

# Rivelazione in tempo reale di neutrini solari con Borexino

IFAE 2016

Incontri di Fisica delle Alte Energie  
Genova, 30 Marzo - 1 Aprile 2016

S. Marcocci  
per la Collaborazione Borexino

Gran Sasso Science Institute  
L'Aquila





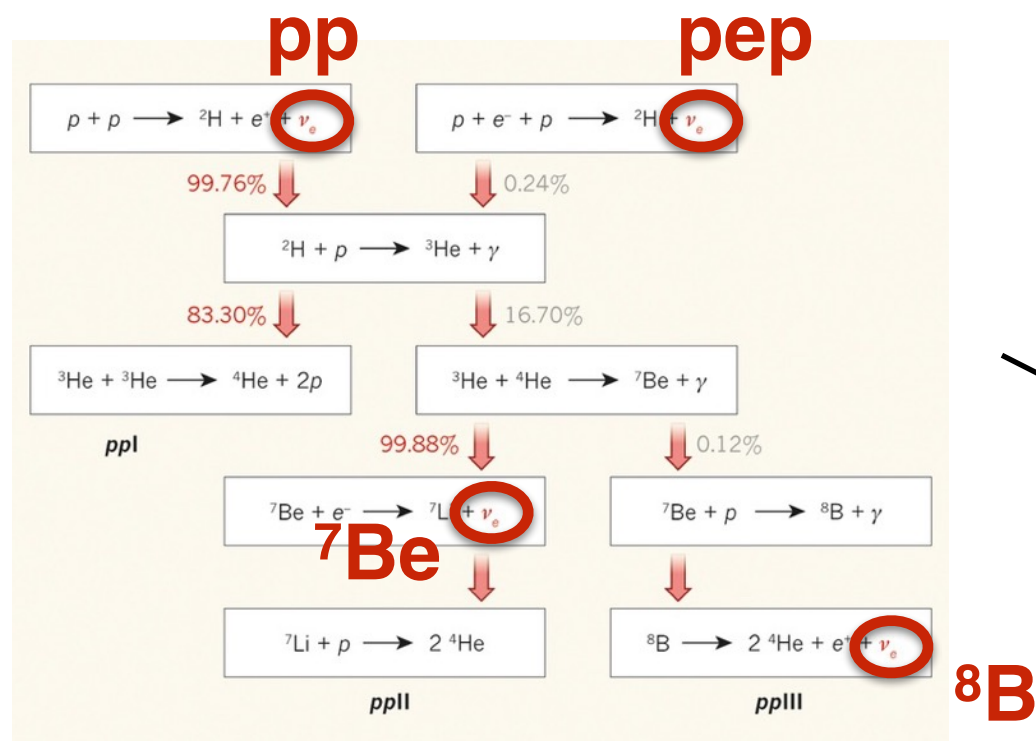
# Sommario

- Perché rivelare neutrini solari?
- Le sfide di Borexino
- Risultati di Borexino - fase 1
- What next?

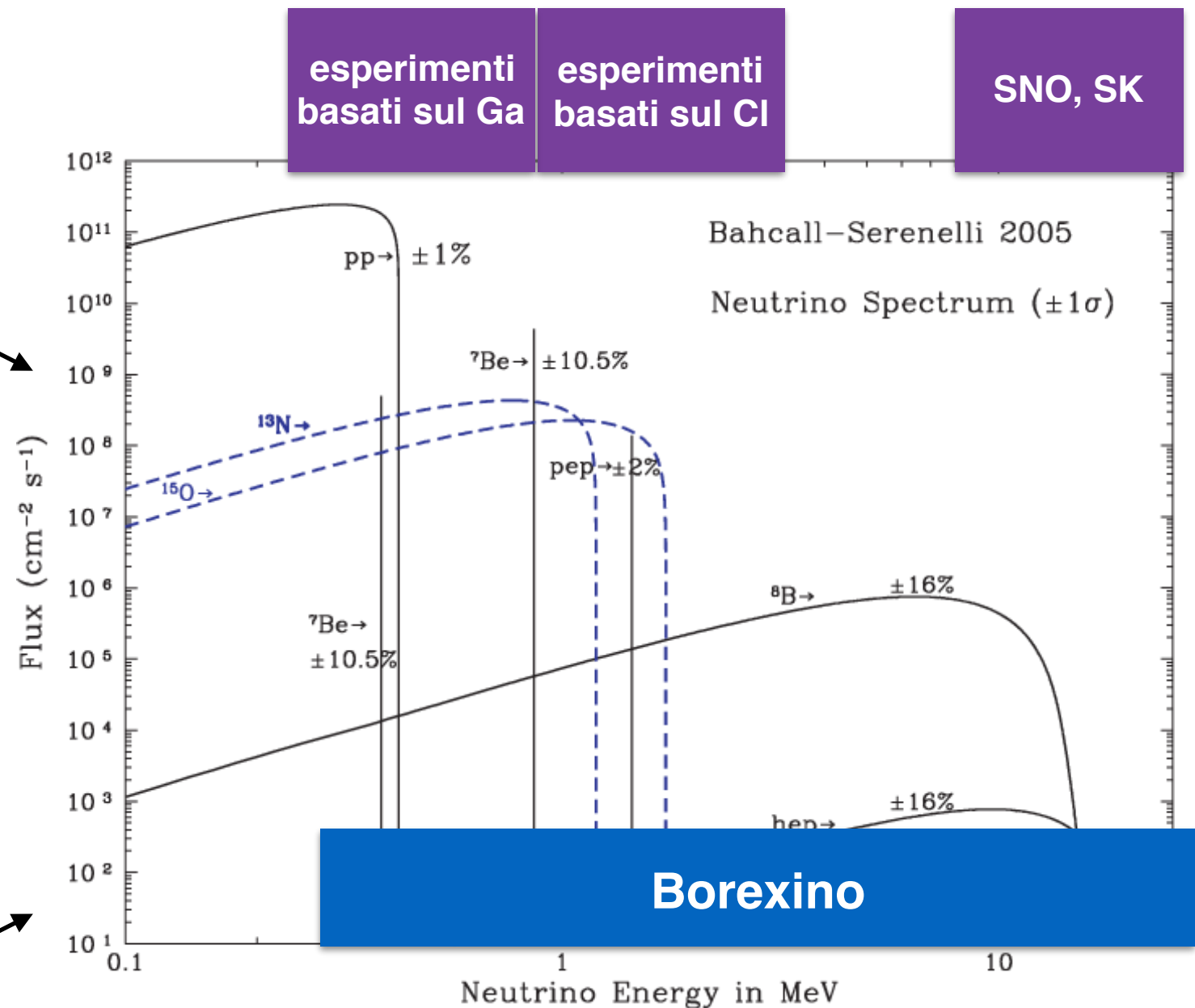
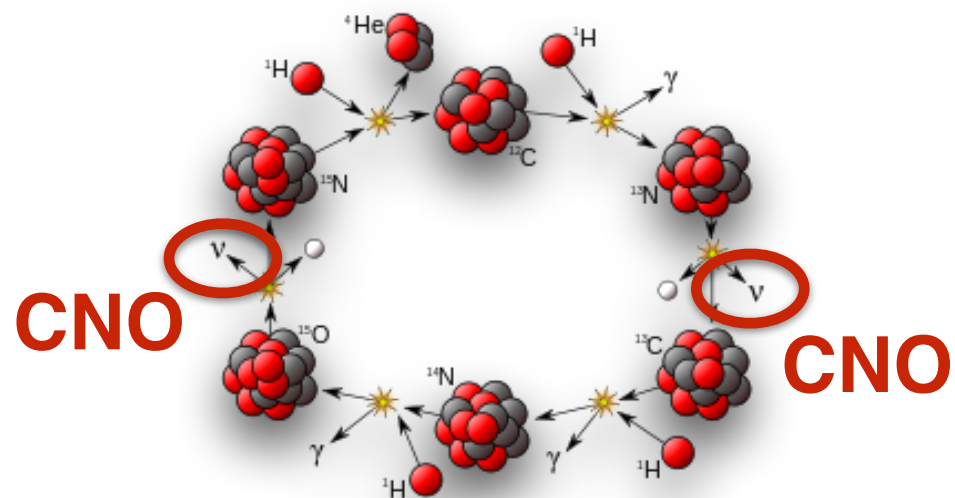


# I neutrini solari

catena pp (99%)



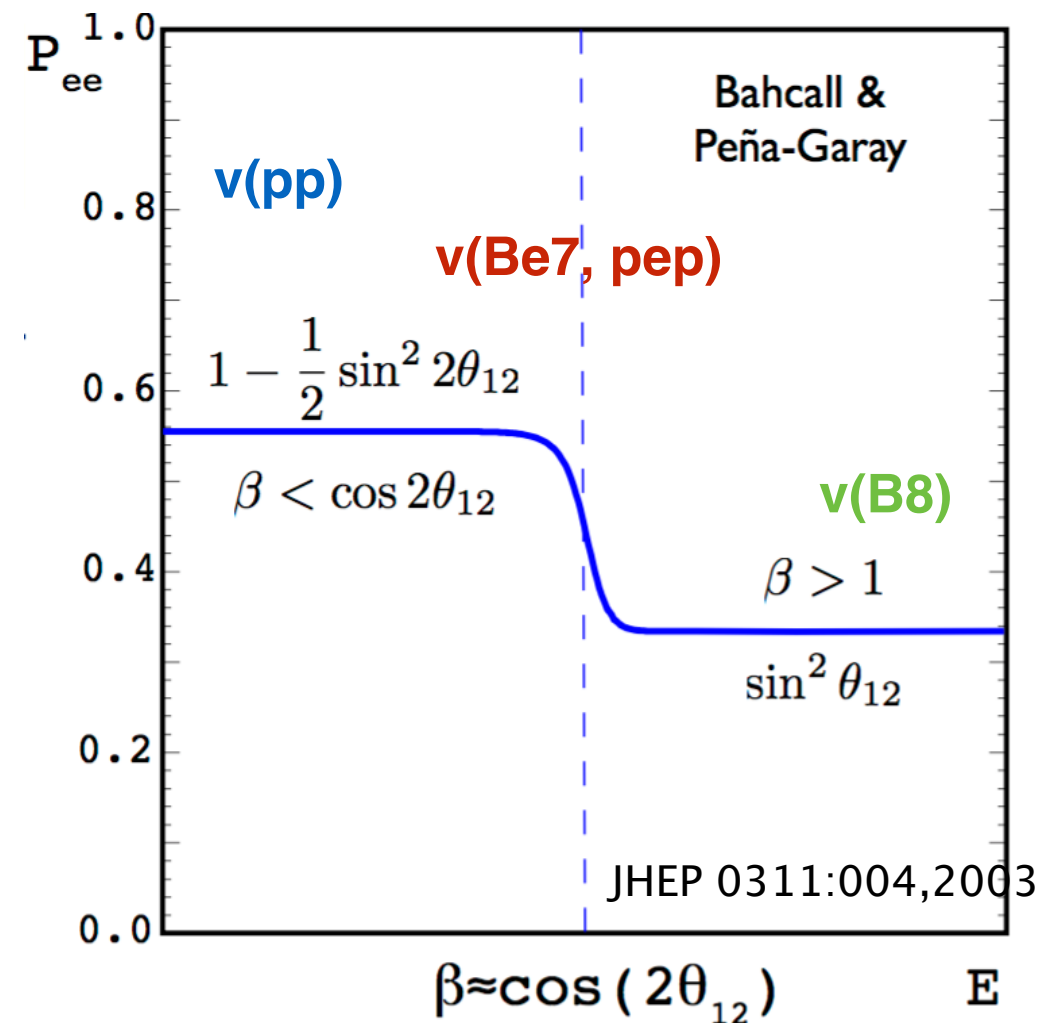
ciclo CNO (trascurabile)



i neutrini solari sono fondamentali per studiare la composizione interna del Sole

# Fisica del neutrino: oscillazioni ed effetto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW)

- Neutrini del B: “**alta energia**”, domina l’effetto di **materia** indotto dall’alta densità elettronica nel Sole
- Neutrini di “**bassa energia**”: dominano le oscillazioni nel **vuoto**
- Il regime di transizione è previsto attorno a 1-2 MeV
- i neutrini del pep e del Be7 sono ottimi per studiare la zona di transizione
- è possibile che nuova fisica sia evidenziata da andamenti di  $P_{ee}$  non standard

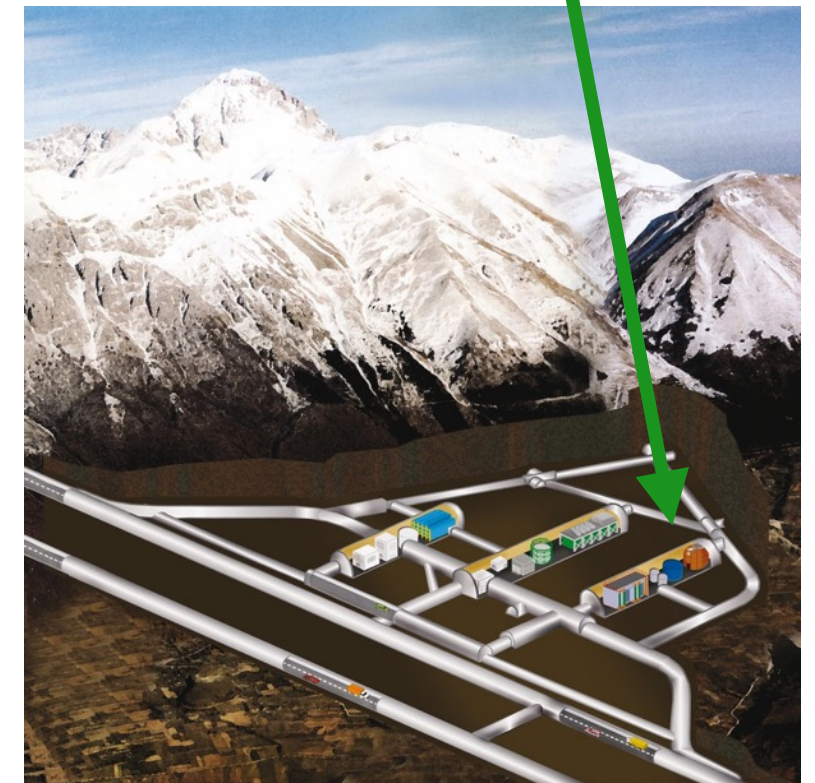
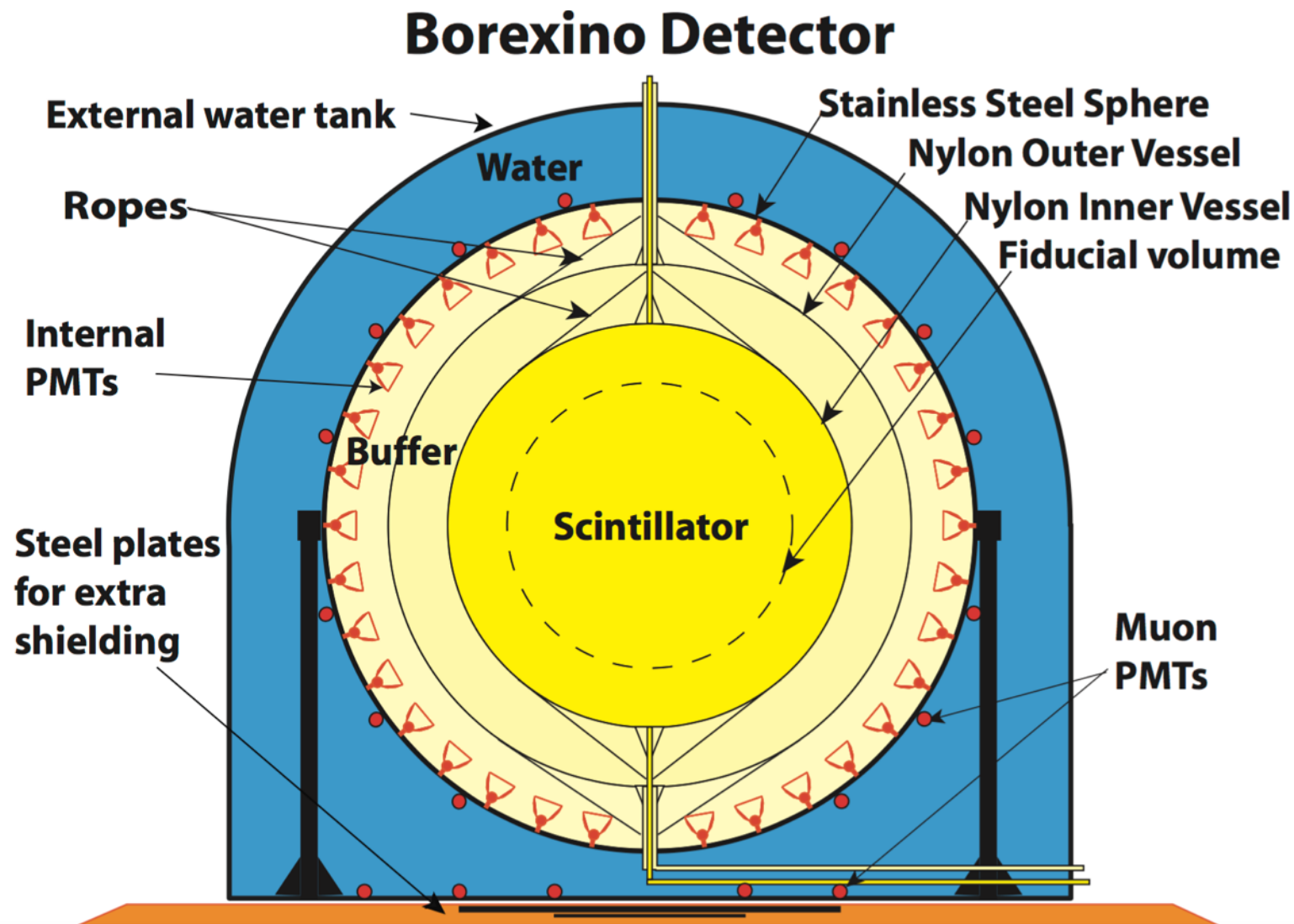


$$\beta = \frac{2^{3/2} G_F N_e E}{\Delta m^2} = 0.22 \left[ \frac{E}{1 \text{ MeV}} \right] \left[ \frac{\rho \cdot Z/A}{100 \text{ g cm}^{-3}} \right] \left[ \frac{7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2}{\Delta m^2} \right]$$

$$E[\text{MeV}] = 6.8 \times 10^6 \frac{\cos(2\theta_{12}) \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2]}{\rho [\text{g/cm}^3] Z/A} \simeq 1-2 \text{ MeV}$$



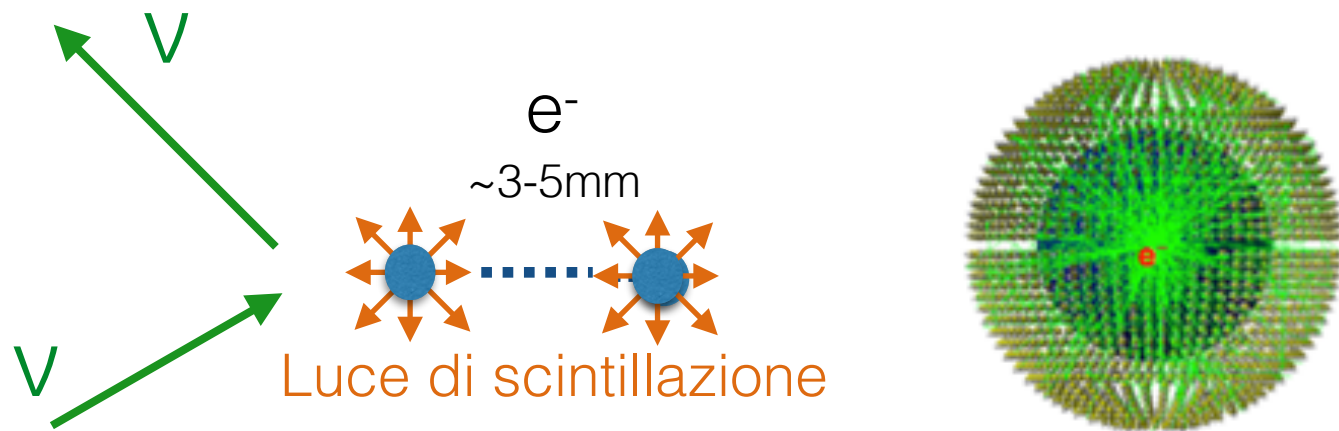
# Borexino @ LNGS



- schermo di 3800 m di acqua equivalente contro i raggi cosmici
- Volume attivo: ~300 ton di scintillatore liquido
- ~900 ton di liquido di buffer ultra puro
- 2212 PMTs per la rivelazione della luce di scintillazione
- 208 PMTs utilizzati nel water Cherenkov veto



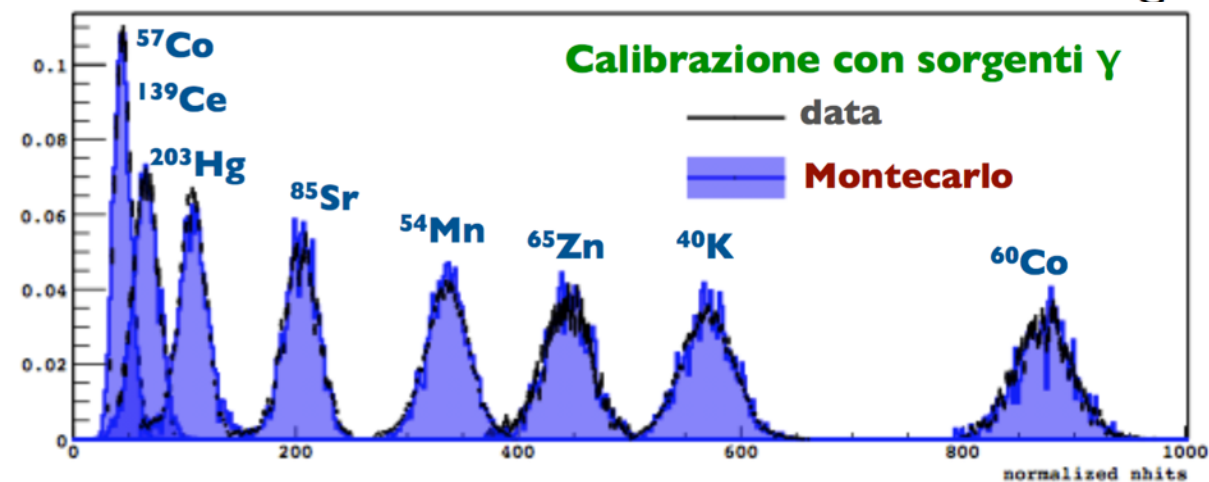
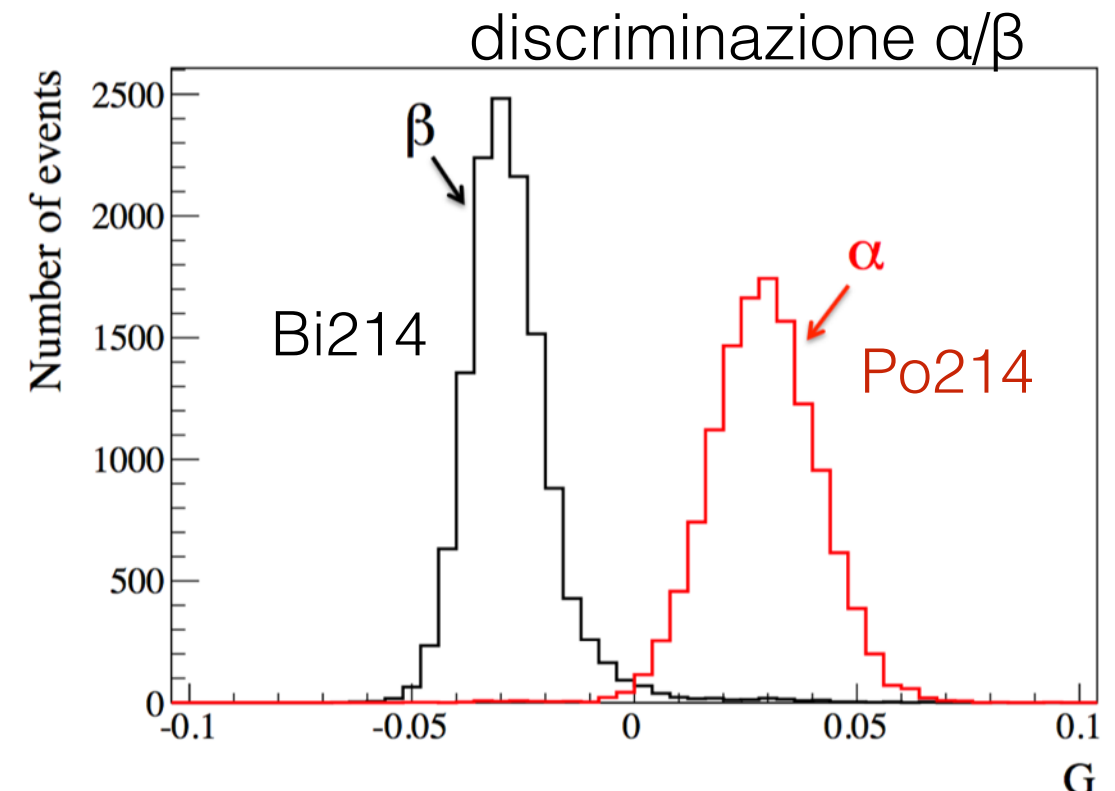
# Rivelazione in tempo reale di neutrini



- Rivelazione tramite luce di scintillazione
- Bassa soglia ( $\sim < 100$  keV)
- Buona risoluzione energetica  $\sim 5\%$  @ 1MeV
- Buona ricostruzione di posizione tramite tempo di volo  $\sim 16$ cm @ 500keV
- Discriminazione  $\alpha/\beta$ ,  $\beta^+/\beta^-$

## Effetti collaterali

- Nessuna informazione sulla direzionalità
- Necessità di **estrema radiopurezza** contro i fondi  $\beta/\gamma$





# La sfida di Borexino

- Dai neutrini del Be7 (862 keV) sono attesi ~50 eventi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore liquido  
-> attività specifica corrispondente  **$\sim 6 \cdot 10^{-9} \text{ Bq/kg}$**
- **MA**
  - Acqua potabile:  **$\sim 10 \text{ Bq/Kg}$**  in  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$
  - Aria:  $\sim 10 \text{ Bq/m}^3$  in  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  e  $^{222}\text{Rn}$
  - Roccia comune:  $\sim 100\text{-}1000 \text{ Bq/m}^3$  in  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$

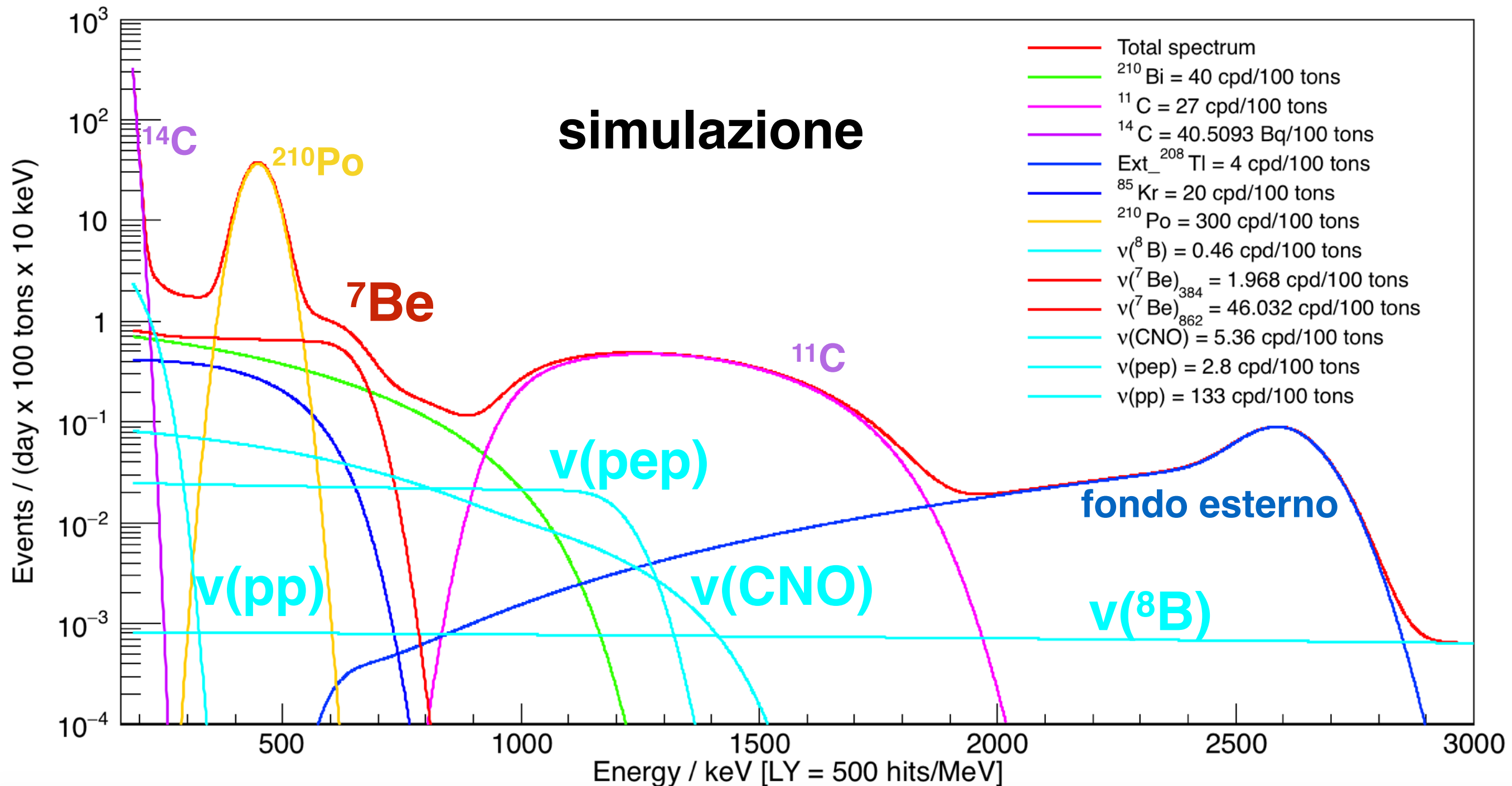
**Lo scintillatore di Borexino deve essere 9-10 ordini di grandezza meno radioattivo di qualunque cosa sulla Terra!**



# La sfida di Borexino

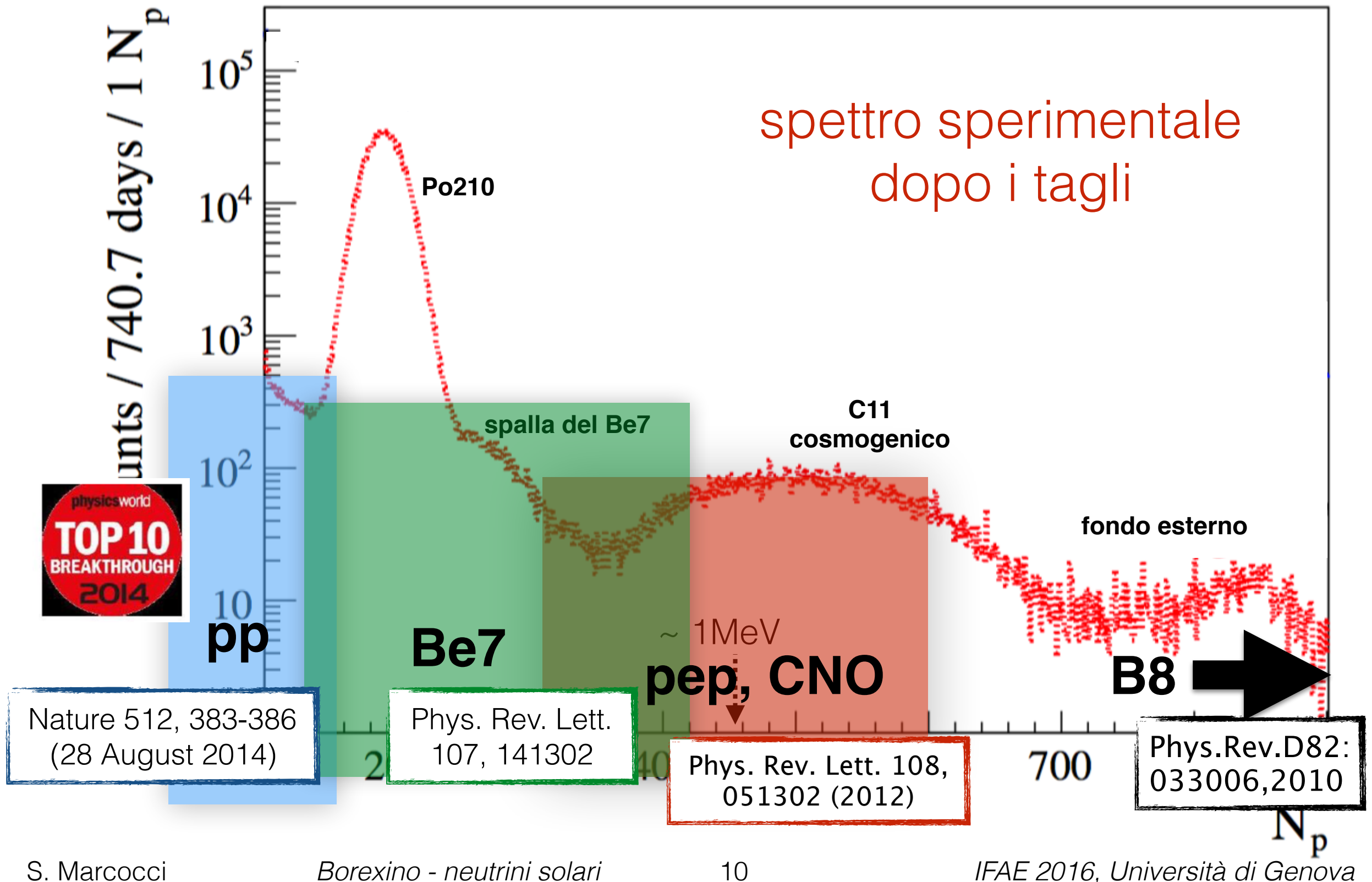
| Sorgente di contaminazione            | Concentrazione o flusso tipico       | Requisito per Borexino                                  | Strategia (hardware)                         | Strategia (software)                                        | Risultato Fase 1        | Risultato Fase 2                                                                 |                                                                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\mu$                                 | cosmic                               | $\sim 200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$<br>@ sea level | $<10^{-10}\text{s}^{-1} \text{ m}^{-2}$      | underground water detector                                  | Cerenkov PS analysis    | $< 10^{-10}$<br>eff. > 0.9992                                                    | $< 10^{-10}$<br>eff. > 0.9992                                      |
| $\gamma$                              | rock                                 | ---                                                     | ---                                          | water                                                       | fid. vol.               | negligible                                                                       | negligible                                                         |
| $\gamma$                              | PMTs, SSS                            | ---                                                     | ---                                          | buffer                                                      | fid. vol.               | negligible                                                                       | negligible                                                         |
| $^{14}\text{C}$                       | intrinsic PC                         | $\sim 10^{-12} \text{ g/g}$                             | $\sim 10^{-18} \text{ g/g}$                  | selection                                                   | threshold               | $\sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$                                              | $\sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$                                |
| $^{238}\text{U}$<br>$^{232}\text{Th}$ | dust, metallic                       | $10^{-5}\text{-}10^{-6} \text{ g/g}$                    | <b><math>&lt;10^{-16} \text{ g/g}</math></b> | distillation, W.E., filtration, mat. selection, cleanliness | tagging, $\alpha/\beta$ | $1.6\pm 0.1 \cdot 10^{-17} \text{ g/g}$<br>$5.1\pm 1 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$ | $<9 \cdot 10^{-19} \text{ g/g}$<br>$<9 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$ |
| $^7\text{Be}$                         | cosmogenic                           | $\sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/t}$                     | $<10^{-6} \text{ Bq/t}$                      | distillation                                                | --                      | not seen                                                                         | not seen                                                           |
| $^{40}\text{K}$                       | dust, PPO                            | $\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ g/g}$ (dust)               | $<10^{-18} \text{ g/g}$                      | distillation, W.E.                                          | --                      | not seen                                                                         | not seen                                                           |
| $^{210}\text{Po}$                     | surface cont. from $^{222}\text{Rn}$ | ---                                                     | $<1 \text{ c/d/t}$                           | distillation, W.E., filtration, cleanliness                 | fit                     | May '07: 70 c/d/t<br>Jan '10: $\sim 1 \text{ c/d/t}$                             | $< 1 \text{ c/d/t}$                                                |
| $^{222}\text{Rn}$                     | emanation from materials, rock       | 10 Bq/l air, water<br>100-1000 Bq rock                  | $<10 \text{ cpd } 100 \text{ t}$             | $\text{N}_2$ stripping<br>cleanliness                       | tagging, $\alpha/\beta$ | $<1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$                                                  | $<0.1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$                                  |
| $^{39}\text{Ar}$                      | air, cosmogenic                      | $17 \text{ mBq/m}^3$ (air)                              | $< 1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$             | $\text{N}_2$ stripping                                      | fit                     | $\ll \text{}^{85}\text{Kr}$                                                      | $\ll \text{}^{85}\text{Kr}$                                        |
| $^{85}\text{Kr}$                      | air, nuclear weapons                 | $\sim 1 \text{ Bq/m}^3$ (air)                           | $< 1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$             | $\text{N}_2$ stripping                                      | fit                     | $30 \pm 5 \text{ cpd/100 t}$                                                     | $<7 \text{ cpd/100 t}$                                             |
| $^{210}\text{Bi}$                     | surface cont. from $^{222}\text{Rn}$ | ---                                                     | ---                                          | water extraction                                            | fit                     | $10\text{-}50 \text{ cpd/100 t}$                                                 | $\sim 25$                                                          |

# Lo spettro di Borexino

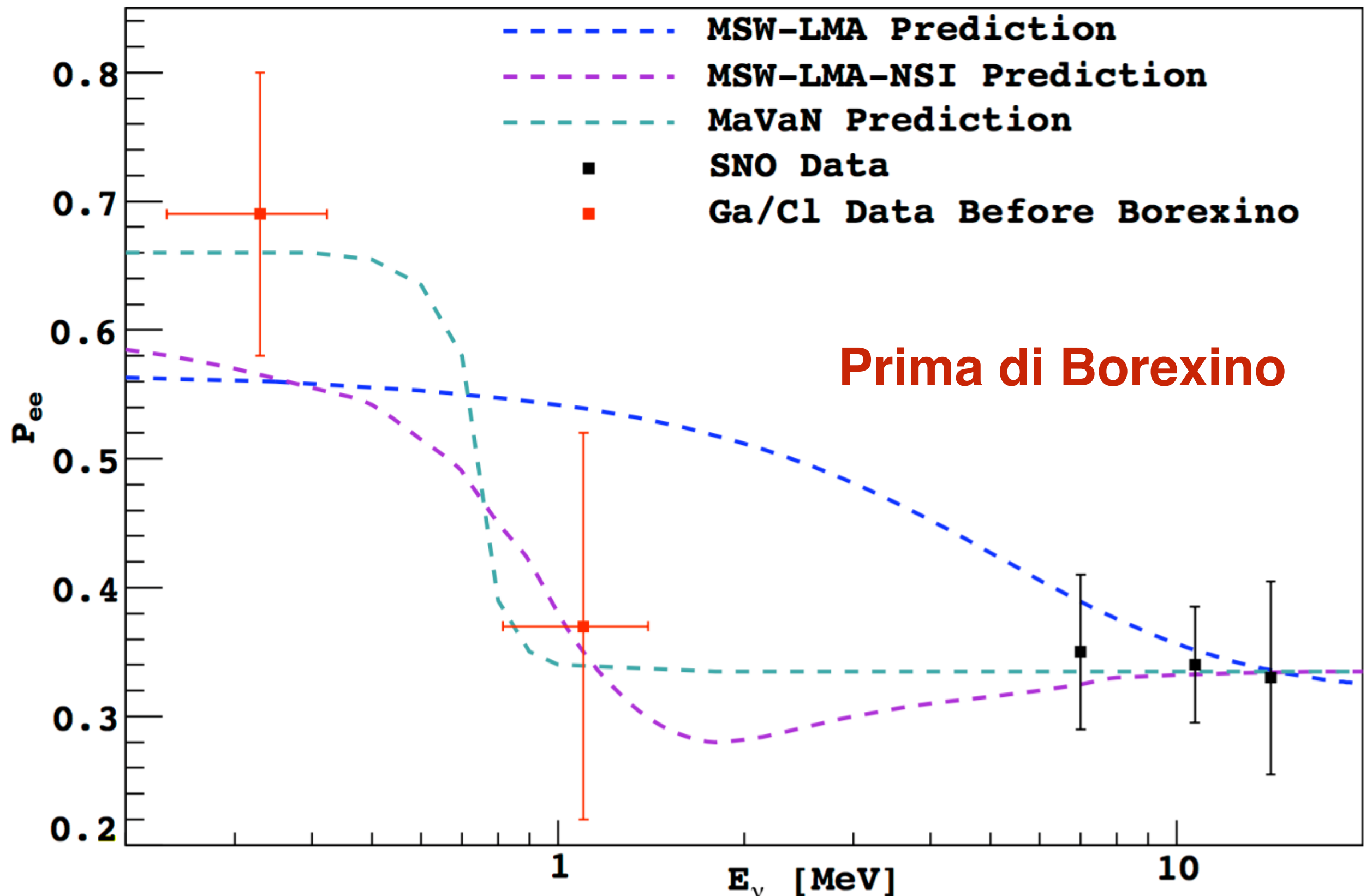




# Lo spettro di Borexino

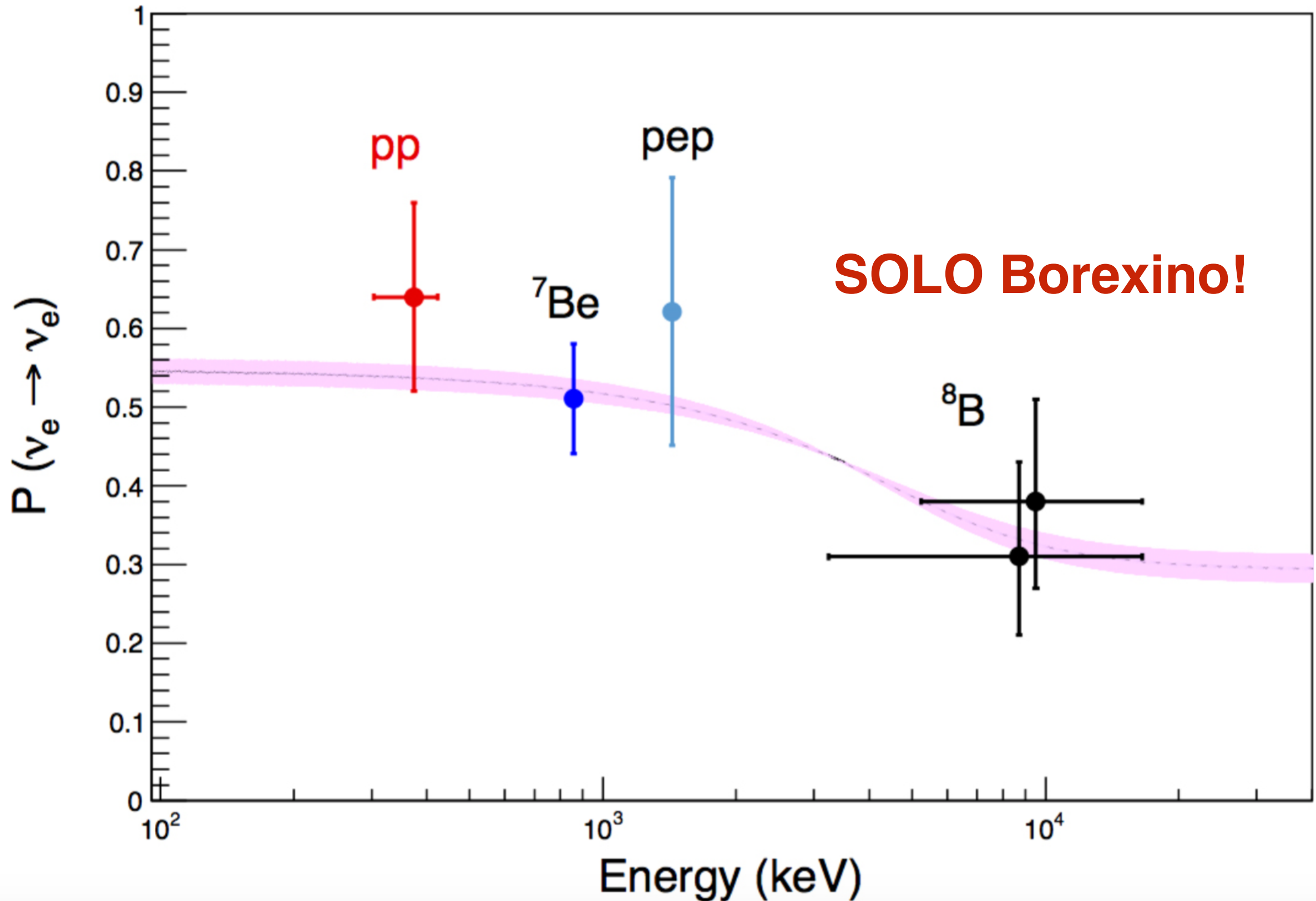


# Probabilità di sopravvivenza dei neutrini solari





# Probabilità di sopravvivenza dei neutrini solari



# Prospettive per la Fase 2

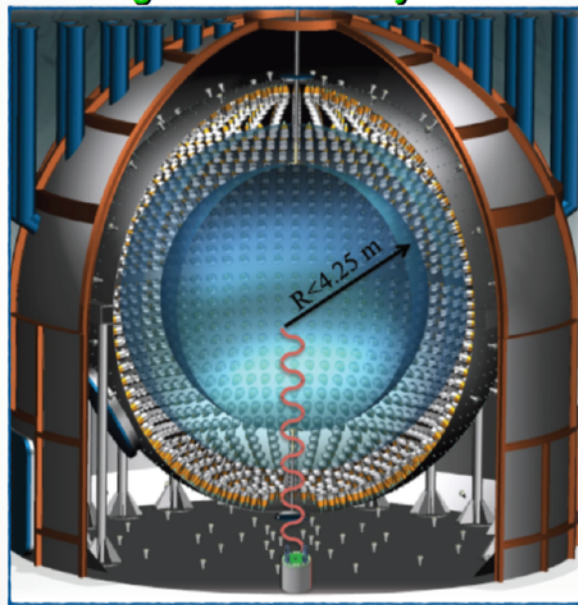


- La fase 2 di Borexino sta per concludersi
- Il fondo è ancora inferiore rispetto alla fase 1
- Nuove calibrazioni del rivelatore previste per la fine del 2016
- Obiettivi
  - miglioramento della misura dei neutrini del Be7 ( 3%? )
  - miglioramento della misura dei neutrini del pep (  $> 3 \sigma$  )
  - miglioramento del limite sui neutrini CNO (sognando una misura)

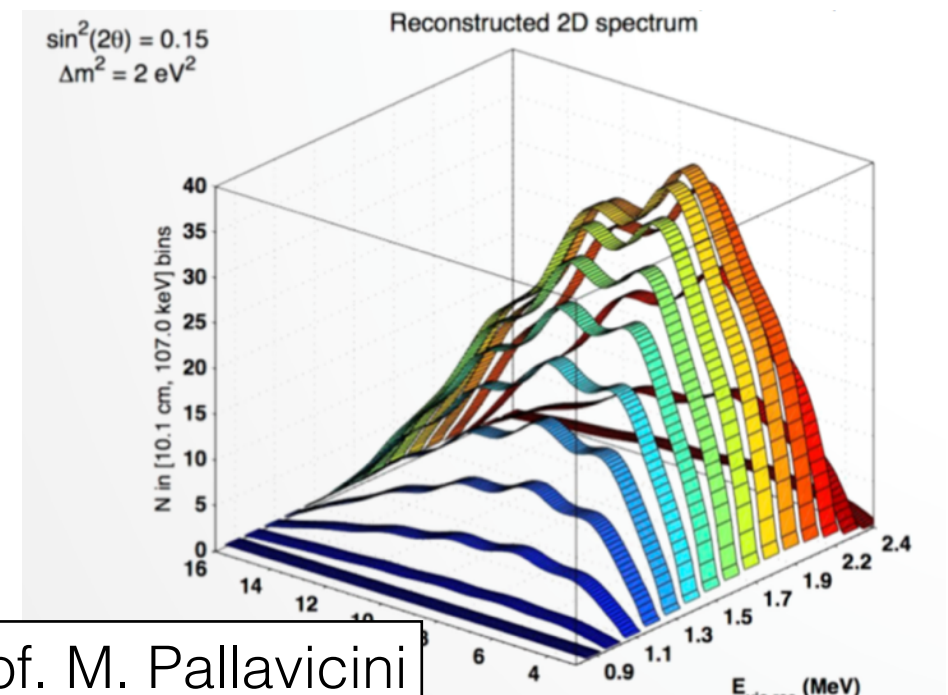
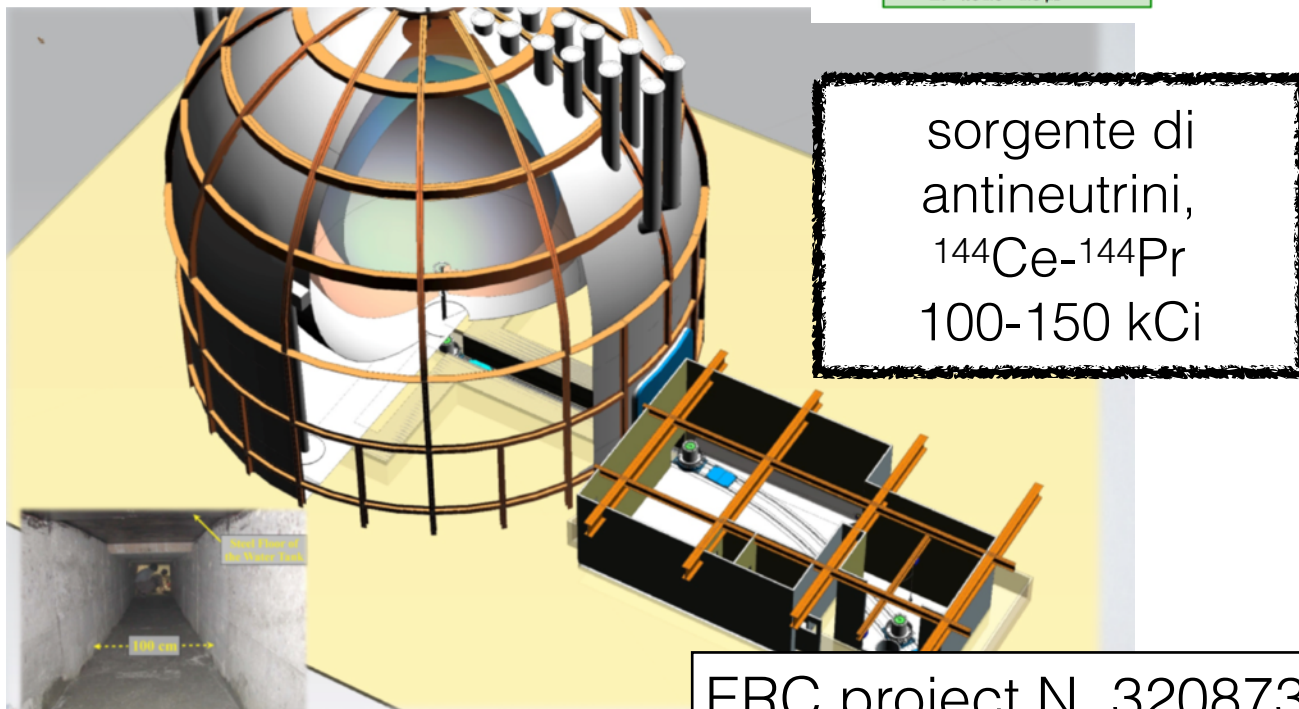
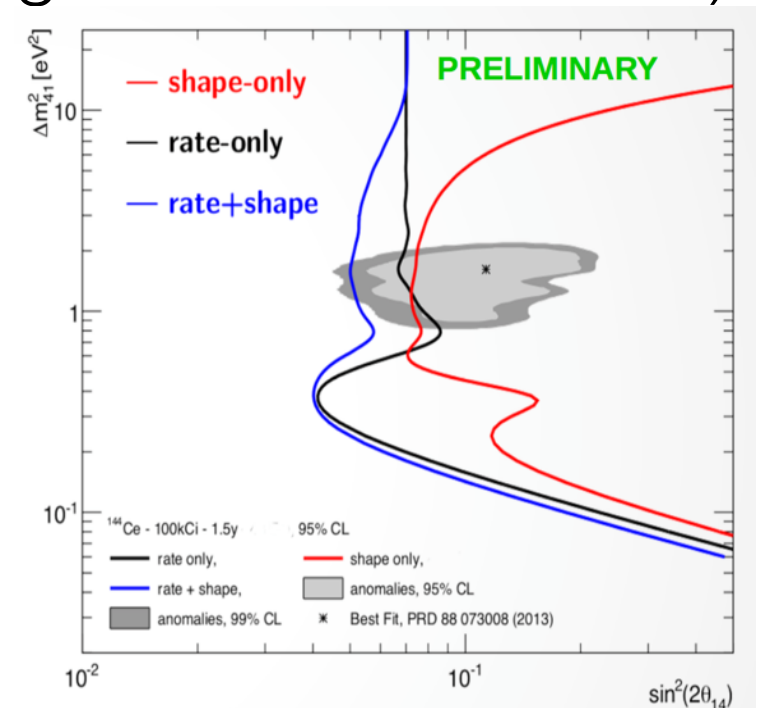
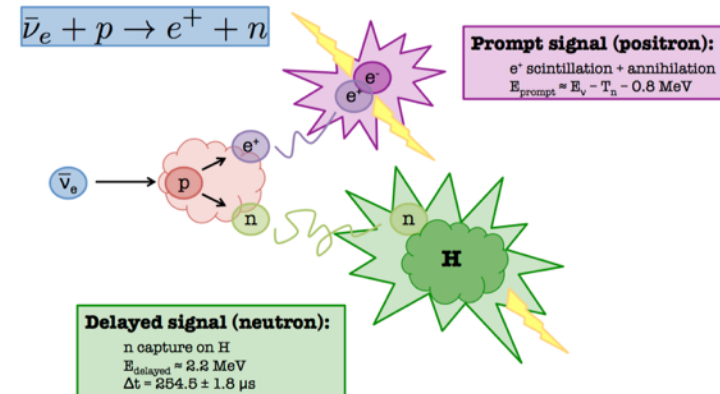


# Il futuro di Borexino si chiama SOX

Obiettivo: test non ambiguo delle anomalie di disappearance/appearance di neutrini e anti neutrini elettronici (da reattore, sorgente e acceleratore)



rivelazione di antineutrini elettronici tramite decadimento beta inverso



ERC project N. 320873 – P.I. Prof. M. Pallavicini

# Conclusioni

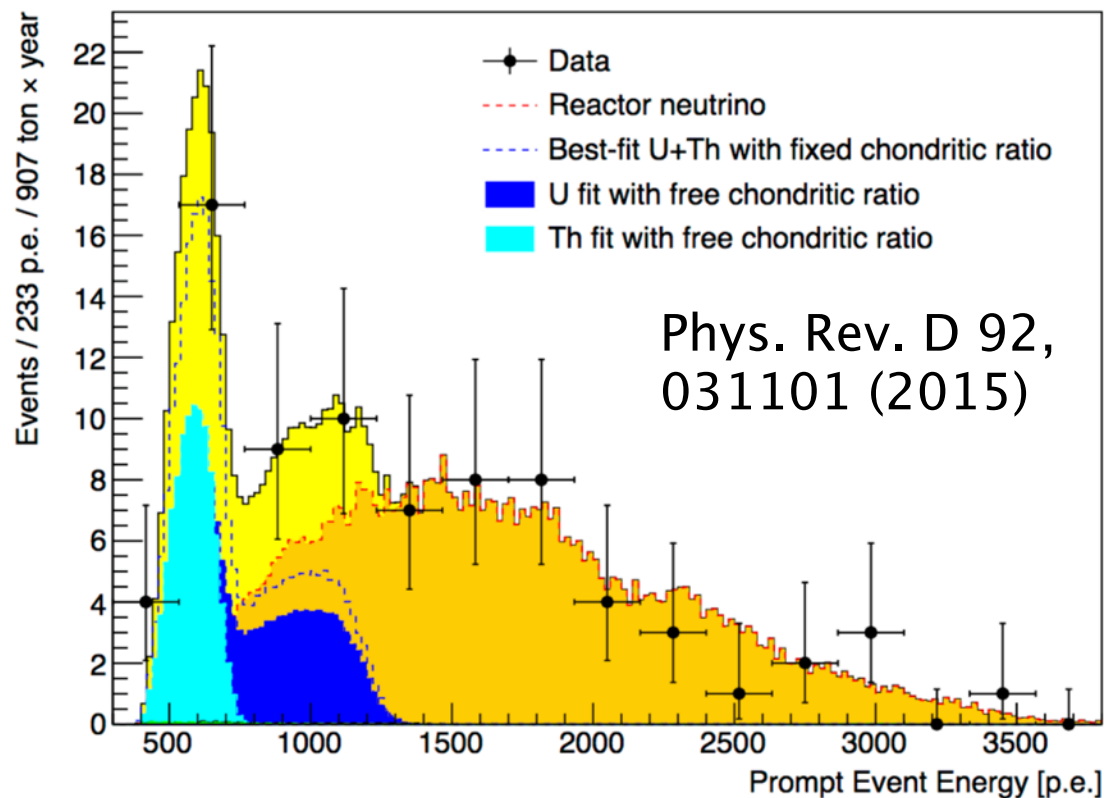
- Borexino ha raggiunto **livelli di radiopurezza** record, potendo compiere una **quasi completa spettroscopia dei neutrini solari**
- Borexino ha ancora molto da dire!  
previsto un miglioramento delle misure sui flussi di neutrini solari alla fine della fase 2
- Un miglioramento del limite sui neutrini del CNO (eventualmente la loro misura) è la priorità della fase 2
- Borexino diventerà SOX nel 2017 e darà la caccia ai neutrini sterili dell'eV

grazie per l'attenzione!



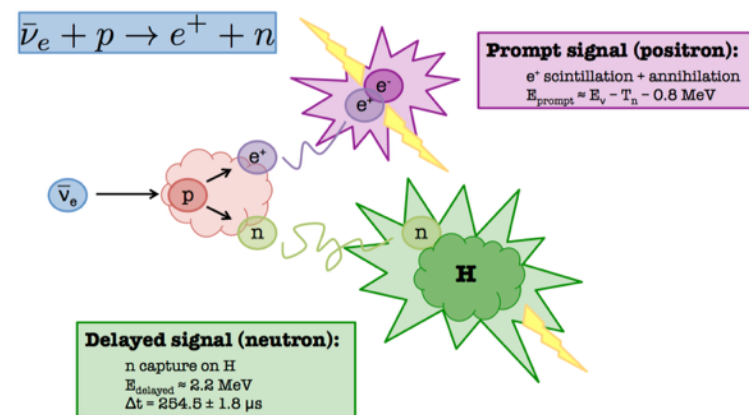
BACKUP

# Non solo neutrini solari ...



evidenza a  $5.9\sigma$  dei geoneutrini  
attraverso il decadimento beta inverso

segnale di geoneutrini dal mantello al 98% C.L



Fit result for the electron decay rate = 1.23 cpd/100 tons

ricerca del decadimento  
dell'elettrone attraverso il canale

$$e^- \rightarrow \gamma + \nu$$

risultato di Borexino:

$$\tau_{BX} \geq 6.6 \times 10^{28} \text{ yr (90\% C.L.)}$$

limite precedente migliorato di 2  
ordini di grandezza!

