

Una strategia per la rivelazione dei neutrini solari da ciclo CNO con l'esperimento Borexino

IFAE 2019 – Napoli – 08/Apr/19

Davide Basilico per la collaborazione Borexino

UniMi e INFN Milano



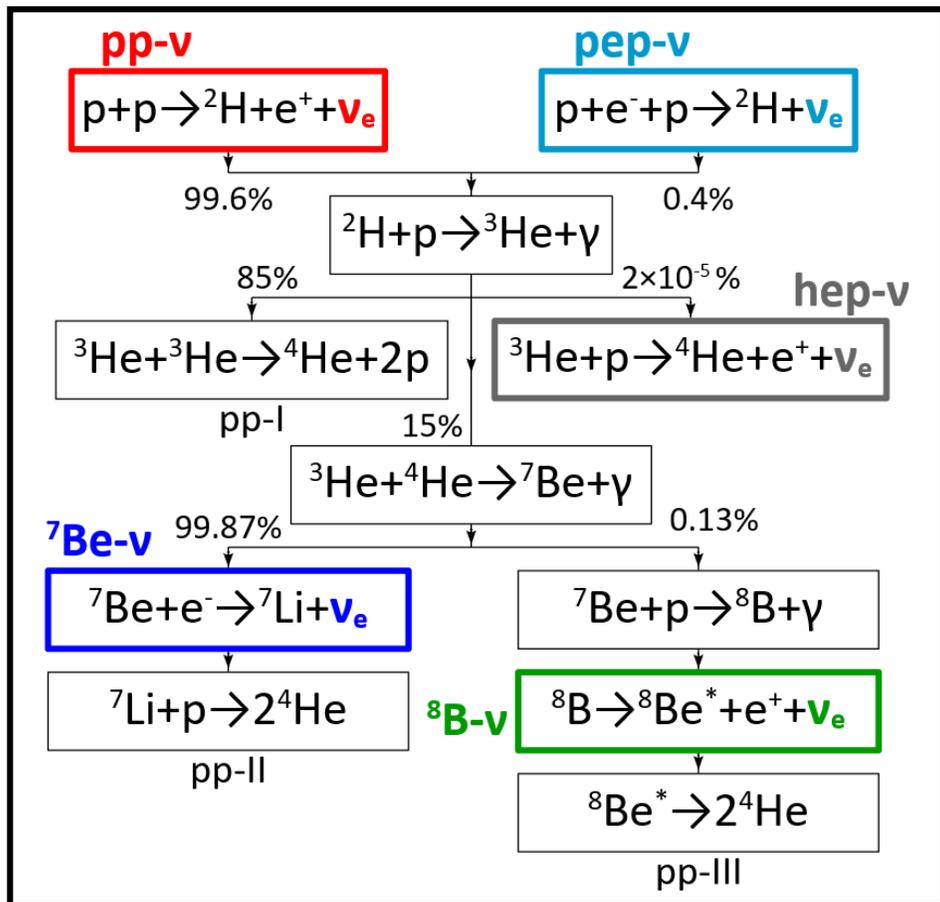
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

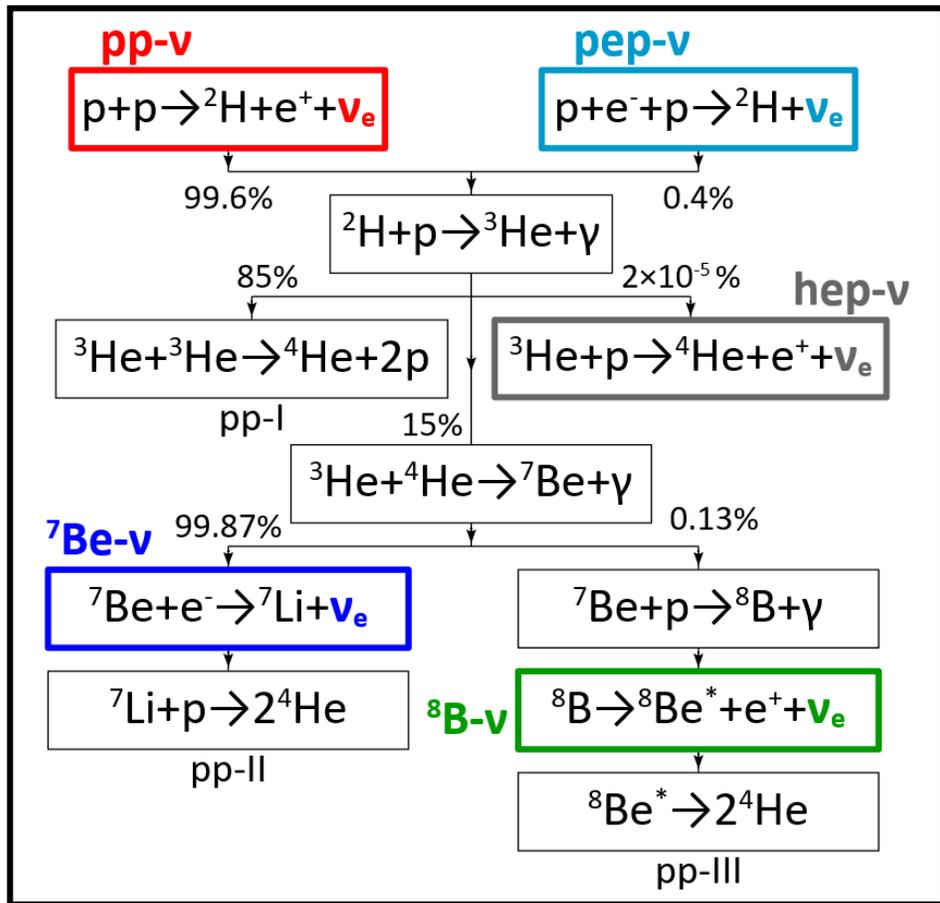
Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- **Catena pp**: dominante nel Sole (99%)



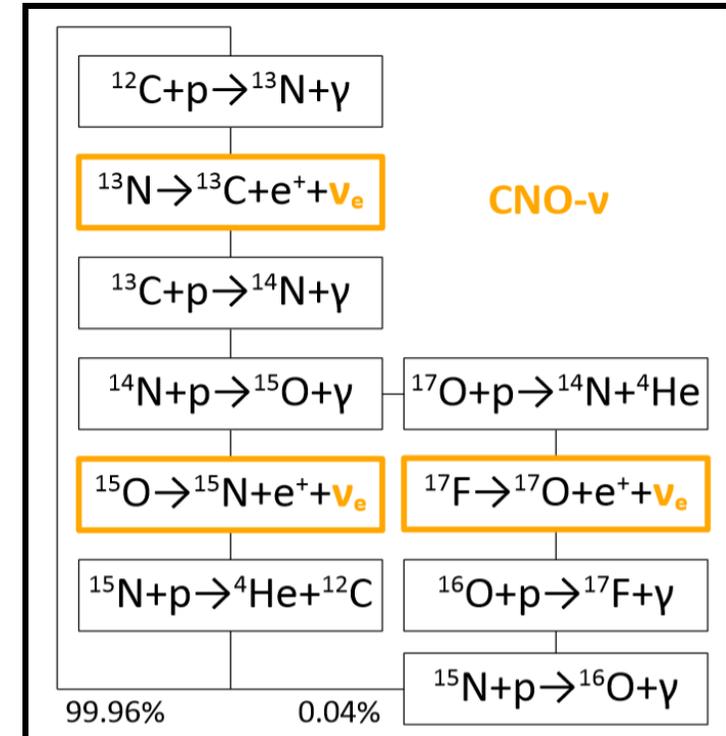
Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)



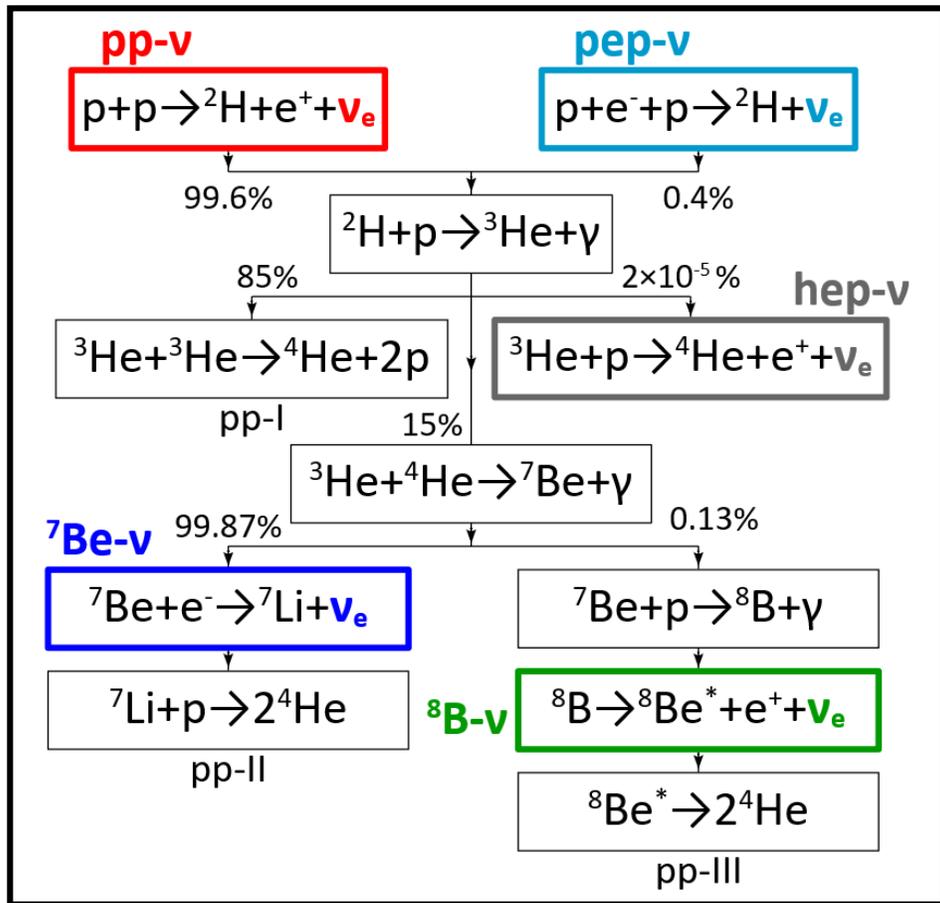
Ciclo CNO:

1% luminosità solare

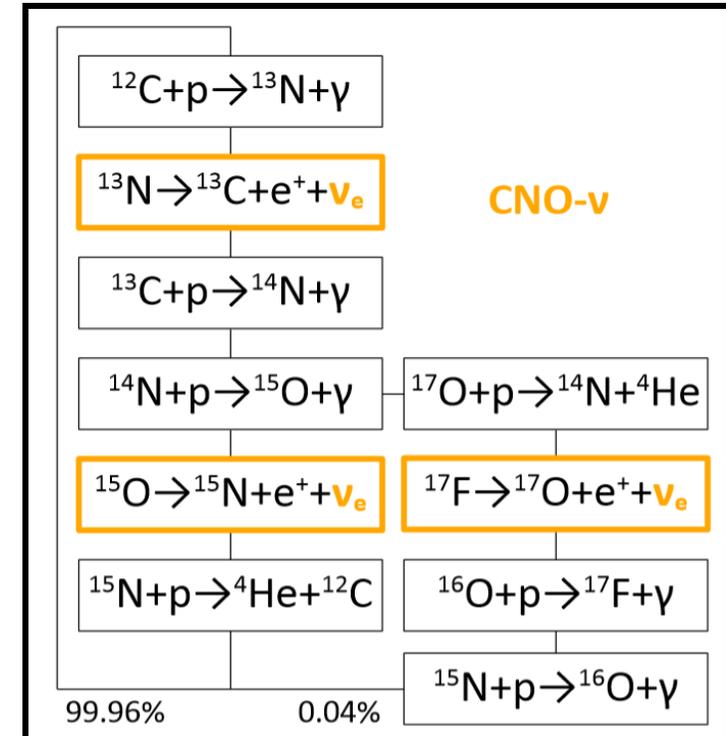


Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)



Ciclo CNO:
1% luminosità solare



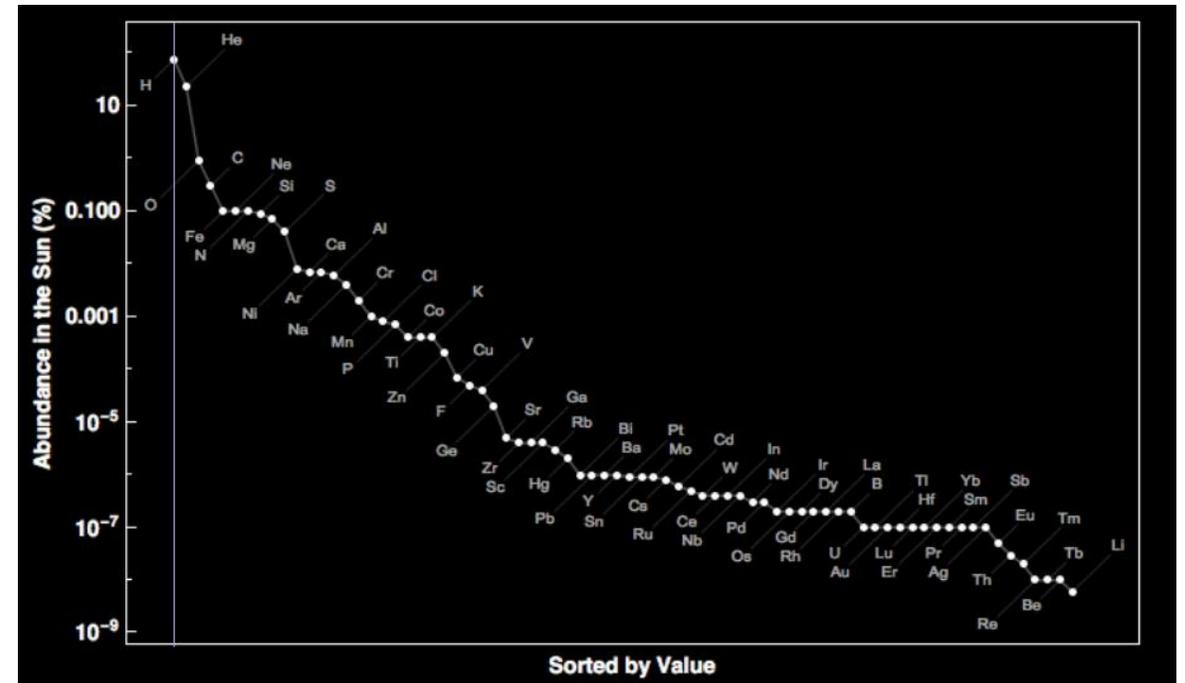
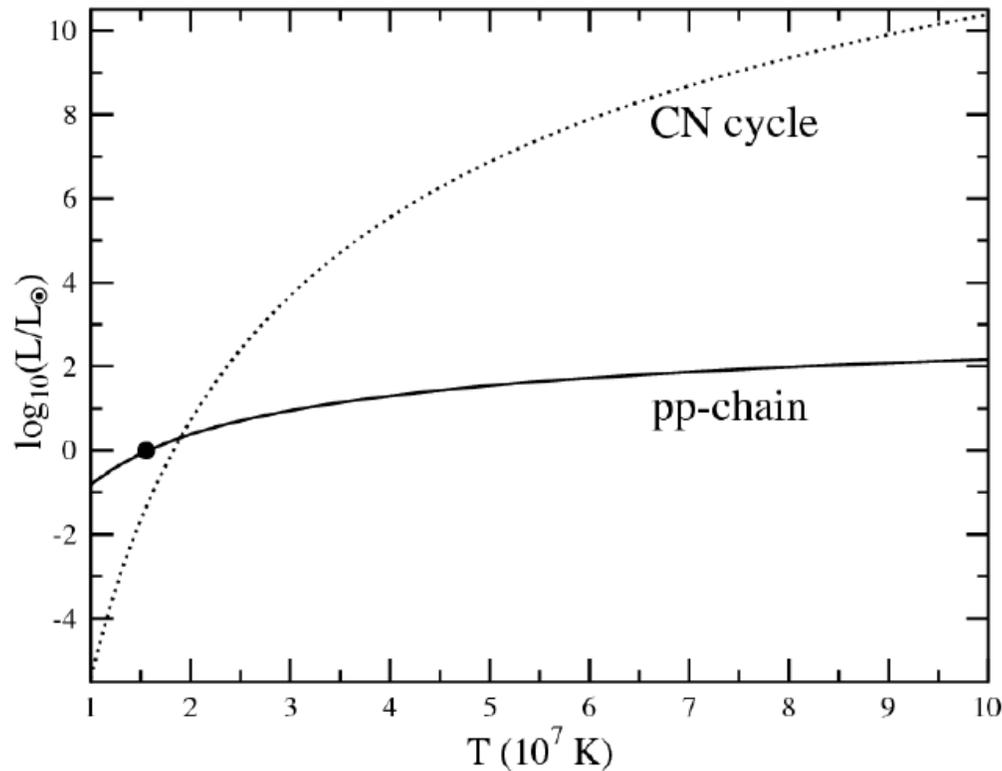
Nessuna evidenza!

Neutrini solari: il ciclo CNO

Principale nelle stelle più calde

Problema della metallicità solare:

il flusso di neutrini da CNO dipende fortemente dalla presenza di metalli (alta o bassa metallicità solare)



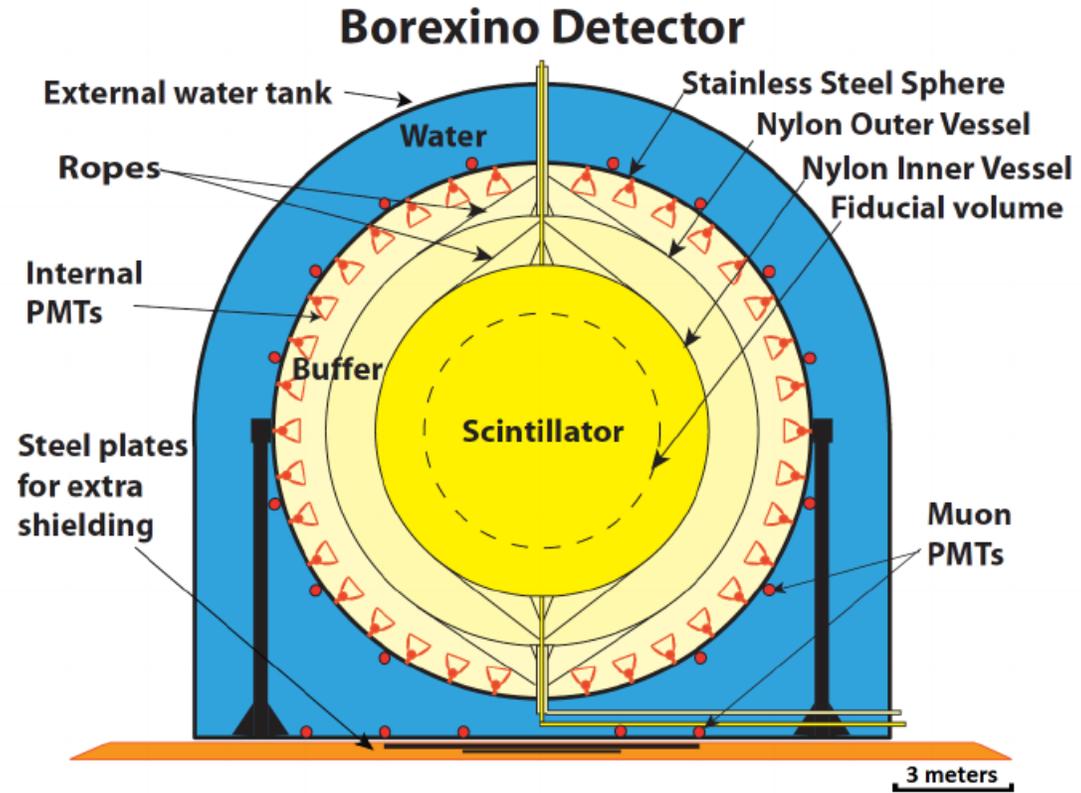
Laboratori Nazionali del Gran Sasso



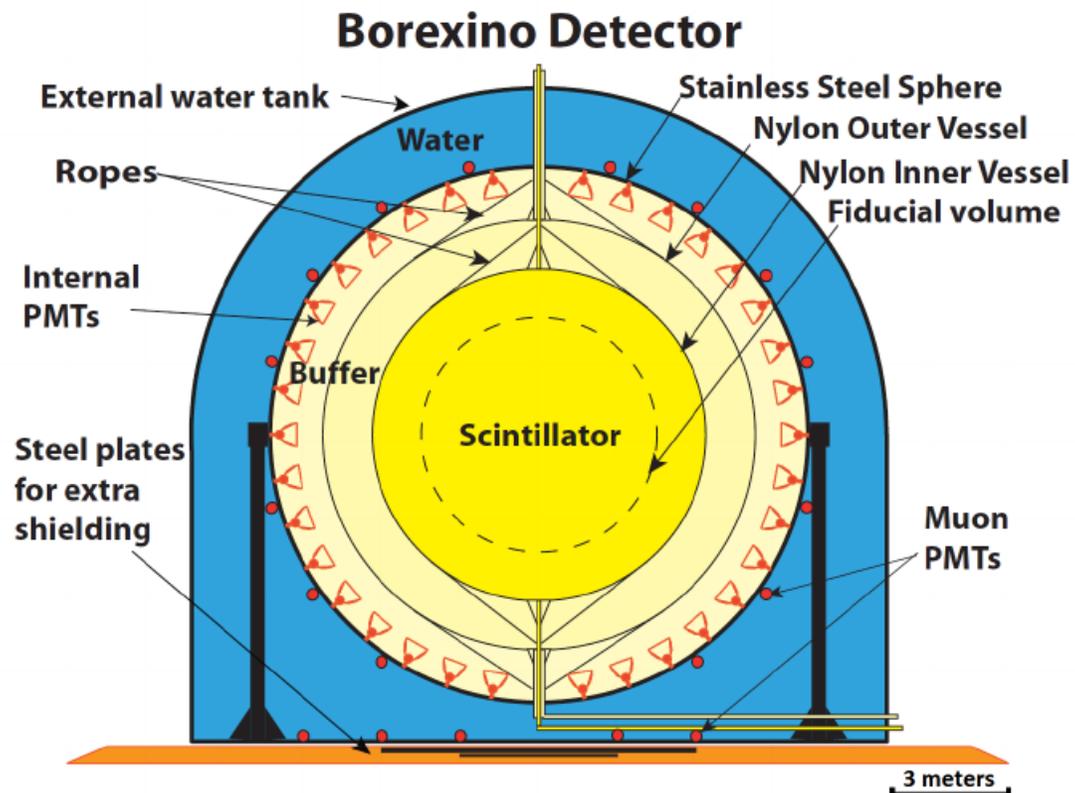
Sala C
(Borexino)

LNGS

Borexino



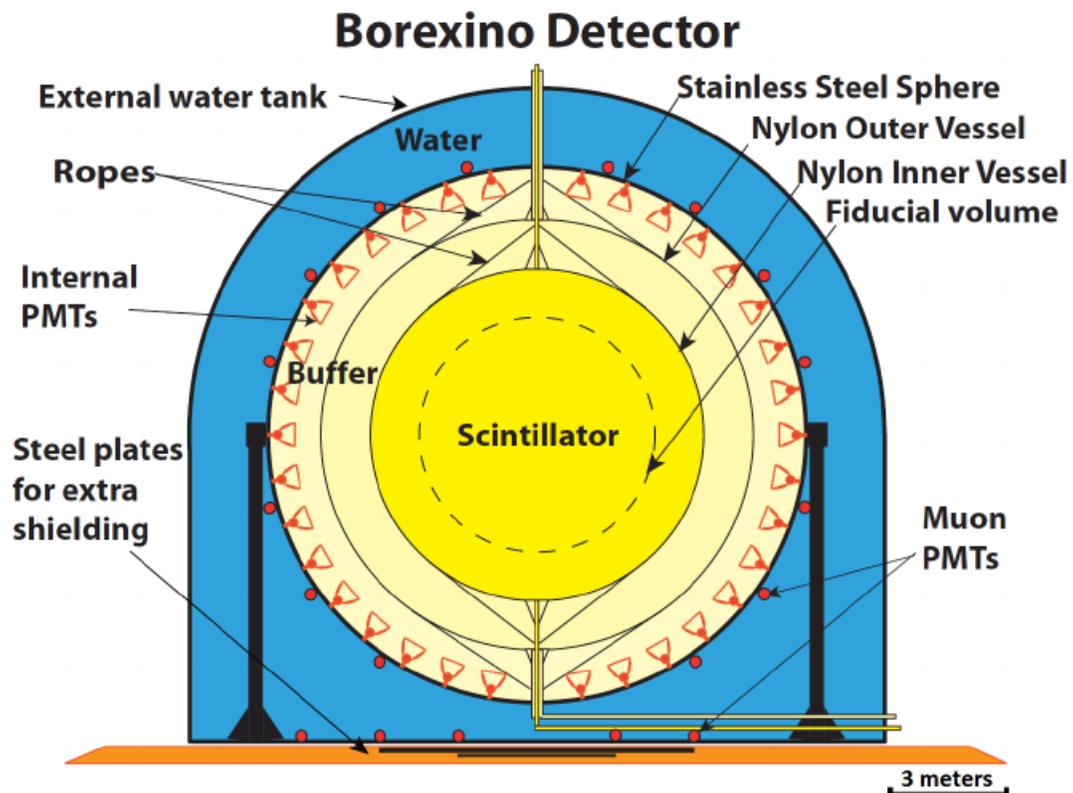
Borexino



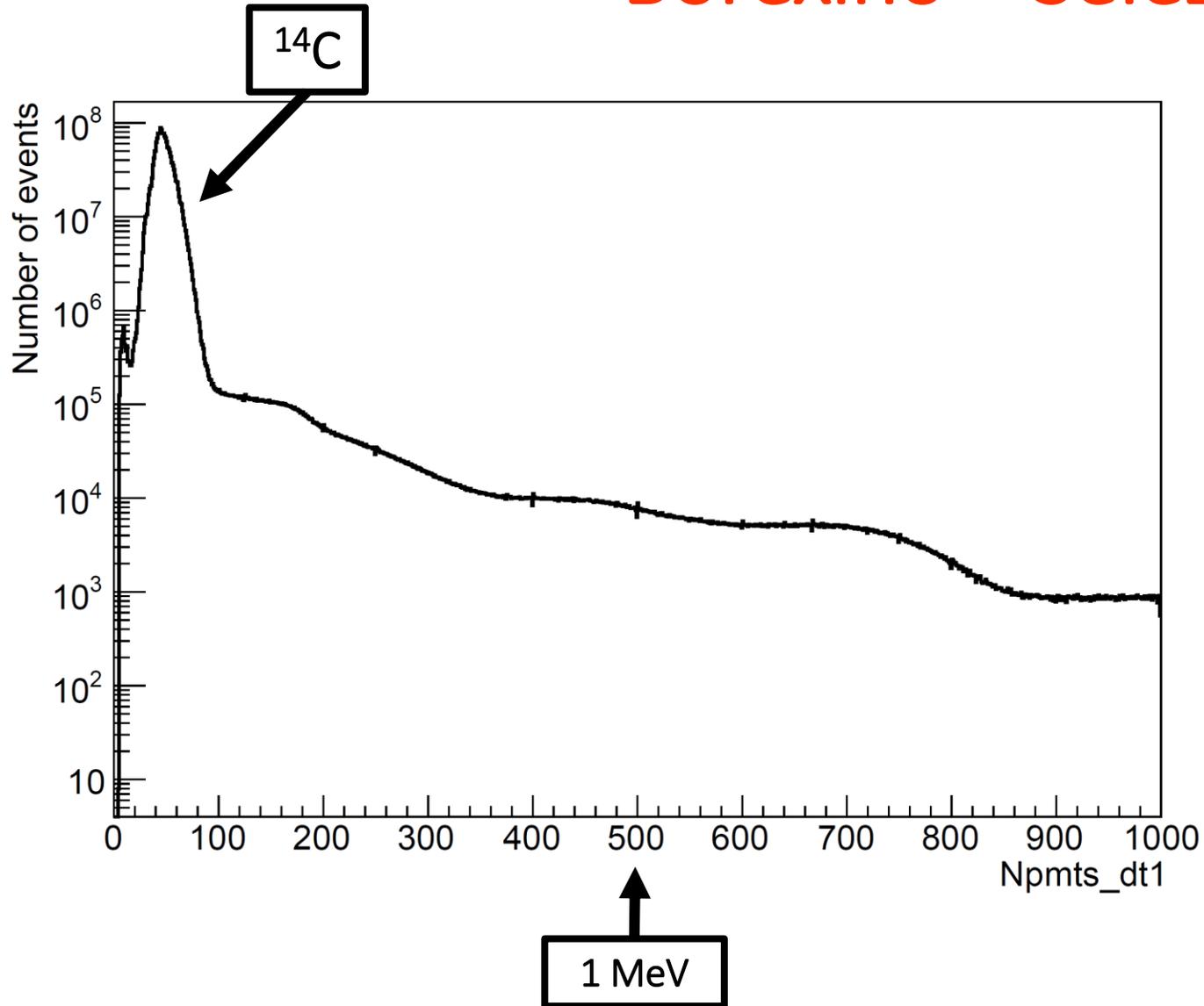
- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di ν solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo ($\sim 10^{-18}$ g/g)
- Rivelazione con scattering elastico
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
 - Posizione \rightarrow tempi di arrivo fotoni
 - Energia \rightarrow numero fotoni

Borexino

- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di ν solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo ($\sim 10^{-18}$ g/g)
- Rivelazione con scattering elastico
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
 - Posizione \rightarrow tempi di arrivo fotoni
 - Energia \rightarrow numero fotoni

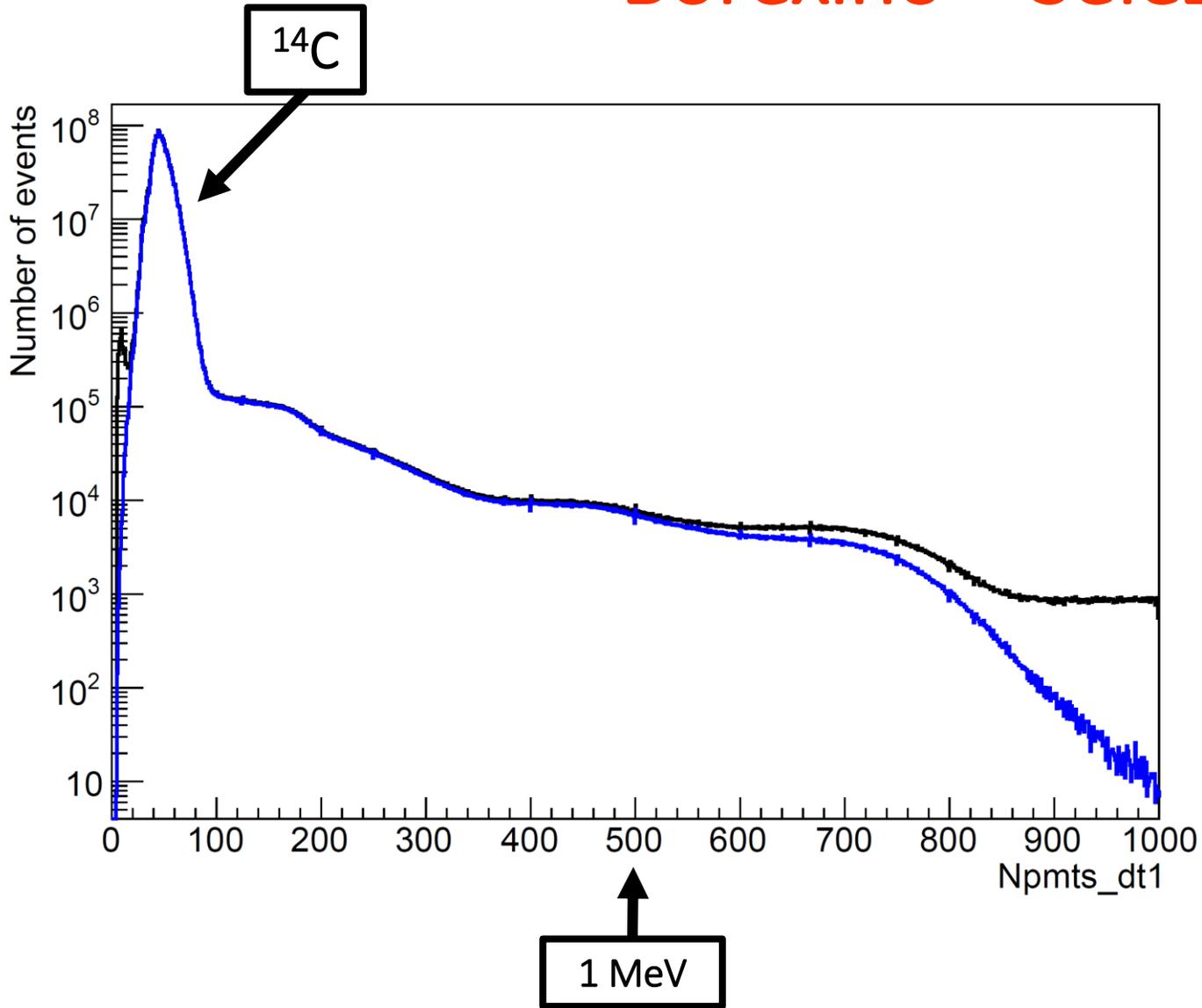


Borexino – Selezione dati



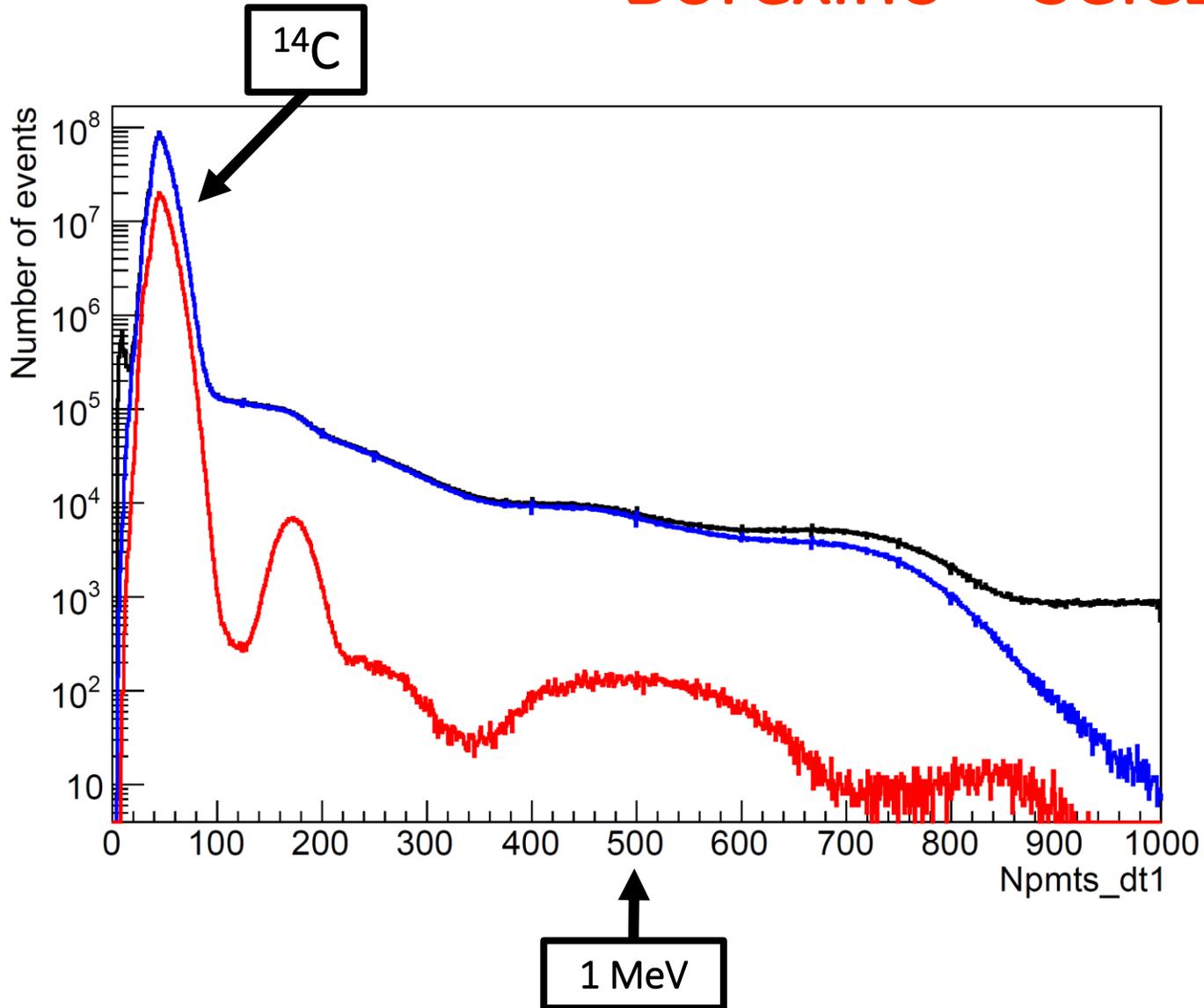
- Spettro grezzo rivelato, nessun taglio

Borexino – Selezione dati



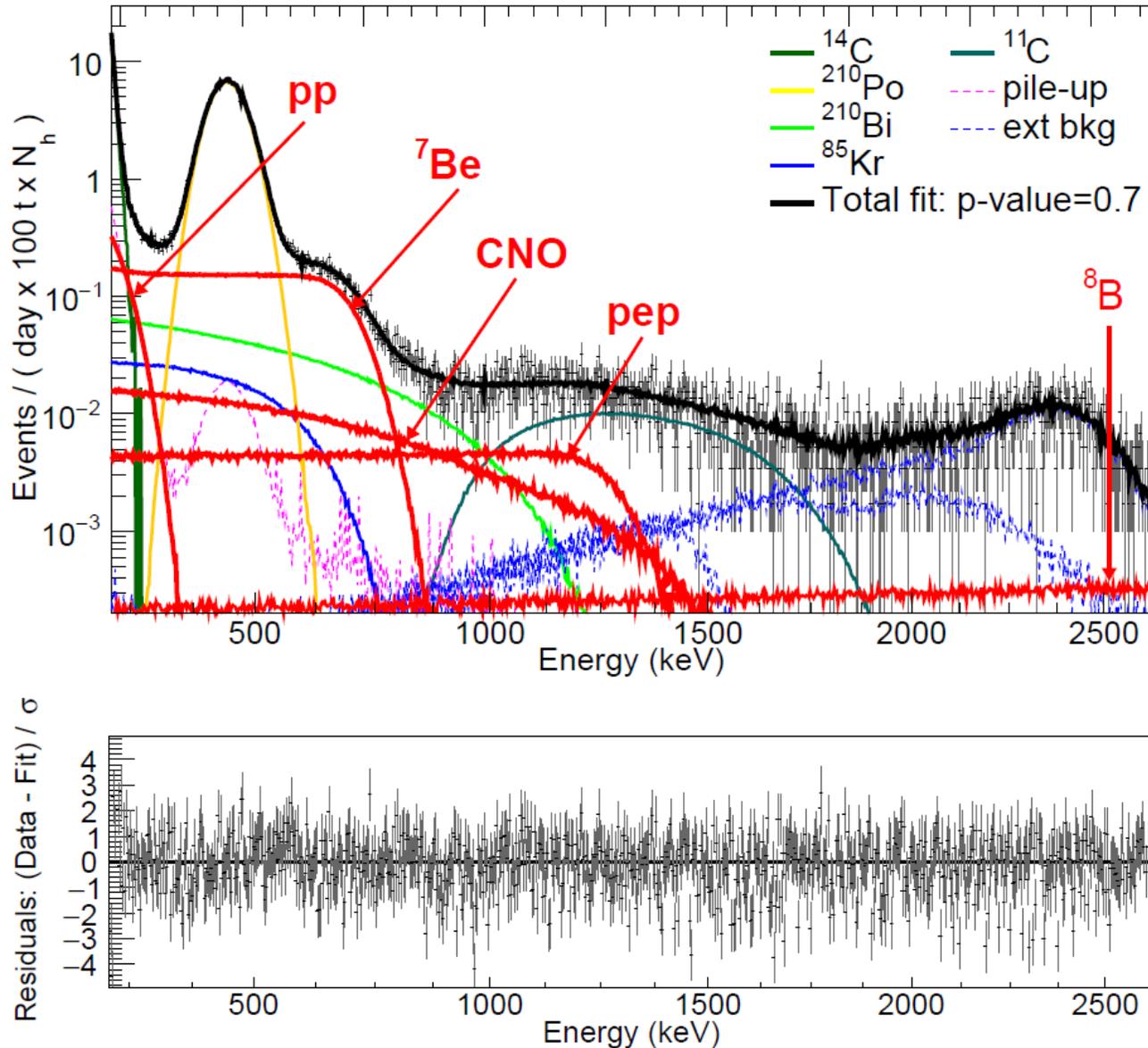
- Spettro grezzo rivelato, nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni

Borexino – Selezione dati



- Spettro grezzo rivelato, nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni
- Spettro dopo selezione di Volume Fiduciale

Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



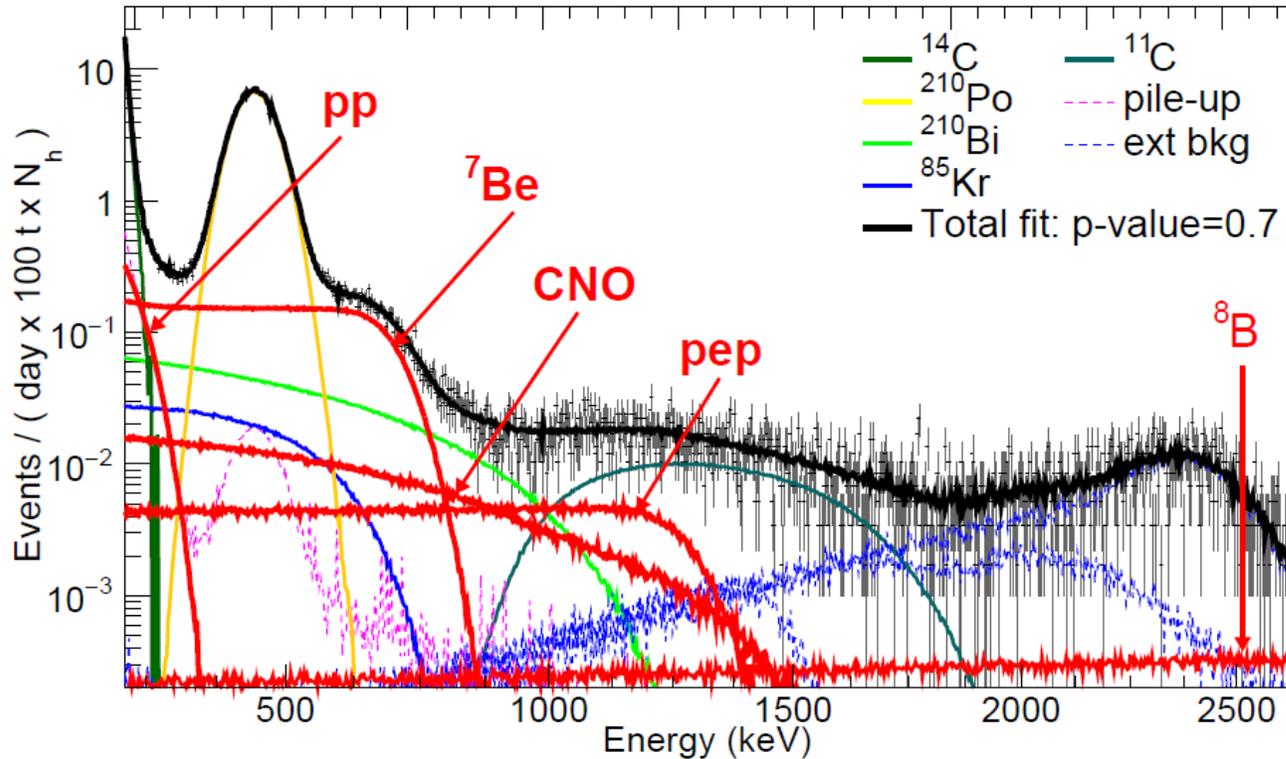
Fit simultaneo delle componenti a bassa energia (pp, ⁷Be, pep + limite CNO)

Due fit multivariati complementari: Analitico / Monte Carlo

“First Simultaneous Precision Spectroscopy of pp, pep, and ⁷Be Solar Neutrinos” Nature 562, 505–510 (2018)

- Misura simultanea dei flussi di tutte le componenti della catena pp
- Limite superiore al flusso da CNO:
 $\Phi(\text{CNO } \nu) < 7.9 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (95 % C.L.)

Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



Fit simultaneo delle componenti a bassa energia (pp, 7Be, pep + limite CNO)

Due fit multivariati complementari: Analitico / Monte Carlo

- Limite superiore al flusso da CNO:
 $\Phi(\text{CNO } \nu) < 7.9 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (95 % C.L.)

Perché una misura dei CNO ν è difficile?

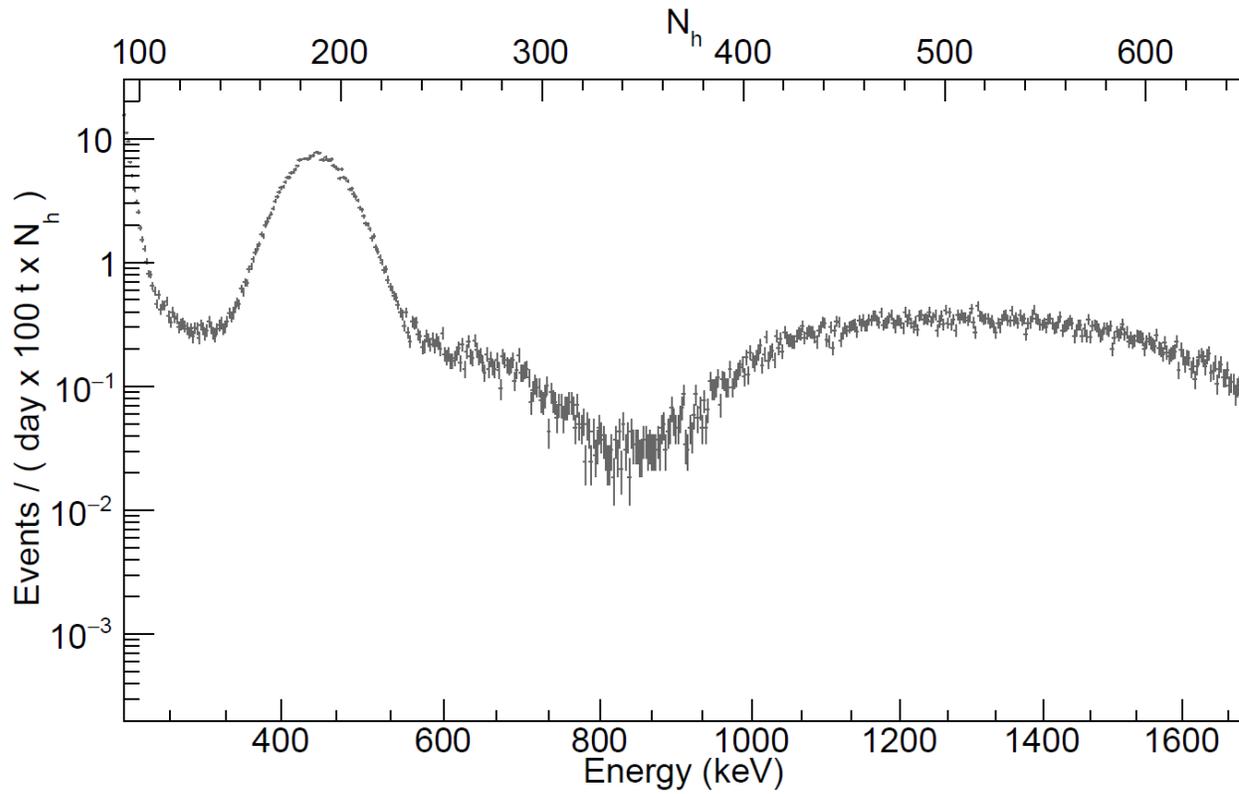
1) Tasso di interazione atteso molto basso

2) Nessuna caratteristica “di spicco” dello spettro

3) Anticorrelazione con ²¹⁰Bi e di pep ν

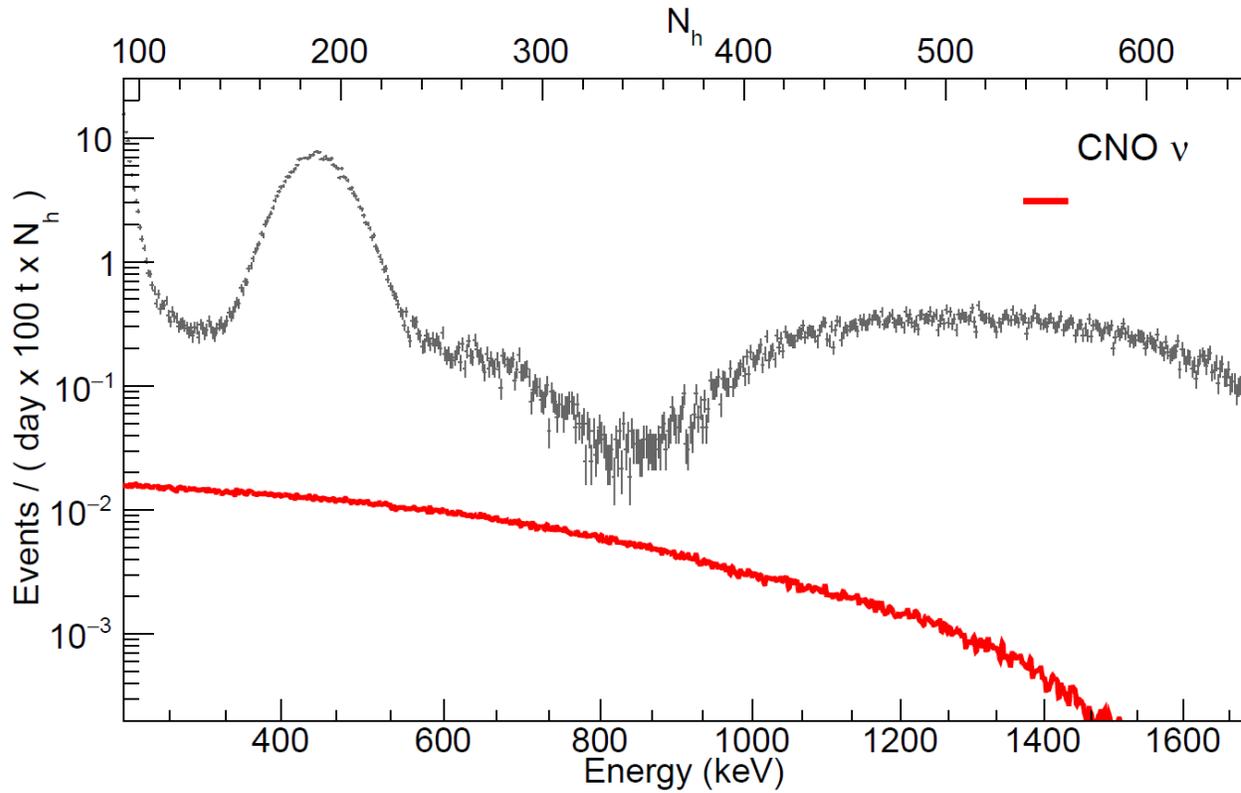
} forma

Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi



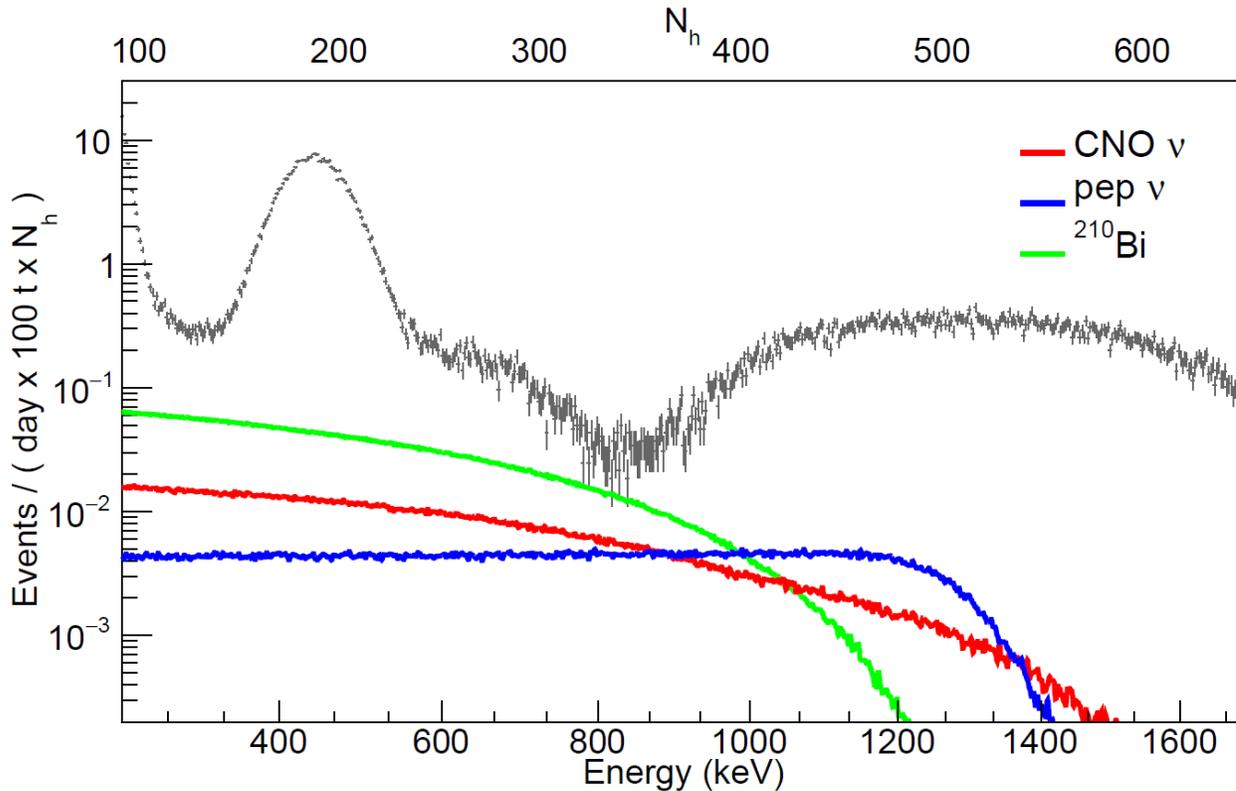
- Dati di Borexino

Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi



- Dati di Borexino
- CNO ν , spettro atteso

Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi



- Dati di Borexino
- CNO ν , spettro atteso
- ^{210}Bi , spettro
- pep ν , spettro

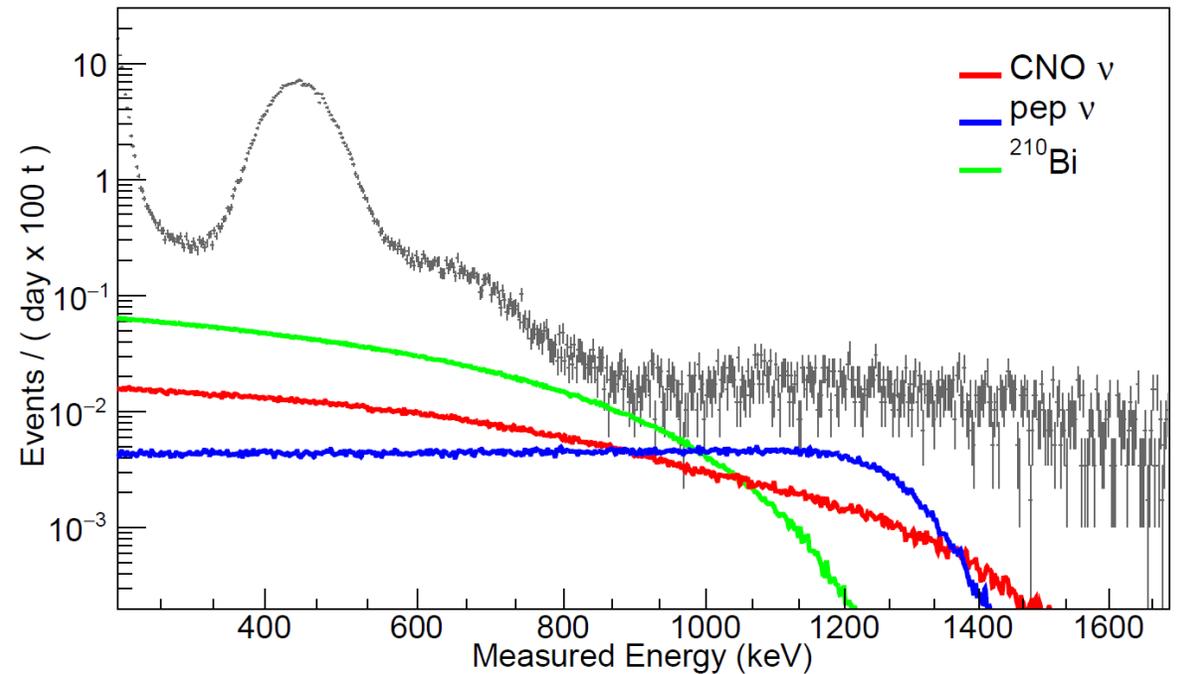
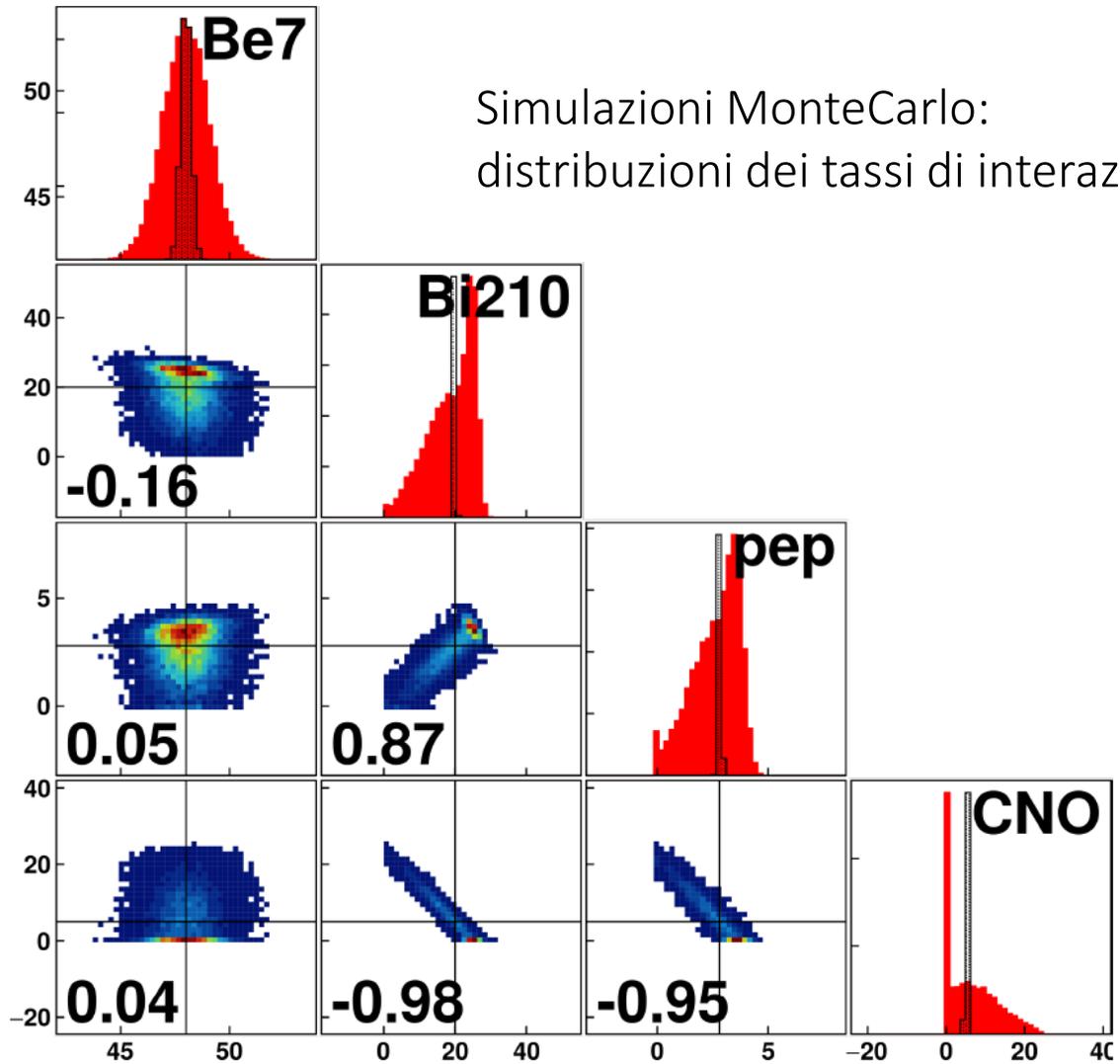
Stretta anticorrelazione tra
CNO ν , pep ν , ^{210}Bi

Senza vincoli sui tassi di
interazione, il fit spettrale fornisce
solo la somma dei tre!

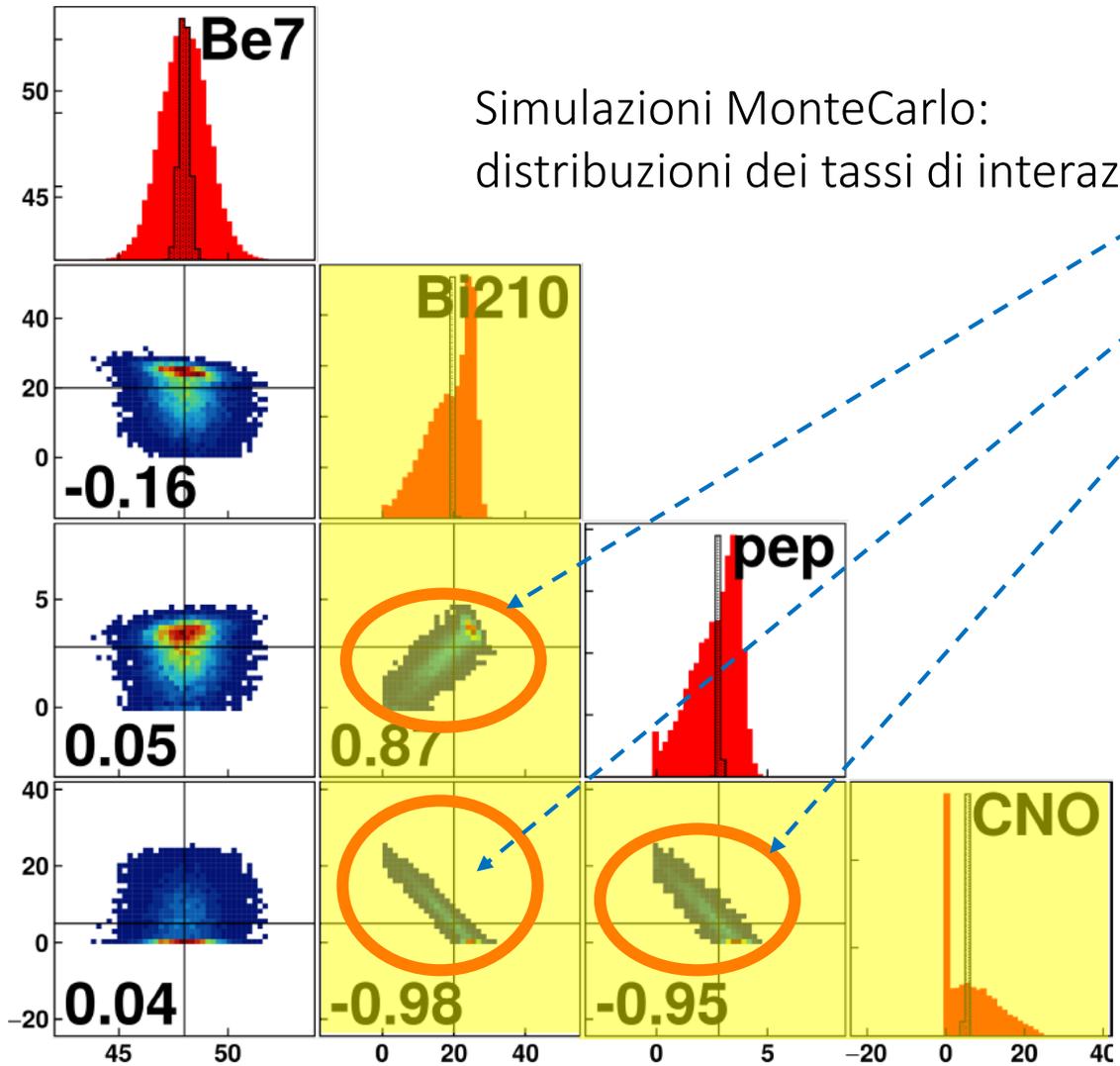
Tassi di interazione:

- $R(\text{CNO } \nu)_{\text{expected}} \sim 3\text{-}5 \text{ cpd}/100\text{ton}$
- $R(^{210}\text{Bi}) \sim 20 \text{ cpd}/100\text{ton}$
- [$R(\text{pep}) \sim 2.7 \text{ cpd}/100\text{ton}$]

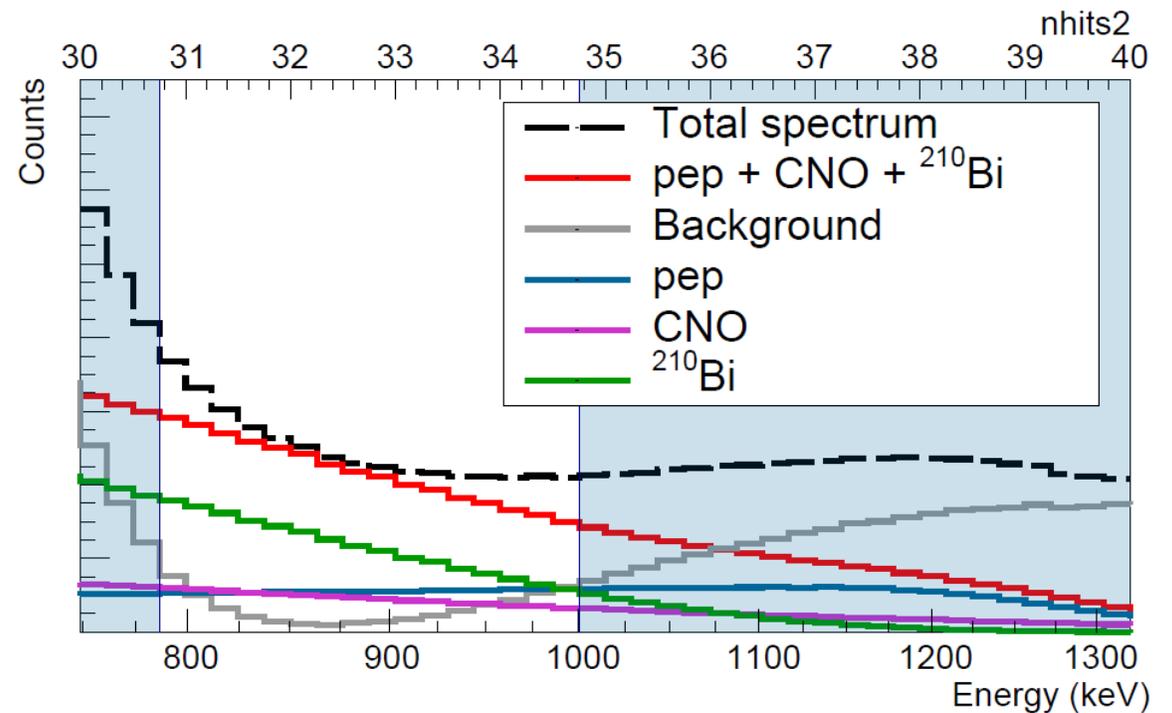
Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi



Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi



Stretta anticorrelazione tra
CNO ν , pep ν , ^{210}Bi



Anticorrelazione CNO ν – pep ν – ^{210}Bi

Servono due vincoli indipendenti dal fit spettrale

1. pep ν : vincolo di luminosità solare
2. ^{210}Bi : identificazione del ^{210}Po

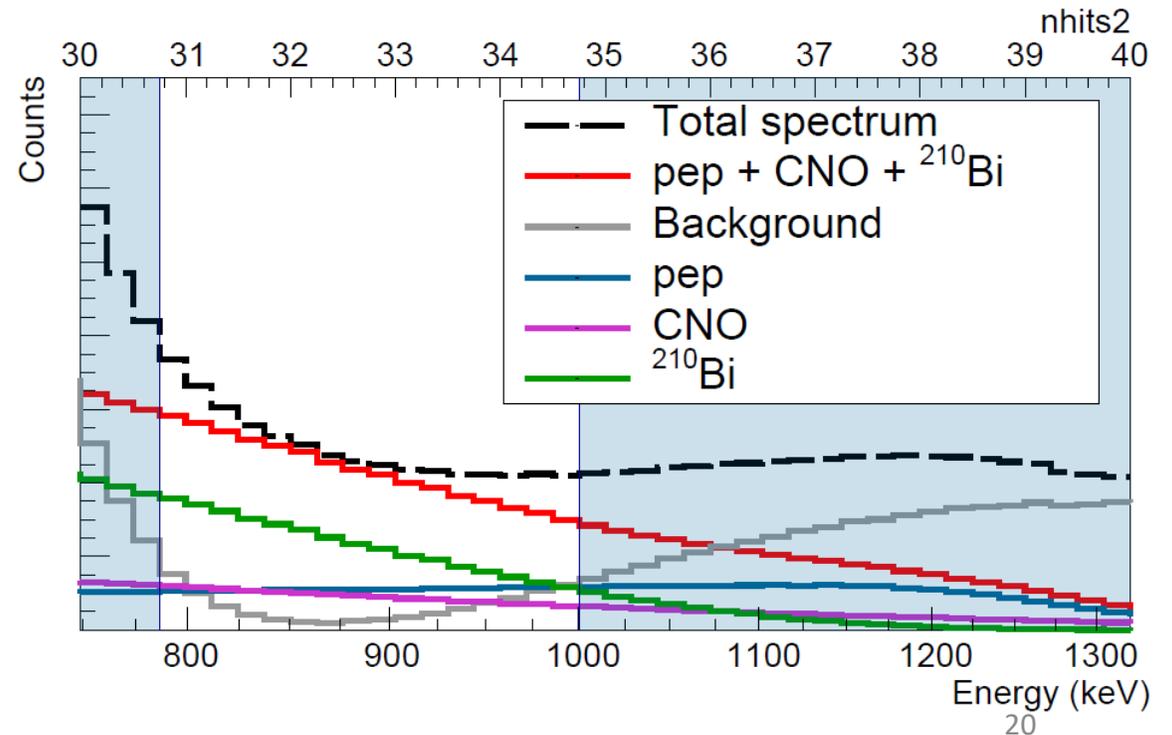
Analisi di conteggio (+ forma spettri)

i : componente di segnale o di fondo

R_i : tasso di interazione
 σ_i : incertezza su R_i
 f_i : frazione di eventi per i

$$N_{tot} \propto R_{CNO} f_{CNO} + R_{^{210}\text{Bi}} f_{^{210}\text{Bi}} + R_{pep} f_{pep}$$

$$\sigma_{CNO} \propto \frac{\sigma_{N_{tot}}}{f_{CNO}} \oplus \frac{f_{^{210}\text{Bi}}}{f_{CNO}} \sigma_{^{210}\text{Bi}} \oplus \frac{f_{pep}}{f_{CNO}} \sigma_{pep}$$



Vincolo per i pep ν

→ vincolo di luminosità solare

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} = \sum_i \alpha_i \Phi_i$$

L_{\odot} : luminosità solare alla superficie terrestre

d : distanza (media) Terra-Sole

Sommatoria sulle reazioni coinvolgenti neutrini

Φ_i : flussi di neutrini da pp e da CNO

α_i : coefficienti legati all'energia prodotta dal Sole nelle reazioni nucleari

Assunzioni di base:

- Il Sole è alimentato solo da reazioni della catena pp e del ciclo CNO
- Il Sole è in equilibrio dinamico in tempi di scala di 10^5 anni ($L_{\odot} = \text{cost.}$)

Vincolo per i pep ν

→ vincolo di luminosità solare

L_{\odot} : luminosità solare
alla superficie terrestre

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} = \sum_i \alpha_i \Phi_i \approx \alpha_{pp} \Phi_{pp}$$

Φ_i : flussi di neutrini
da pp e da CNO

L_{\odot} nota con precisione 0.4%,
 α_i note con precisione 10^{-5}

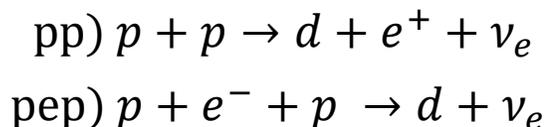
$\Phi(pp)$ noto
con precisione
1%

+

$\Phi(pp)/\Phi(pep)$
noti con
precisione <1%

$\Phi(pep)$ noto con
precisione $\approx 1\%$

Reazioni pp e pep : stesso
elemento di matrice

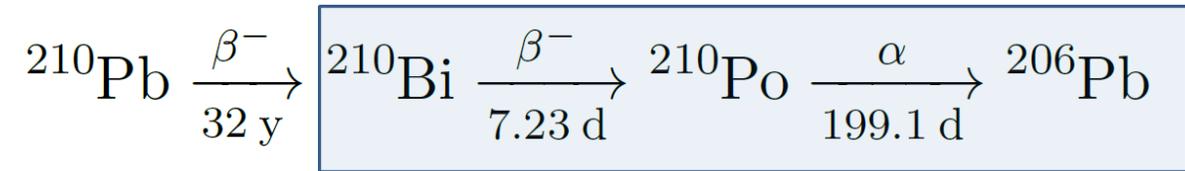


Vincolo al ^{210}Bi : dal ^{210}Po al ^{210}Bi

Stima indipendente del tasso di interazione del ^{210}Bi

Analisi ^{210}Bi - ^{210}Po :

Estrarre il tasso di decad. del ^{210}Bi dallo studio dei decadimenti del ^{210}Po

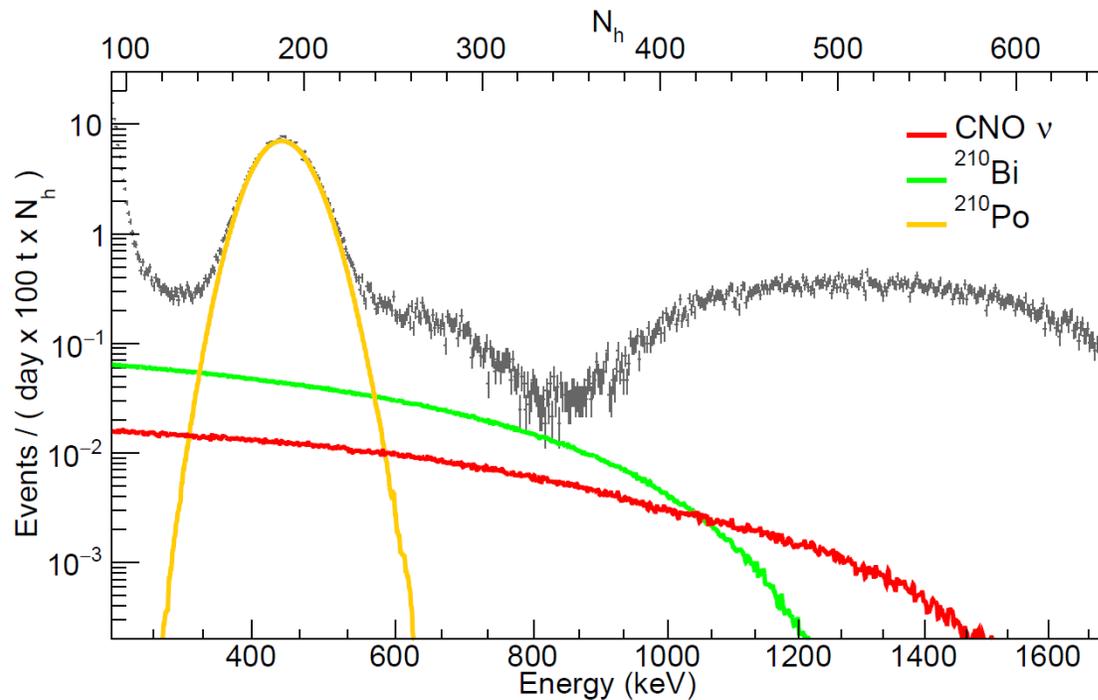
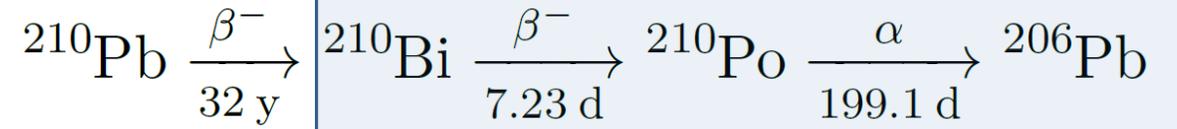


Vincolo al ^{210}Bi : dal ^{210}Po al ^{210}Bi

Stima indipendente del tasso di interazione del ^{210}Bi

Analisi ^{210}Bi - ^{210}Po :

Estrarre il tasso di decad. del ^{210}Bi dallo studio dei decadimenti del ^{210}Po



^{210}Po è più “facile” da identificare rispetto al ^{210}Bi :

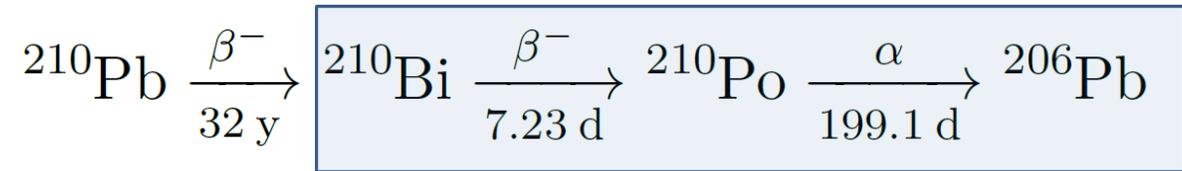
- Monoenergetico → picco “gaussiano”
- Decadimento α → forma del segnale in tempo

Vincolo al ^{210}Bi : dal ^{210}Po al ^{210}Bi

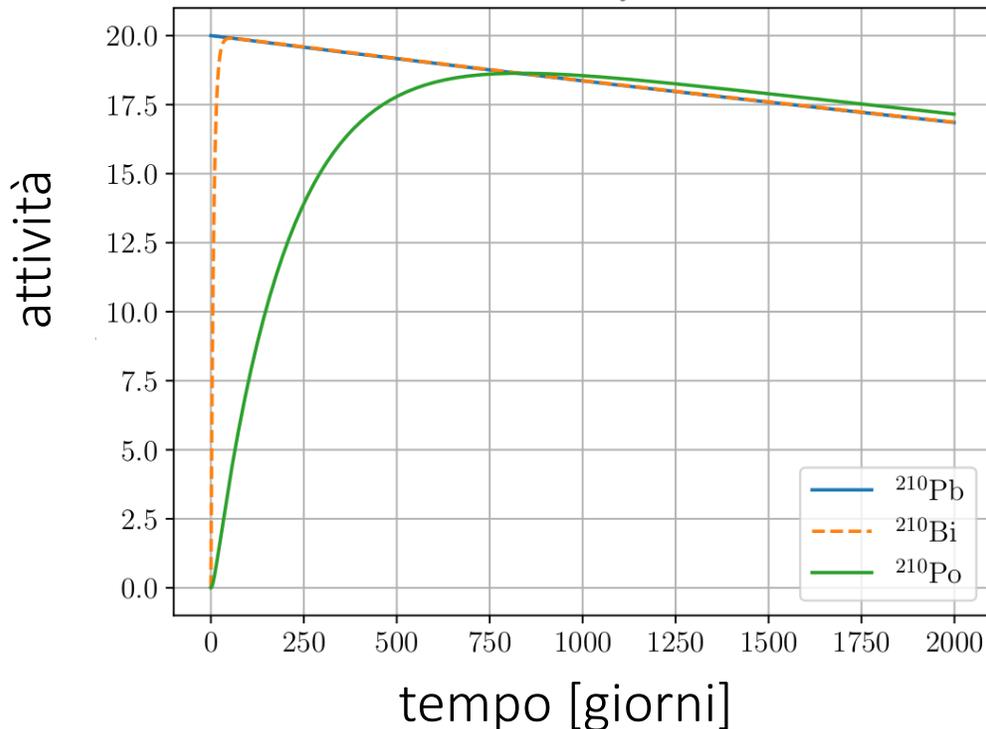
Stima indipendente del tasso di interazione del ^{210}Bi

Analisi ^{210}Bi - ^{210}Po :

Estrarre il tasso di decad. del ^{210}Bi dallo studio dei decadimenti del ^{210}Po



A=210 decay chain

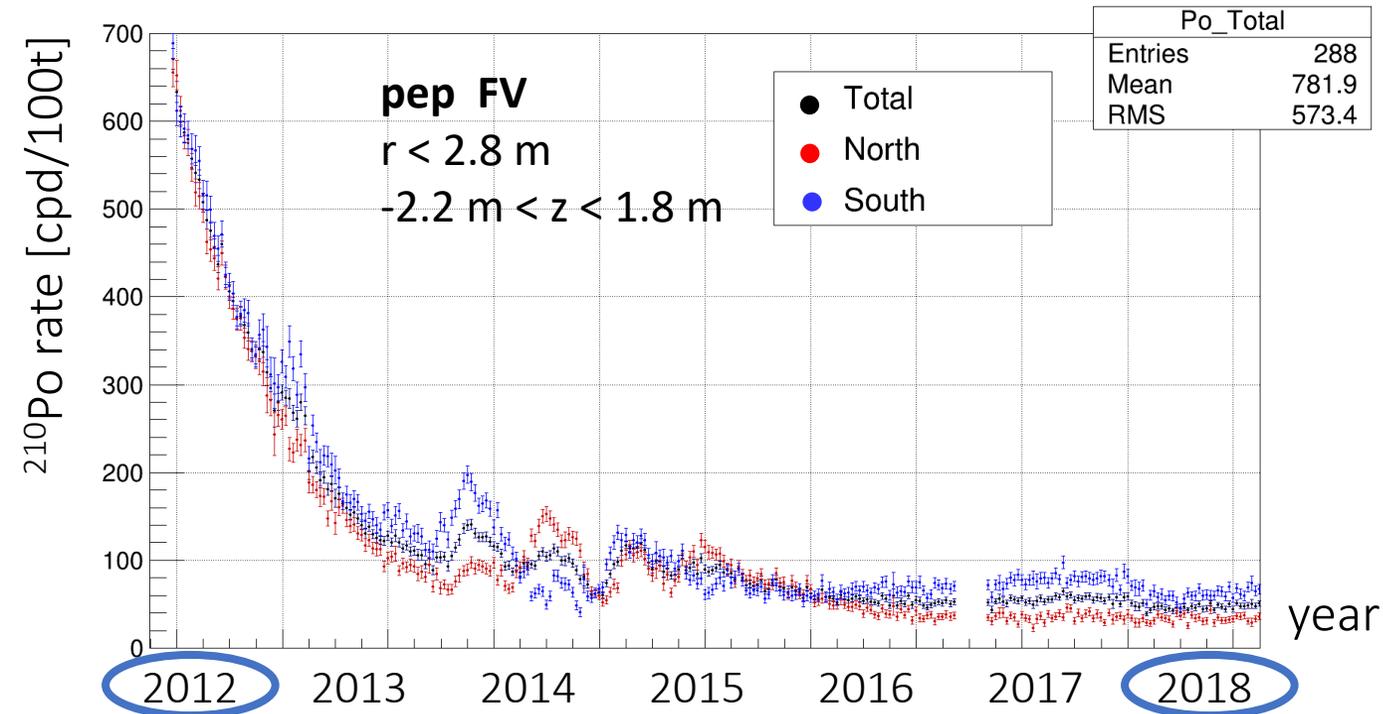


^{210}Po è più “facile” da identificare rispetto al ^{210}Bi :

- Monoenergetico \rightarrow picco “gaussiano”
- Decadimento α \rightarrow forma del segnale in tempo

Se il ^{210}Bi è in equilibrio con il ^{210}Po , una misura indipendente del tasso di interazione di quest’ultimo permette di ricavare il tasso del ^{210}Bi

Evoluzione del tasso di ^{210}Po nel tempo



Andamento decrescente:

^{210}Po fuori dall'equilibrio!
 (~1400 cpd/100ton nel 2012)

Andamenti irregolari/ "oscillatori" :

dovuti alle variazioni di temperatura dello scintillatore (correlate con la stagione)

$$R_{\text{Po}}(t) = (A - B)e^{-t/\tau_{\text{Po}}} + B$$

$$\tau_{\text{Po}} \approx 200 \text{ giorni}$$

A: "termine non supportato", fuori dall'equilibrio

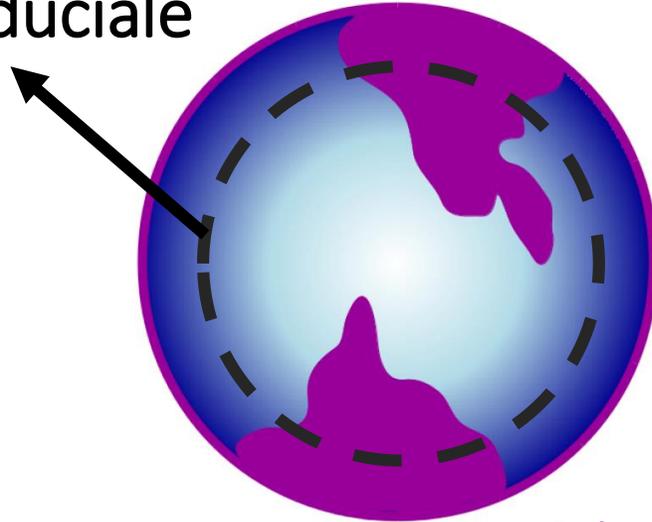
B: "termine supportato", legato al ^{210}Bi

Capire la validità di questa reazione e quantificare il termine B!

Diffusione e convezione

Il ^{210}Po si muove nello scintillatore a causa dei gradienti termici

Volume fiduciale



Un puro decadimento esponenziale è impedito per via dei forti moti convettivi (viola) dovuti al cambio di temperatura nelle diverse stagioni.

Polonio in movimento
tramite convezione

$$\partial_t \rho(r) = D \nabla^2 \rho(r) - \frac{\rho(r)}{\tau_{\text{Po}}} \longrightarrow \rho(r) = \rho_0 \frac{\sinh(r/\lambda)}{r/\lambda}$$

Lunghezza di diffusione
 $\lambda = \sqrt{D \tau_{\text{Po}}} \approx 20 \text{ cm}$

Come smorzare i gradienti termici?

Isolamento termico



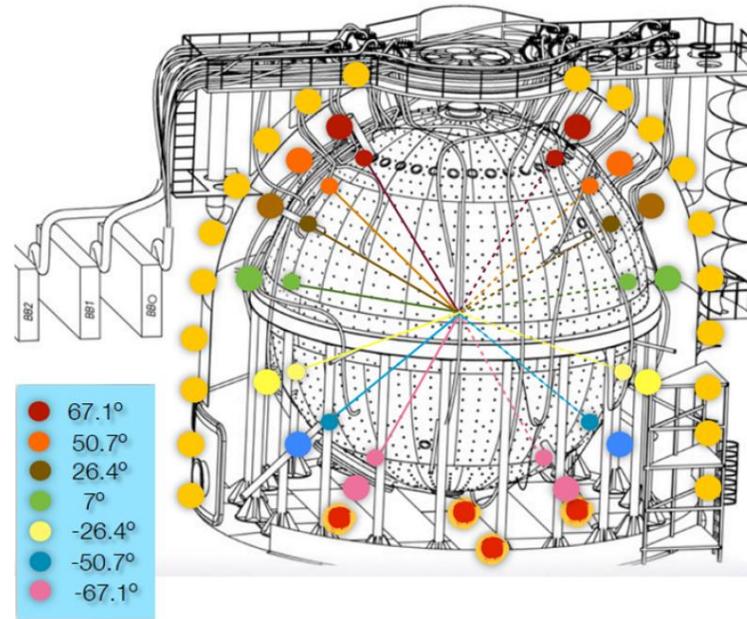
- Doppio strato di lana di roccia
- Sistema attivo di stabilizzazione
- Stabilizzazione termica in Sala C dei LNGS

Come smorzare i gradienti termici?

Isolamento termico



Monitoraggio della temperatura



54 sonde

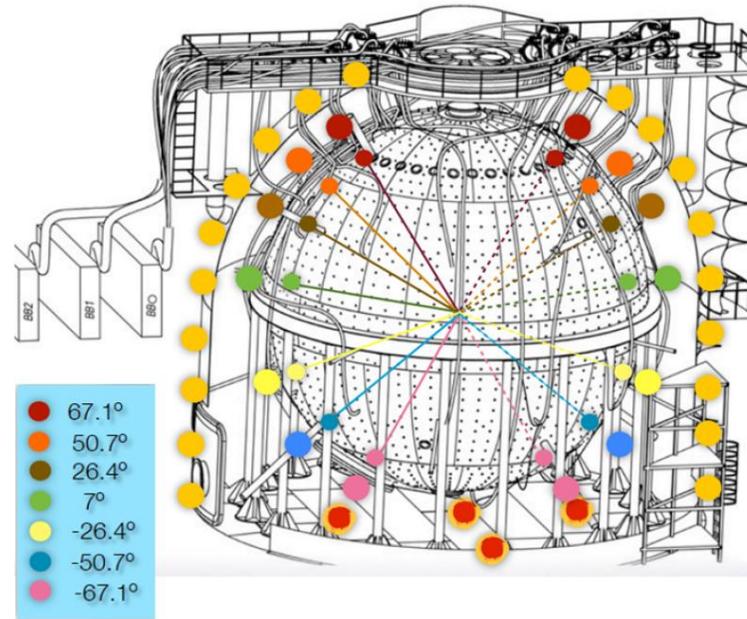
- Doppio strato di lana di roccia
- Sistema attivo di stabilizzazione
- Stabilizzazione termica in Sala C dei LNGS

Come smorzare i gradienti termici?

Isolamento termico

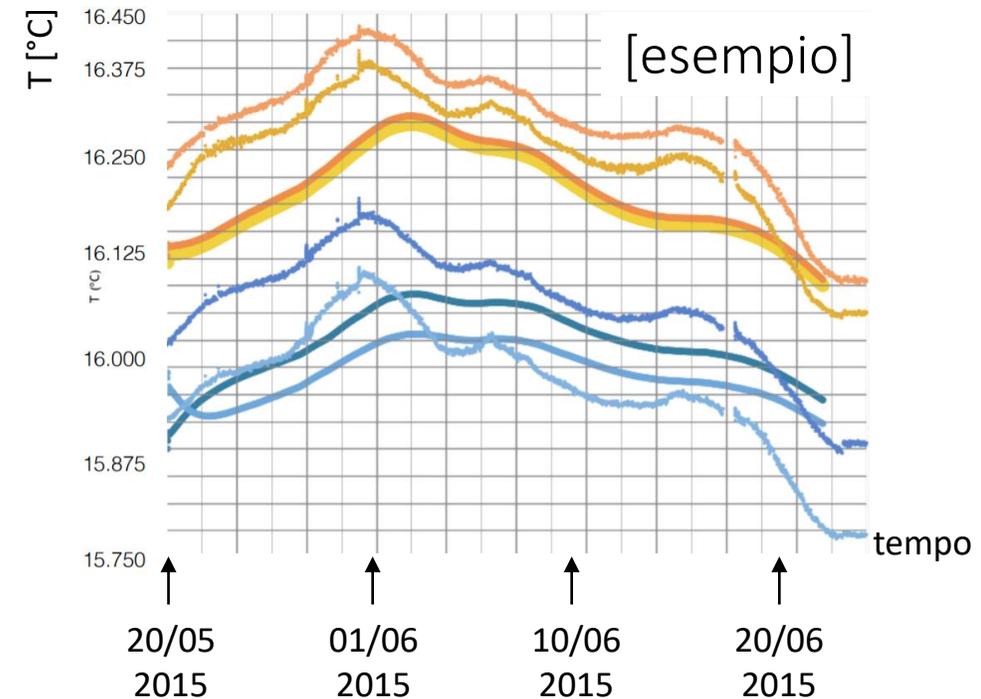


Monitoraggio della temperatura



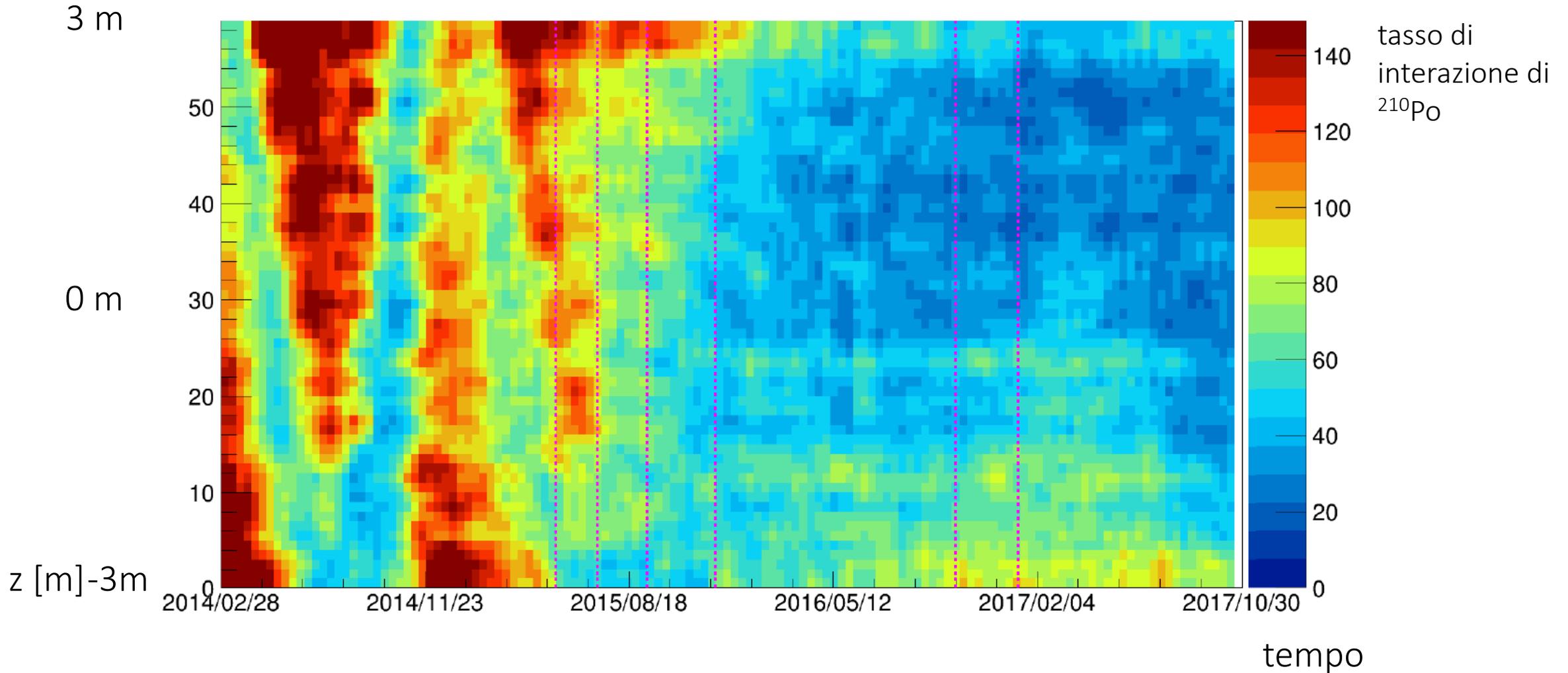
54 sonde

Simulazioni fluidodinamiche

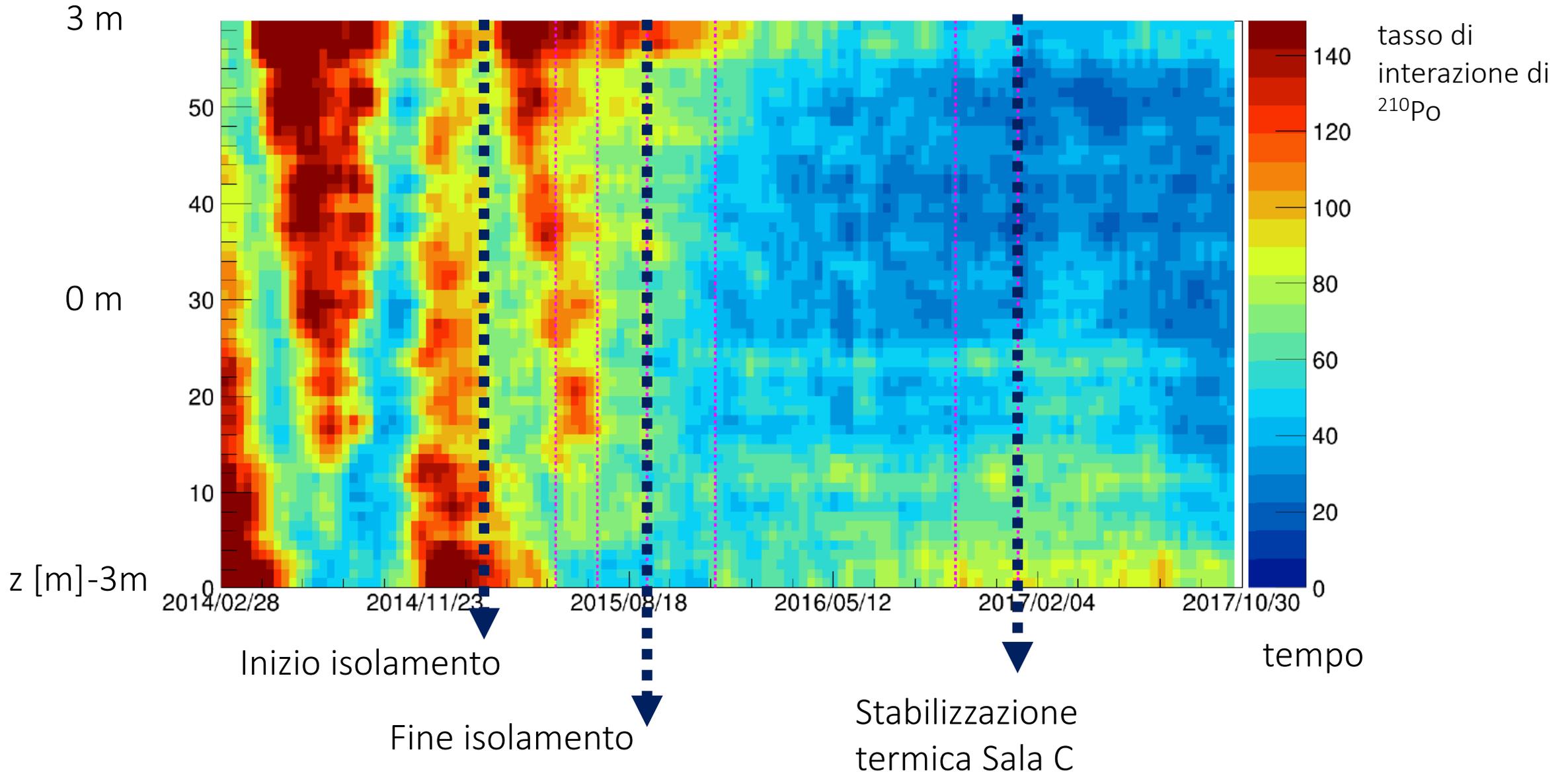


- Doppio strato di lana di roccia
- Sistema attivo di stabilizzazione
- Stabilizzazione termica in Sala C dei LNGS

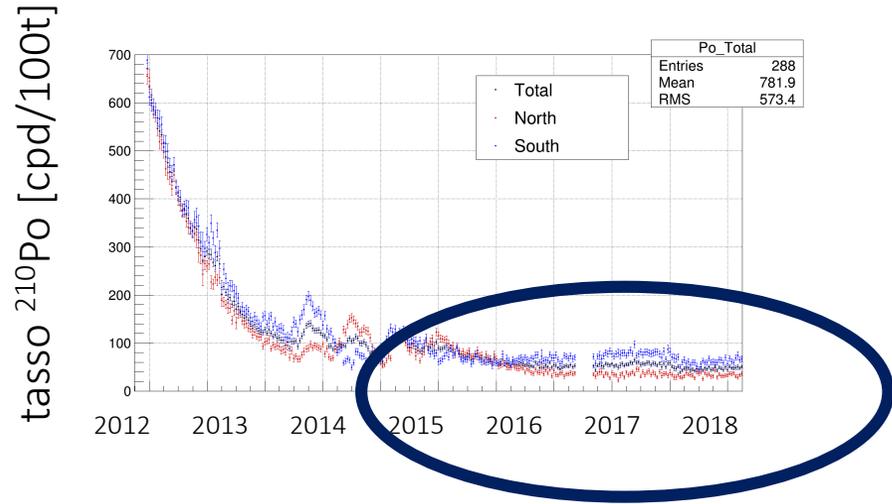
^{210}Po nel tempo – Effetti dell'isolamento termico



^{210}Po nel tempo – Effetti dell'isolamento termico

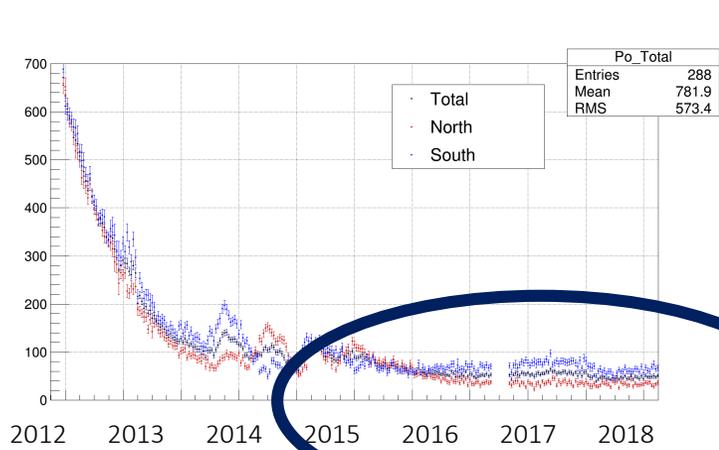


^{210}Po nel tempo – Dal 2015 ad oggi

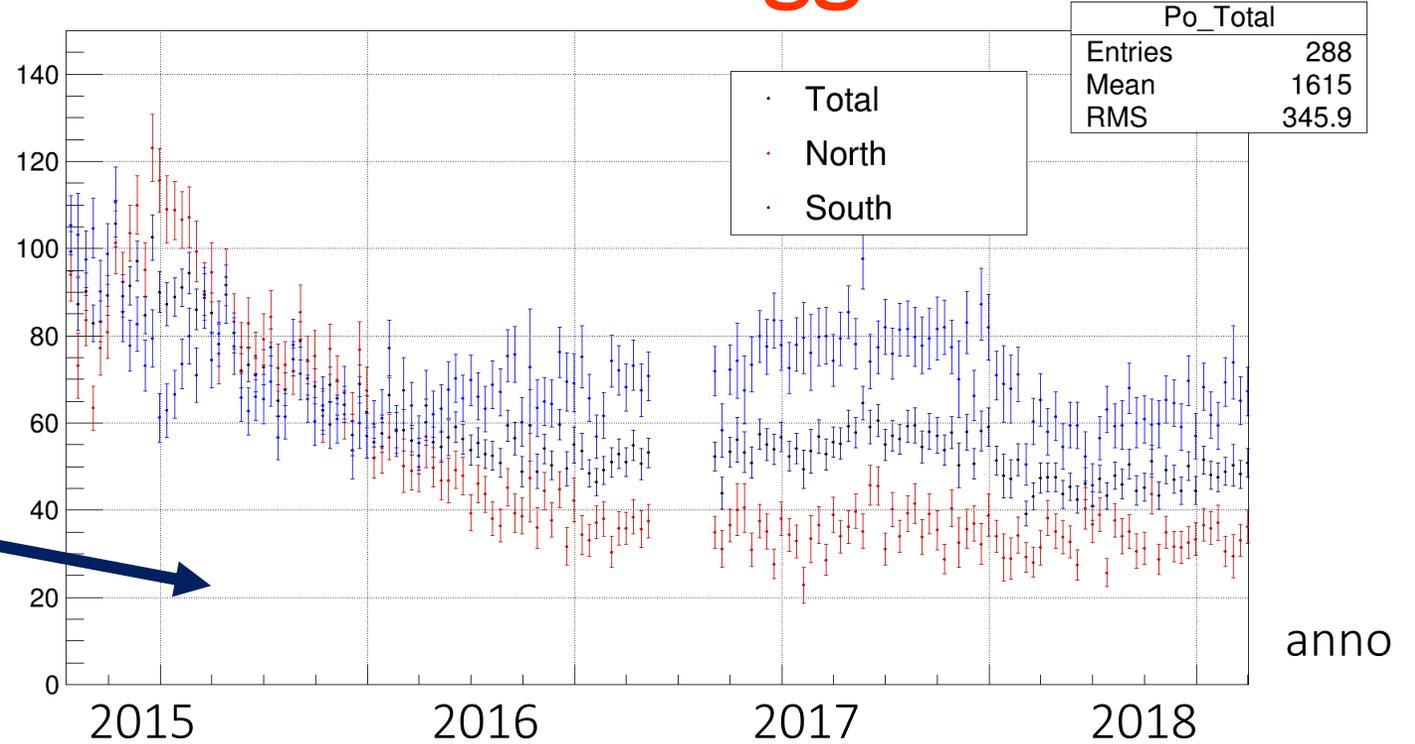


^{210}Po nel tempo – Dal 2015 ad oggi

tasso ^{210}Po [cpd/100t]



tasso ^{210}Po [cpd/100t]



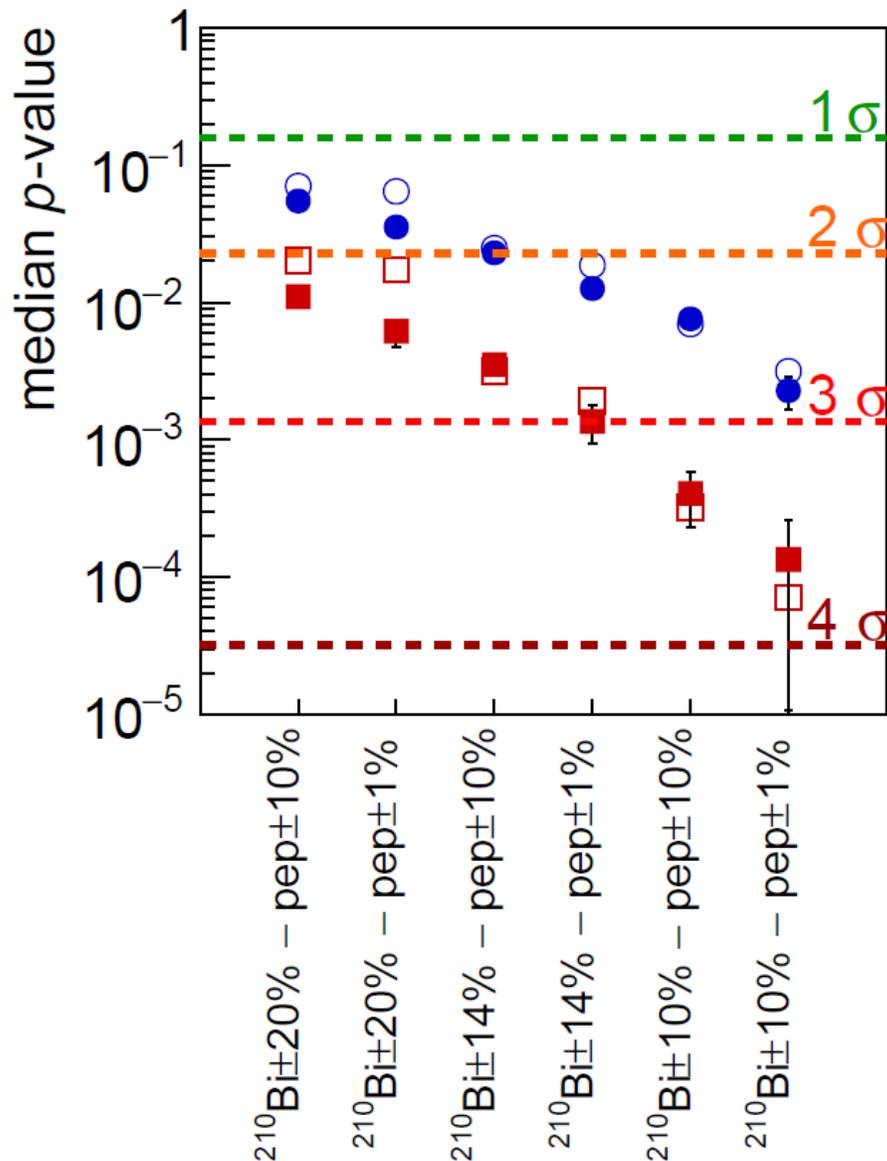
Dal 2016:

- Decrescita globale del tasso
- Effetti al secondo ordine / oscillazioni
- Meno moti convettivi, meno disomogeneità



Analisi in corso!

Sensitività alla rivelazione dei CNO ν



= di che precisione abbiamo bisogno nella misura di ^{210}Bi e pep?

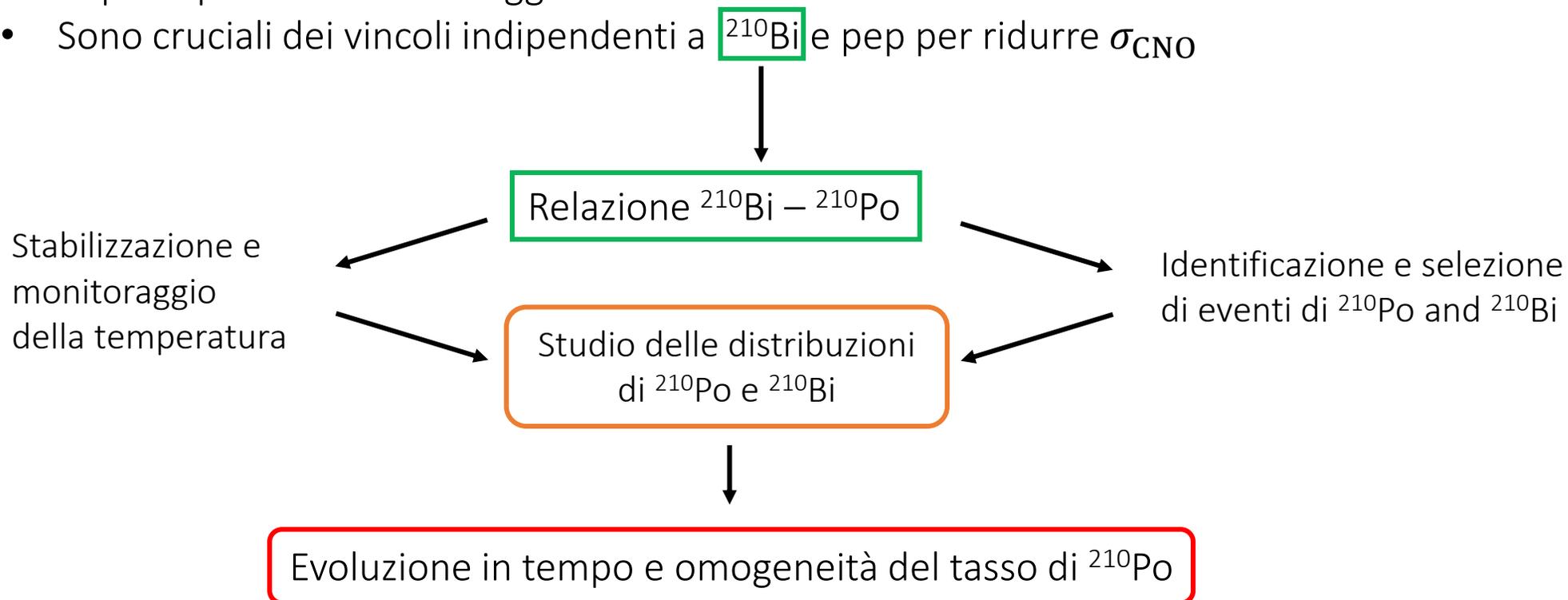
- Bassa metallicità solare – analisi di conteggio
- Bassa metallicità solare – analisi di conteggio+forma
- Alta metallicità solare – analisi di conteggio
- Alta metallicità solare – analisi di conteggio+forma

- Sensitività valutata tramite test di ipotesi basate su *profiled likelihood*
- Vincoli sulle forme spettrali particolarmente efficienti in caso di vincoli deboli sui tassi di interazione
- (L'alta metallicità aiuterebbe!)

Per un'evidenza a 3σ , con un tasso di $^{210}\text{Bi} \approx 15\text{-}20$ cpd/100t, servirebbe almeno $\sigma_{^{210}\text{Bi}} \approx 10\%$

Conclusioni

- In linea di principio, Borexino è un rivelatore adatto alla rivelazione del flusso di CNO ν ; studi di sensitività mostrano che per un'evidenza a 3σ l'obiettivo è $\sigma_{210\text{Bi}} \approx 10\%$
- Analisi principalmente di conteggio
 - Sono cruciali dei vincoli indipendenti a ^{210}Bi e pep per ridurre σ_{CNO}



Grazie!

Backup

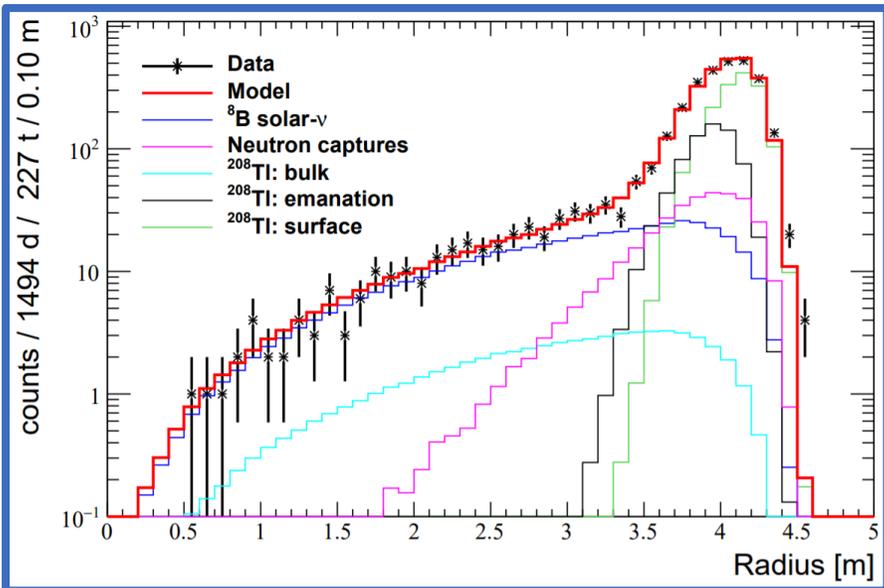
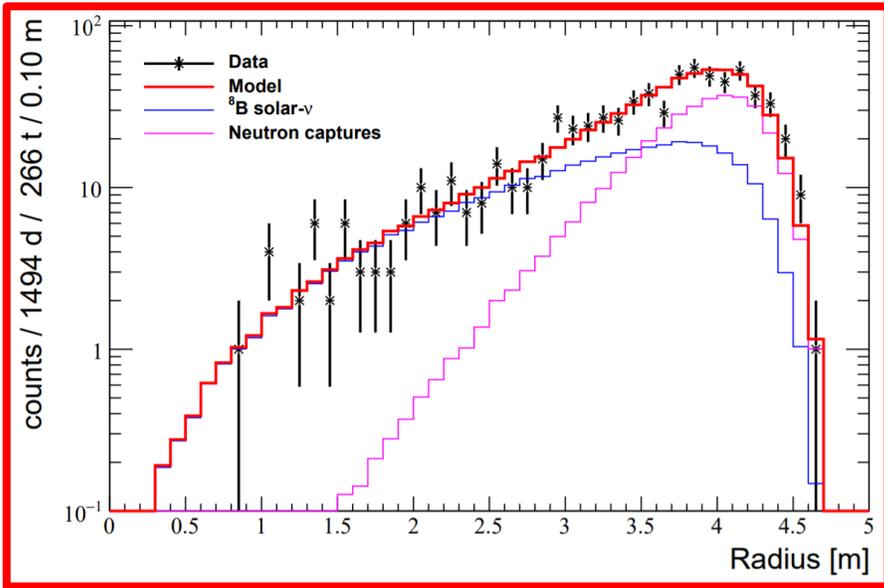
Risultati dei fit

ν solari	Rate (cpd/100 t)	Flusso ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Flux –SSM predictions B16 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1. \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1. \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
^7Be	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
^8B	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	< 8.1 (95 % C.L.)	$< 7.9 \times 10^8$ (95 % C.L.)	$4.92(1. \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.52(1. \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	< 0.002 (90% C.L.)	$< 2.2 \times 10^5$ (90 % C.L.)	$7.98(1. \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1. \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

[cpd/100ton: conteggi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore]

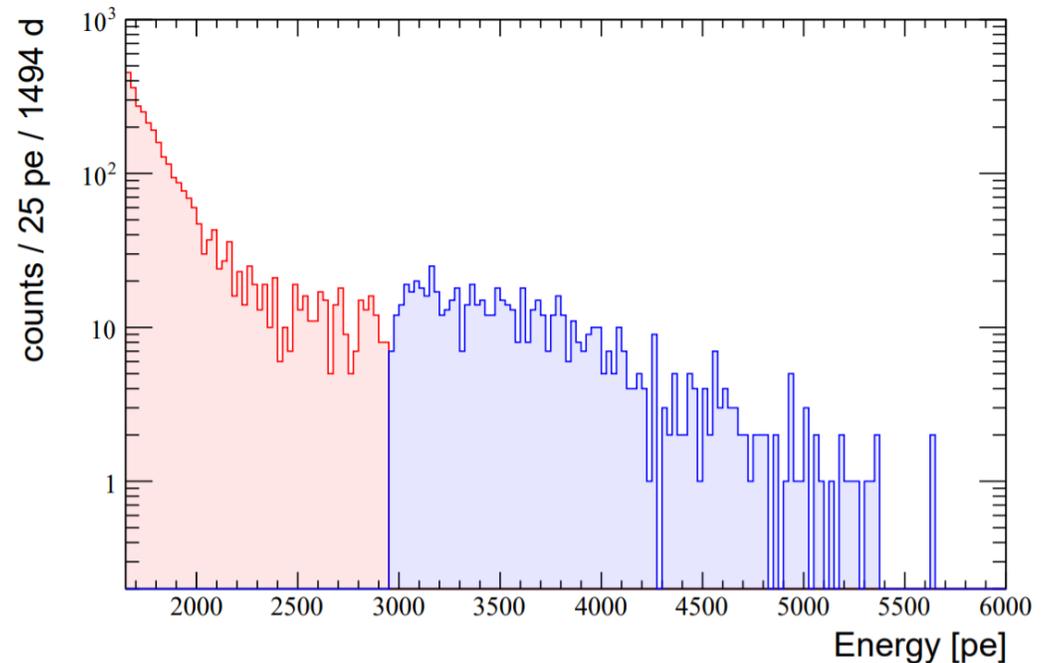
- Risultati compatibili rispetto alla Fase 1 e **precisione migliorata**
- **Assenza di neutrini pep rigettata ad oltre 5σ / Limite su CNO**
- La simultaneità del fit a bassa E limita possibili correlazioni tra le specie di neutrini

Fit per neutrini da ^8B



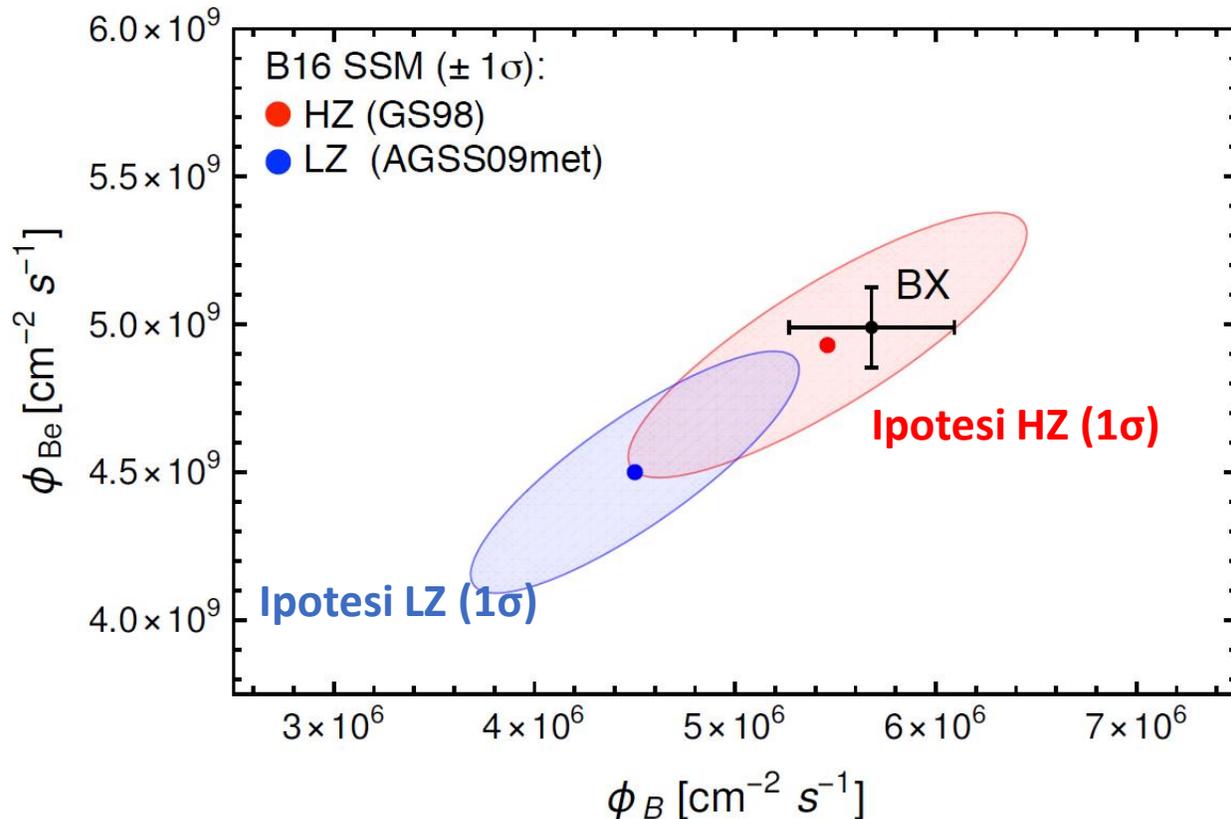
- Analisi separata
- Esposizione 11.5 volte Fase 1
- Fit **radiale** in due finestre di energia separate per la gestione del fondo: **3.2-5 MeV** e **5-17 MeV**
- Precisione sul flusso: **8%**

Eventi di ^8B dopo selezione



Implicazioni: metallicità solare

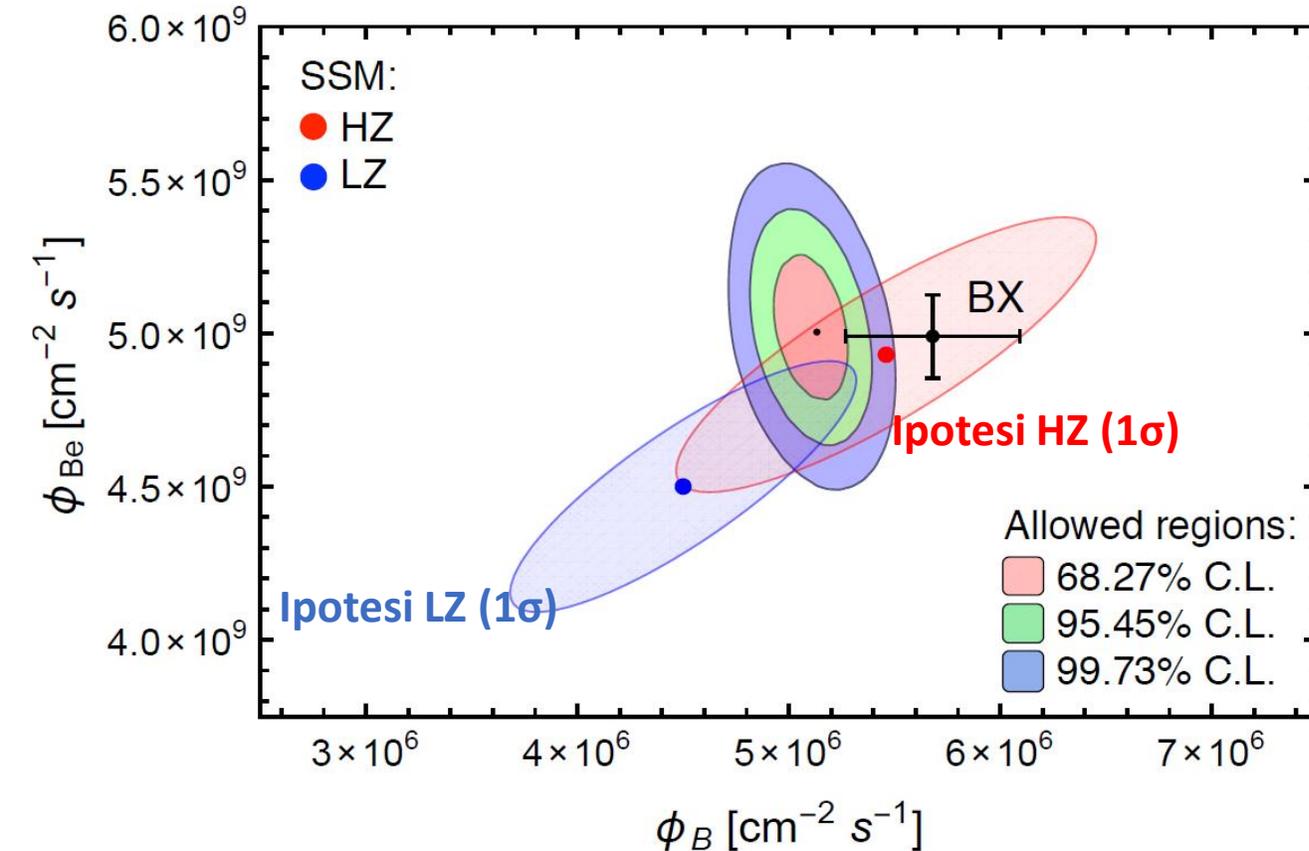
Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



- v da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$: modello con differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Incertezza dominante: teorica, su modelli solari

Indicazione debole **verso alta met.**
(bassa met. sfavorita a 1.5σ)

Metallicità solare – Fit globale



- ν da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$: differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Fit globale: esperimenti su neutrini solari + KamLand

Implicazioni: fusione solare

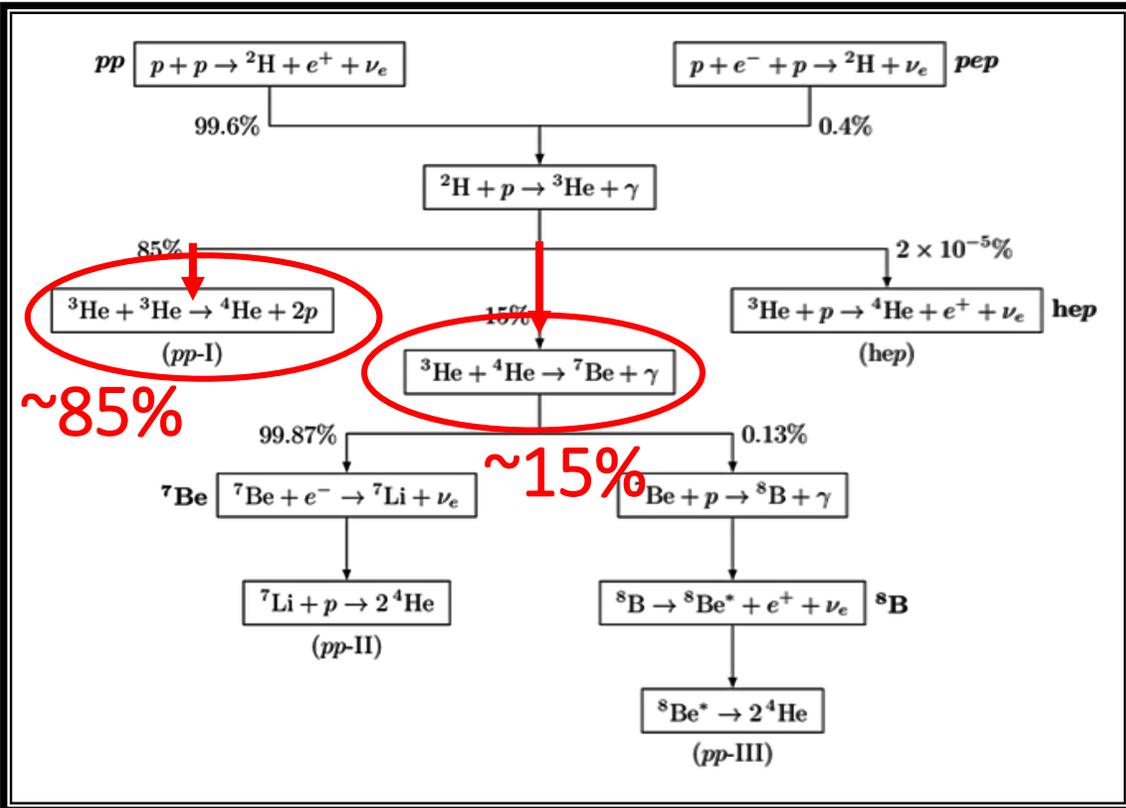
- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da ${}^7\text{Be}$)

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

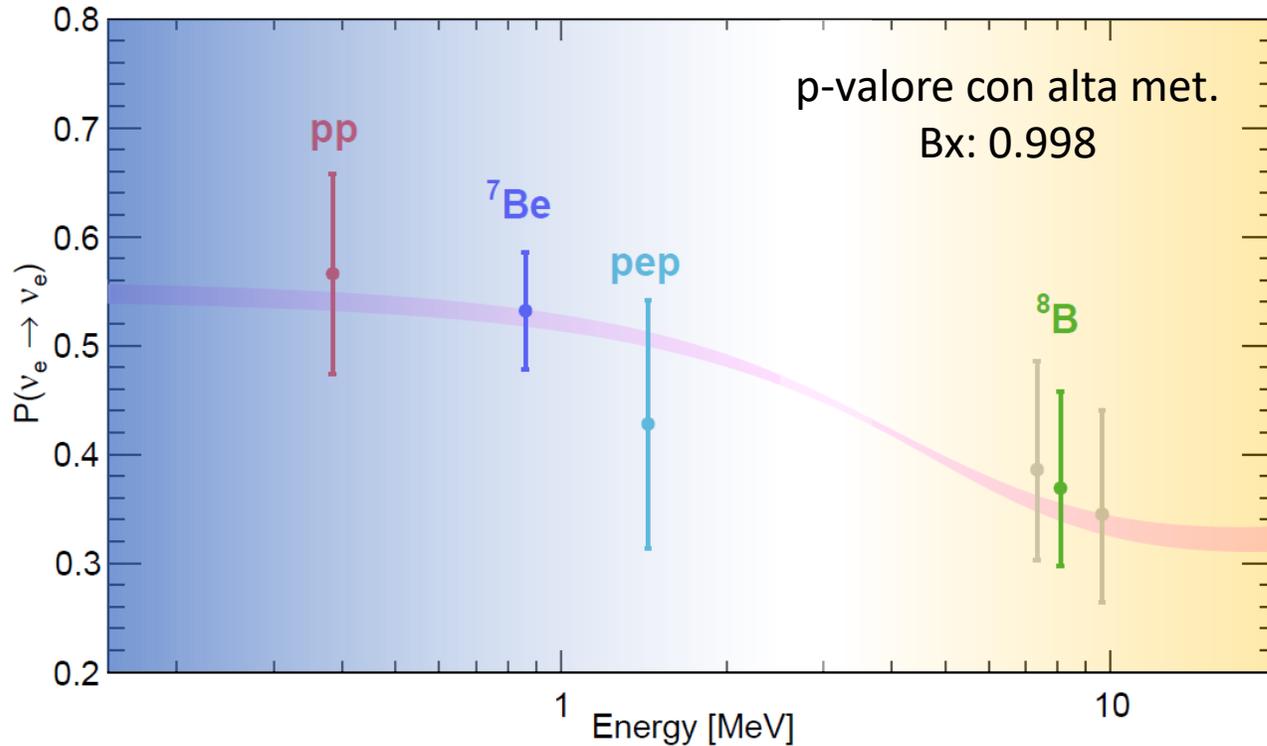
- Test sperimentale per la fusione solare

Predizione teorica:
 $R(\text{HZ}) = 0.18 \pm 0.01$
 $R(\text{LZ}) = 0.16 \pm 0.01$

Borexino:
 $R = 0.18 \pm 0.02$



Implicazioni: probabilità di sopravvivenza ν_e



- Rate di interazione \rightarrow probabilità di sopravvivenza ν_e a diverse energie $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione ν_e secondo MSW-LMA**
 - Bassa E: miglior precisione finora
 - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**
dominante

osc. **nella materia**
dominante

In accordo con oscillazione con
parametri MSW-LMA