text{Be}$, fondo del ${}^{11}\text{C}$ (β^+ , 29.4 min) (cattura n = 260 us, ${}^{11}\text{C}11 \rightarrow {}^{11}\text{B} + (e^+) + \nu_e = \sim 30 \text{ min}$)

${}^{11}\text{C}$ ridotto con la coincidenza triplice spazio-temporale: muone+n+beta (95% dei casi) + forma dell'impulso Beta+/- per il residuo (albero di decisione). Analisi multivariata)



Interazione di neutrini pep ($3.1 \pm 0.6 \text{ stat} \pm 0.3 \text{ syst}$ counts/(day·100 ton))

Limite sul flusso di neutrini solari del ciclo CNO $< 7.9 \text{ counts/(day·100 ton)}$ (95% C.L.).



Misura del neutrino del B8

Scattering elastico ν -e dai neutrini del ^8B con soglia pari a 3 MeV.

Rate: 0.217 ± 0.038 (stat) ± 0.008 (syst) cpd/100t

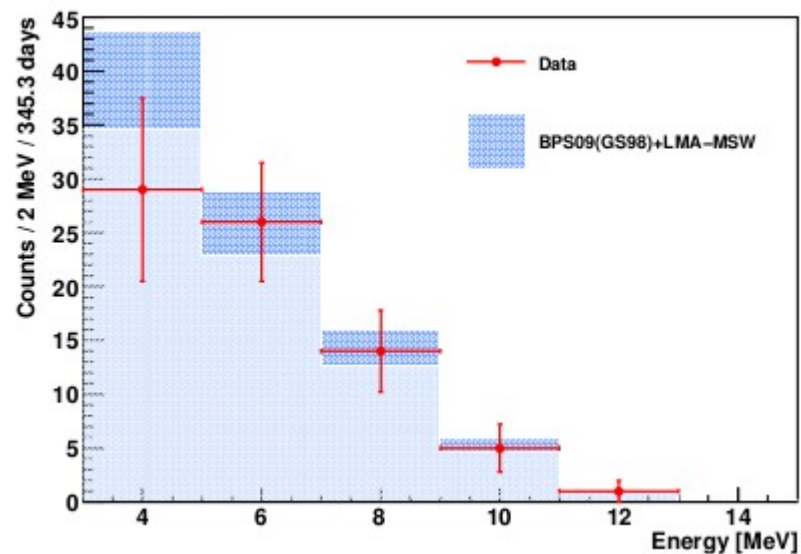
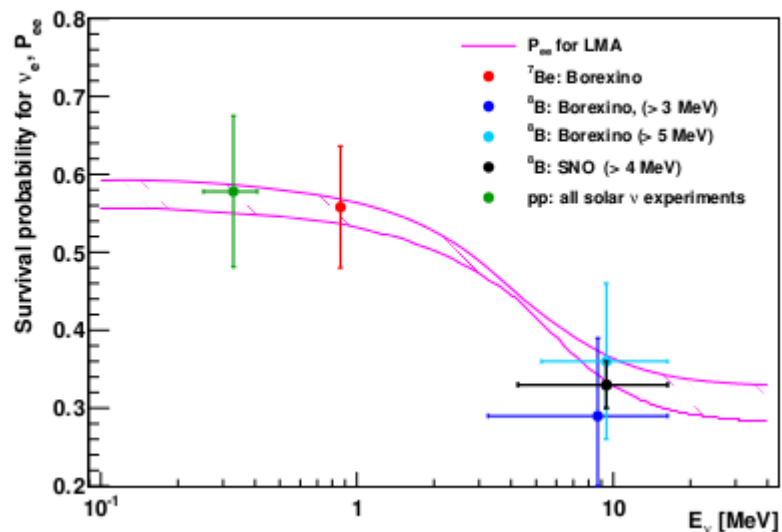
Flusso $\sim 2.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

In accordo con le misure di SNO e SuperK

Hyp: high metallicity $\rightarrow P(>3\text{MeV}) = 0.29 \pm 0.10$

Consistente con la soluzione MSW-LMA

che prevede la transizione tra i regimi di vuoto (bass energia) e materia (alta energia.)



Segnale dopo la sottrazione del fondo (rosso) confrontato con il MC del Modello Solare Standard con LMA-MSW

Sonda per NSI

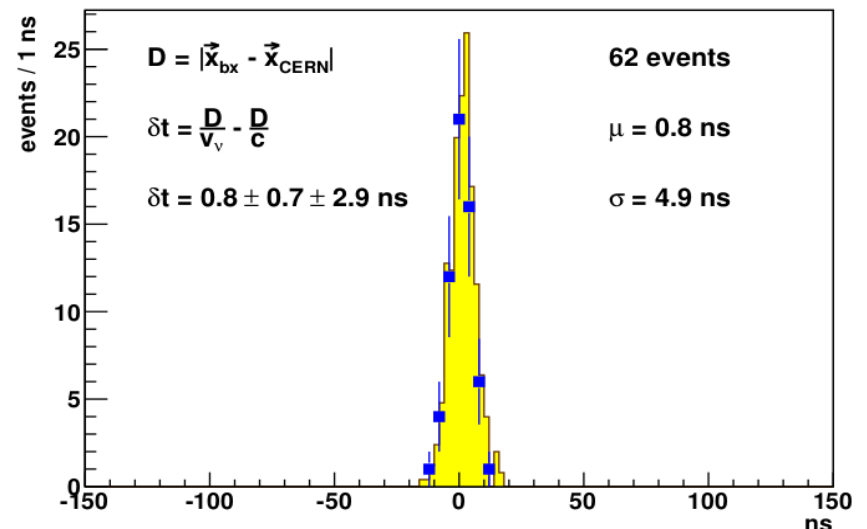
Velocità del neutrino

$$\delta t = 0.8 \pm 0.7 \text{ stat} \pm 2.9 \text{ sys, ben consistente con zero}$$

Studio effettuato sui muoni orizzontali sincronizzati (prodotti nella roccia) e spaziotemporalmente con il fascio di neutrini del CERN

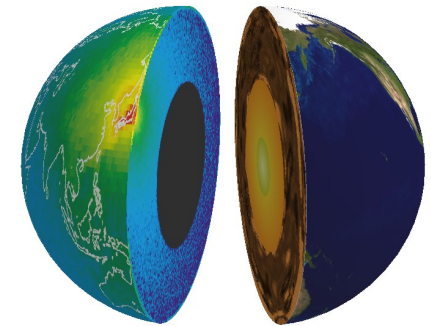
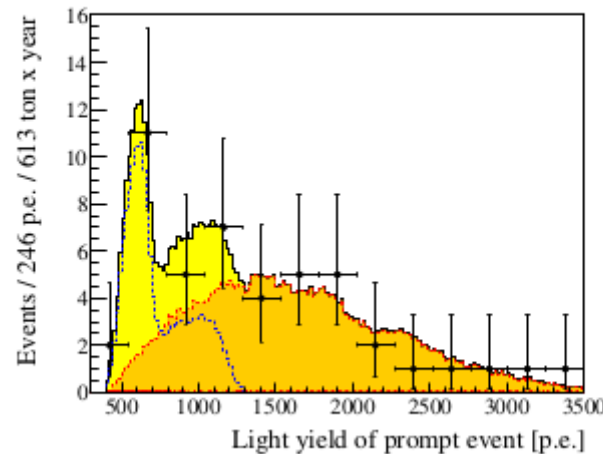
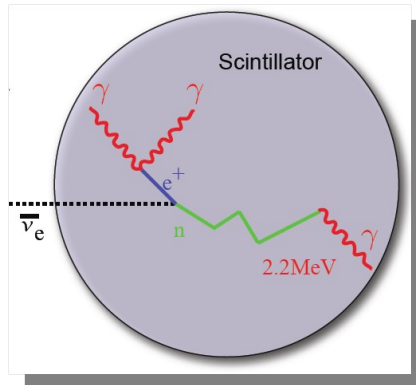
Nuovo sistema GSP con sensibilità migliorata al $\sim \text{ns}$

Description	Error (ns)
Time-Link Calibration (GPS)	1.1
Borexino electronics delays	0.5
Delays at CERN	2.2
Light propagation in BX detector	1.0
Electronics resolution	0.5
Event selection stability	1.0
Geodesy measurement	0.1
Total systematic error	2.9



Beta inverso:
Prompt (e+) &
delayed (n-cattura)

Geoneutrini



Nuova misura dopo circa 1353 giorni di esposizione.

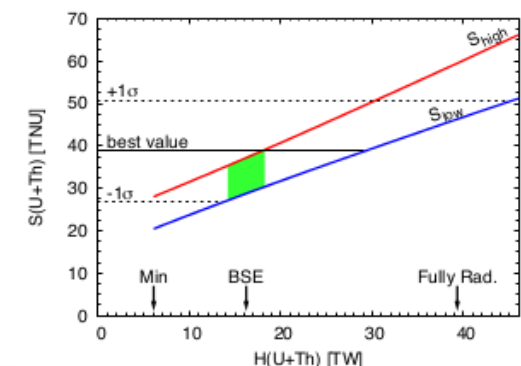
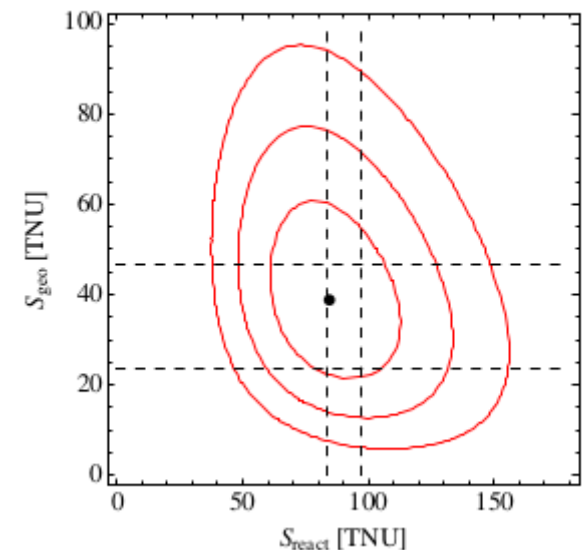
Geoneutrini: **14.3 +/- 4.4** (assumendo il rapporto contritico **Th/U = 3.9**) (Compatibile con segnale da mantello)
... corrispondente ad un segnale di geoneutrino 38.8 +/- 12.0 TNU

Reattori: 84.5 (+19.3) (-18.9) TNU.

U e Th liberi:

Th = 10.6 +/- 12.7 and U = 26.5 +/- 19.5

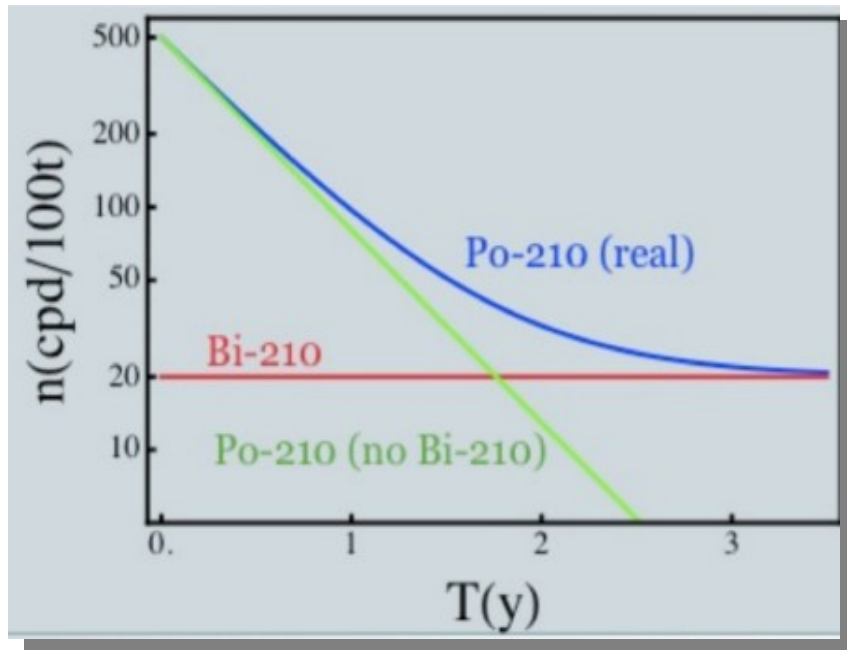
Possibilità di discriminazione tra i modelli geologici



Borexino Fase II

- Livelli di contaminazione record per i fondi:
 ^{210}Po , ^{210}Bi , ^{85}Kr
- Migliore precisione della misura dei neutrini solari (fondi bassi e nuova statistica aggiunta): ^7Be , ^8B , pep e Geoneutrini (in corso).
- Nuove frontiere: pp, CNO
- Neutrini Sterili & NSI: Sorgente esterna
- Osservatorio per neutrini da supernova

Purificazione: Water Extraction



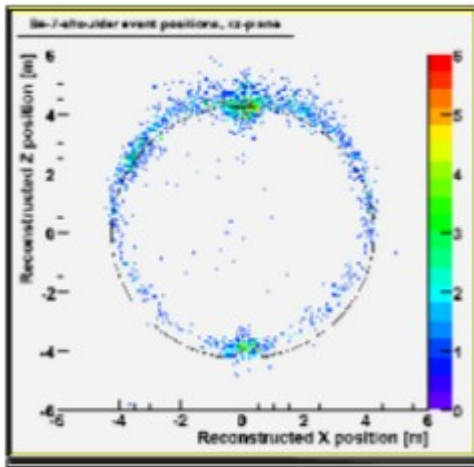
Dopo 6 cicli il livello dei fondi è migliorato in molte situazioni (fuori equilibrio) (2010-2011):

Bi210 → da ~80 a 20 cpd/100 ton

Kr85 → da ~30 a <5 cpd/100 ton

Il Po210 Sta raggiungendo dei livelli bassissimi (< 400 cpd/day) e si avvicina all'**equilibrio secolare** con il Bi210, utile per porre un vincolo esterno sul Bi210 per la misura del CNO

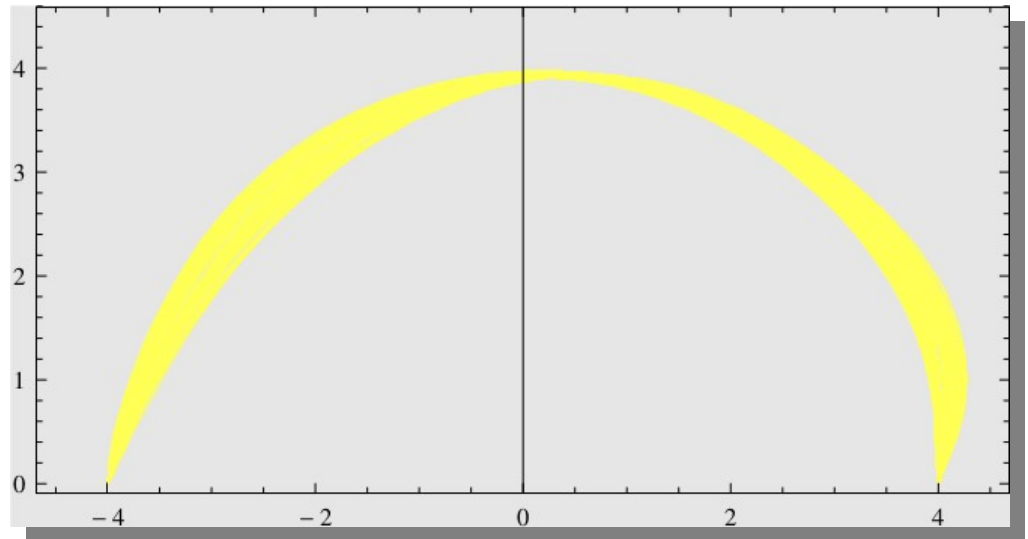
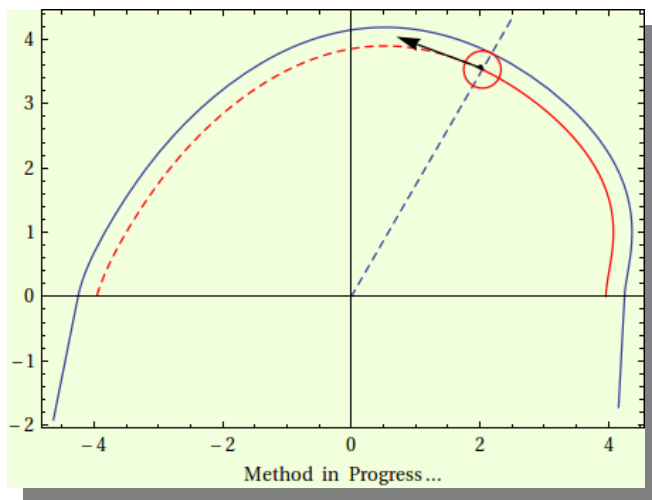
Volume Fiduciale Dinamico



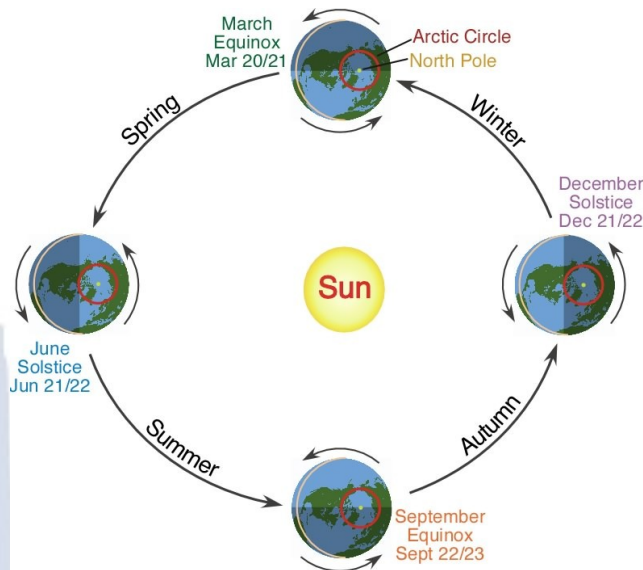
Fit bidimensionale degli eventi di fondo presenti sul vessel di nylon

Definizione del **volume fiduciale dinamico**.

Ridurre sistematici sulla fiducializzazione e **recuperare** esposizione avvicinandosi al profilo effettivo del nylon.



Modulazione Stagionale del Be7



Lomb-Scargle

Invarianza temporale
Minimi Quadrati

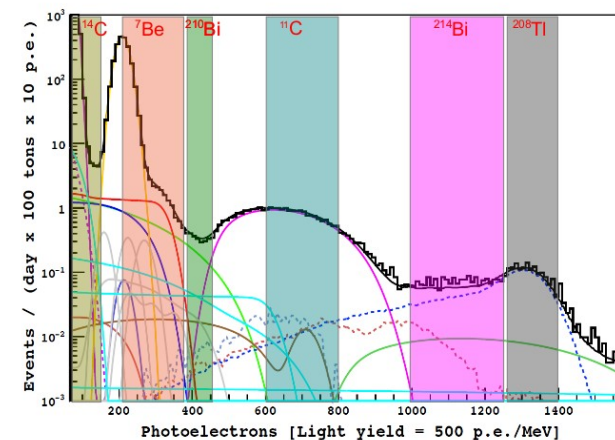
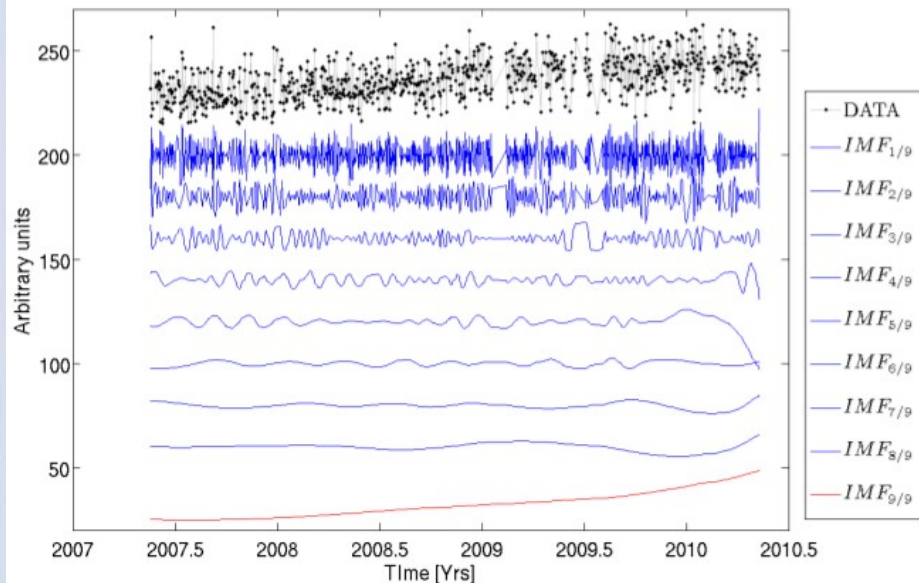
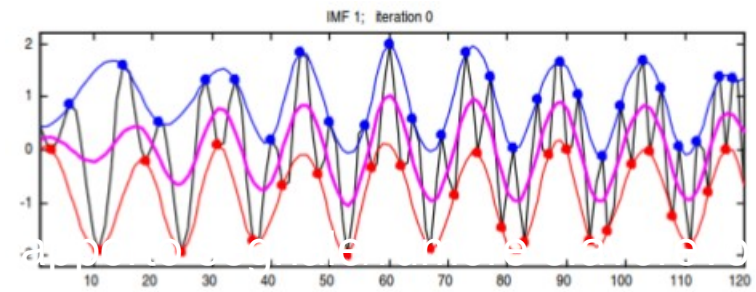
$$P_x(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{\left[\sum_j X_j \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_j X_j \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right)$$

Decomposizione in Modi Empirici

(Huang – Rilling)

EMD

TIME ANALYSIS



Regioni per le EMD

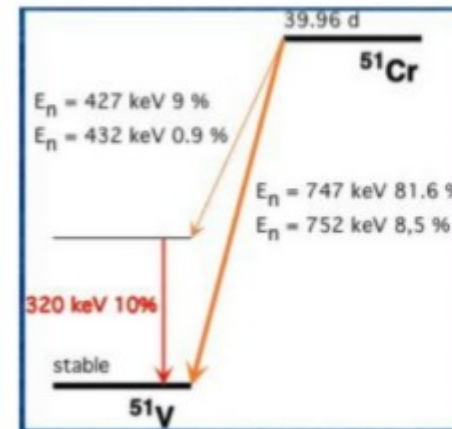
Sorgente per gli Sterili: SOX

Anomalie sperimentali suggeriscono l'esistenza di oscillazioni in neutrino **sterile** rivelabili a ($\text{dm}^2 \sim 1 \text{ eV}$, $E \sim 1 \text{ MeV}$ e $d \sim 1 \text{ m}$)

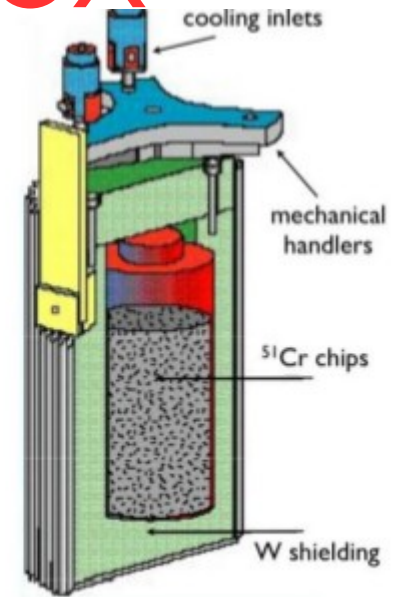
Possibilità:

1. **Sorgente Cr51** (36 Kg, Gallex):
Da attivare a $\sim 10 \text{ MCi}$ (solo esterno)
2. **Sorgente Ce144-Pr144** 50 kCi
(anche interno)

Sterili, NSI, sezione d'urto v-e

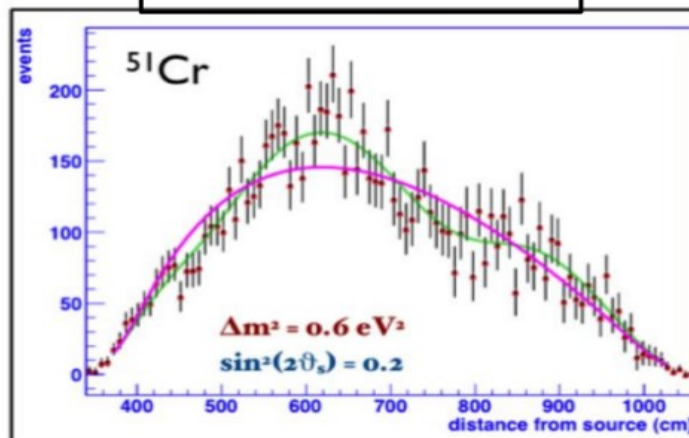


(a)

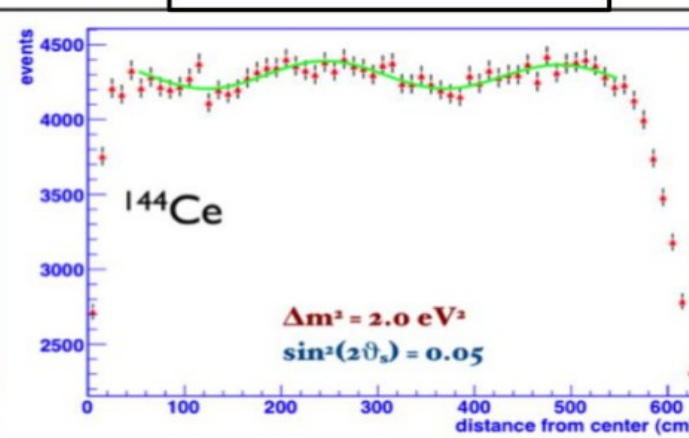


(b)

Source outside BX



Source inside BX



Conclusioni

- Borexino ha dato risultati importanti per quanto riguarda la **fisica del sole** sondando quasi tutto lo spettro nella regione **sub-MeV**
- Borexino **Fase II** presenta delle caratteristiche uniche per poter completare lo studio dei solari (più precisione per pep e Be7). Sfida: pp e CNO.
- **SOX** Sorgente esterna per la misura degli sterili (**2015**)