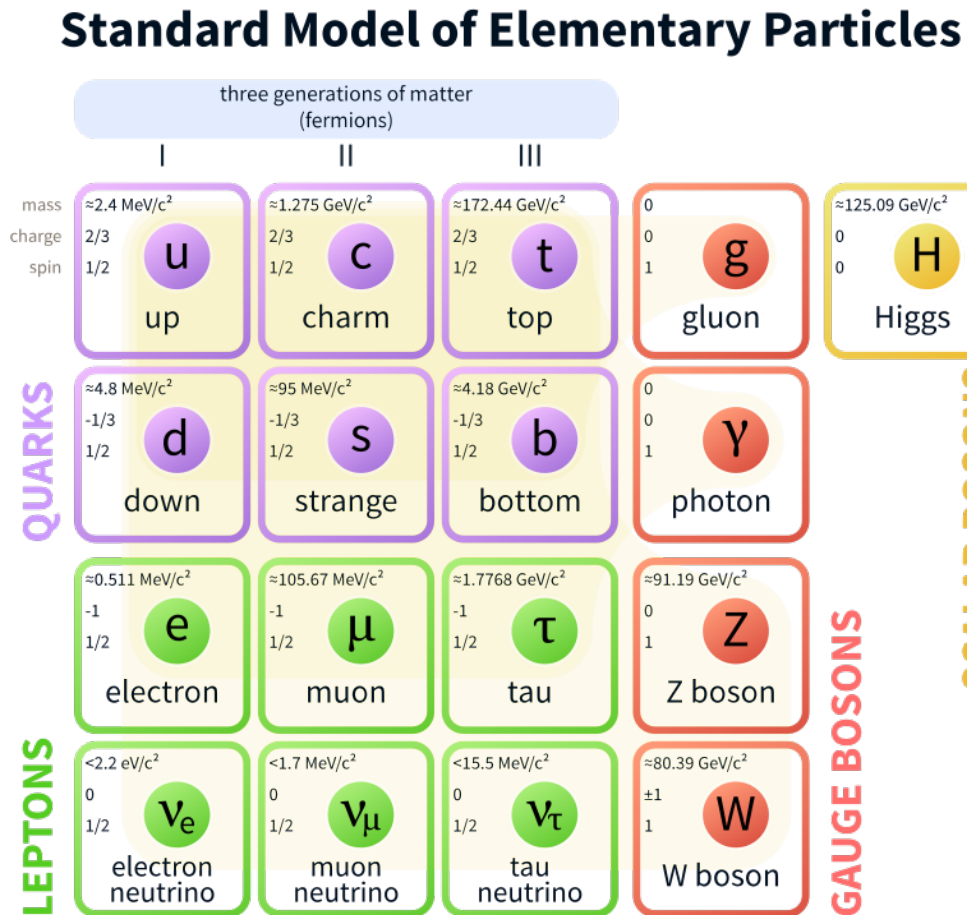


**Seminario divulgativo:
Studio delle proprietà del Sole e della
Terra attraverso la rivelazione
di neutrini con l'esperimento Borexino**

Alessio Caminata

10 Maggio 2017

Fisica del neutrino



- Unici leptoni neutri:
 - interagiscono solo debolmente
 - **piccole sezioni d'urto**
- Hanno **massa molto piccola**
 - $m < 2 \text{ eV}/c^2$ ($m_\nu/m_e < 4 \times 10^{-6}$)
- Gli autostati di sapore non coincidono con autostati di massa
 - **oscillazione di sapore**
 - Violazione numero leptonico di famiglia

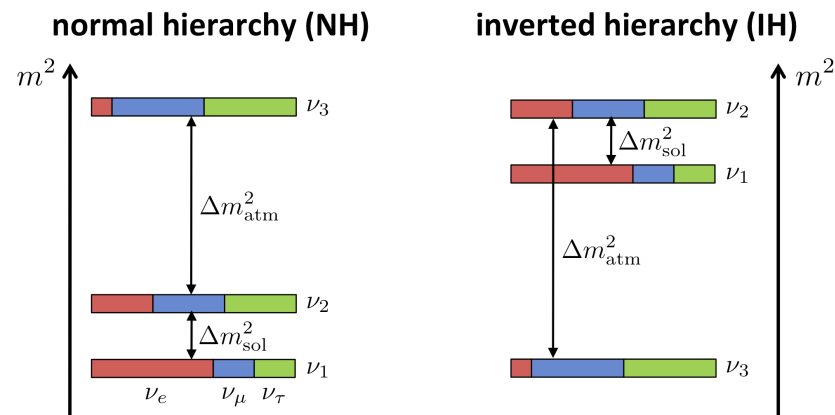
Oscillazioni di sapore

- Nel caso di ν emesso in stato α e rivelato a distanza L dal punto di generazione la probabilità di oscillazione è

$$P_{\alpha \rightarrow \beta, \alpha \neq \beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2] [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right)$$

dove $\Delta m^2_{\beta\alpha} = m^2_{\beta} - m^2_{\alpha}$ [approssimazione 2 sapori (α, β)]

- L'evidenza sperimentale delle oscillazioni di sapore implica che la **massa del neutrino è diversa da zero** (almeno per due sapori)



Oscillazioni di sapore

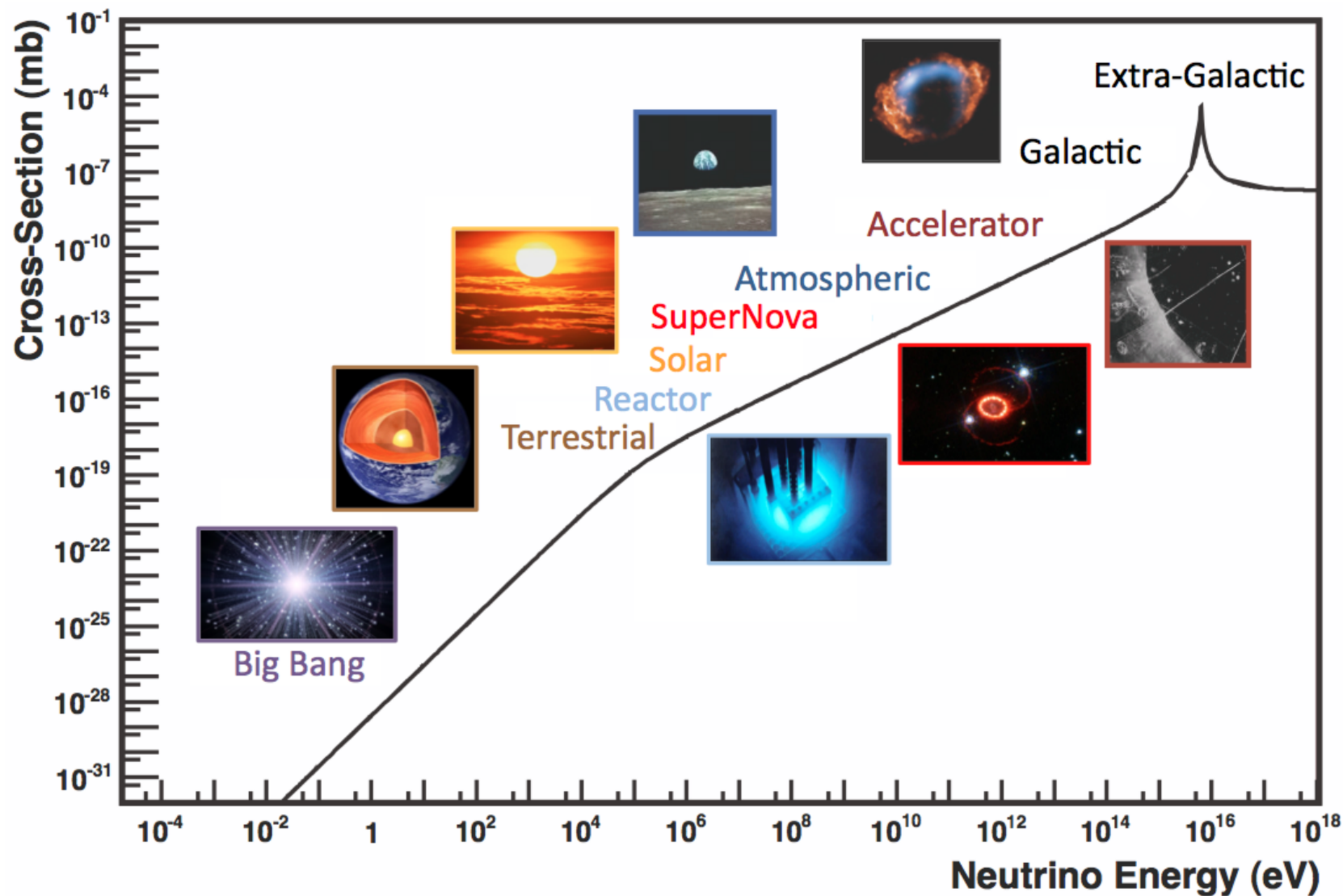
- Nel caso di tre sapori il mixing si può descrivere:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

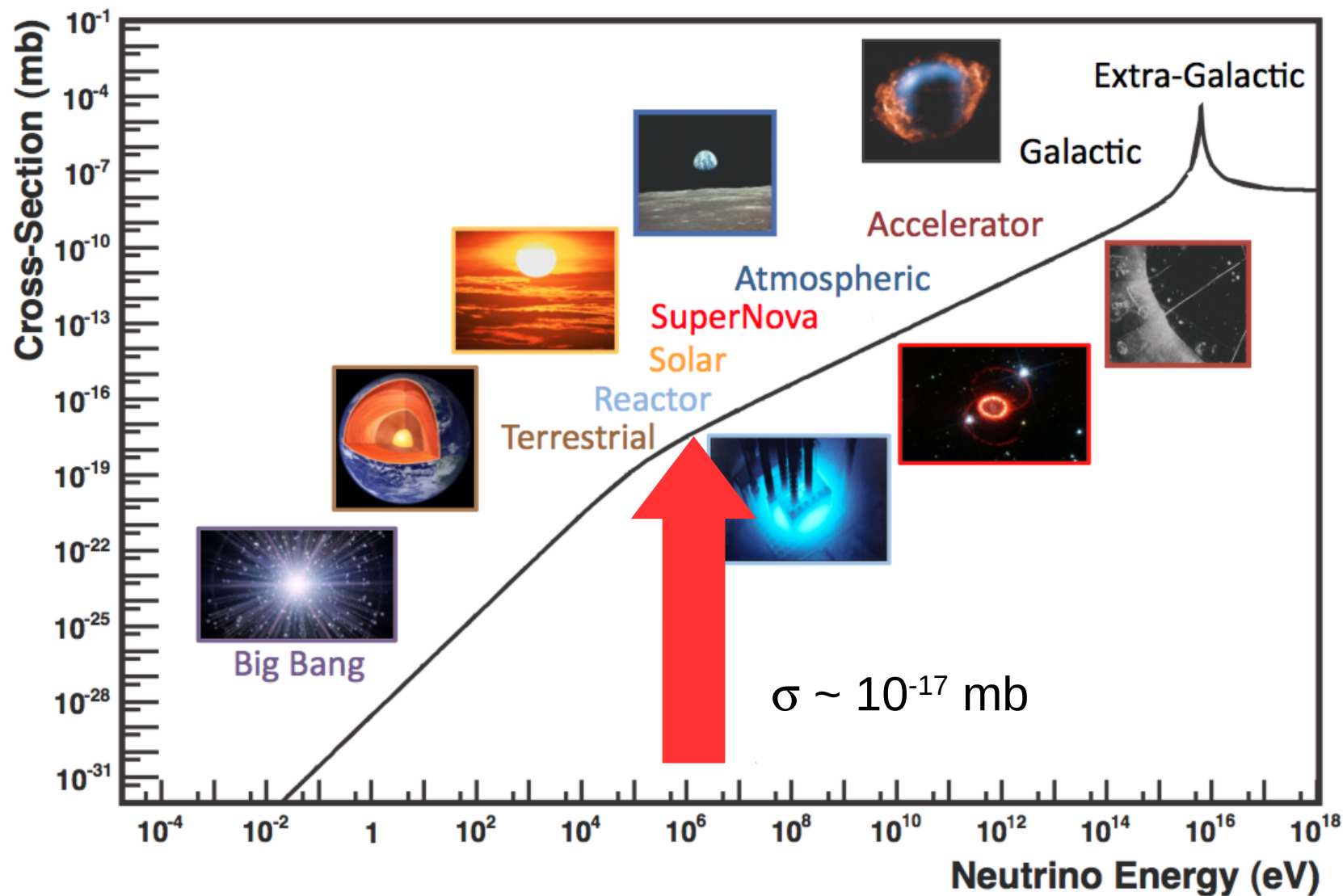
$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$ e $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$ e ν di Dirac
- In definitiva la matrice U contiene 3 angoli θ_{ij} ed 1 fase δ

Sorgenti di neutrini e sezioni d'urto



Sorgenti di neutrini e sezioni d'urto



Proprietà misurate

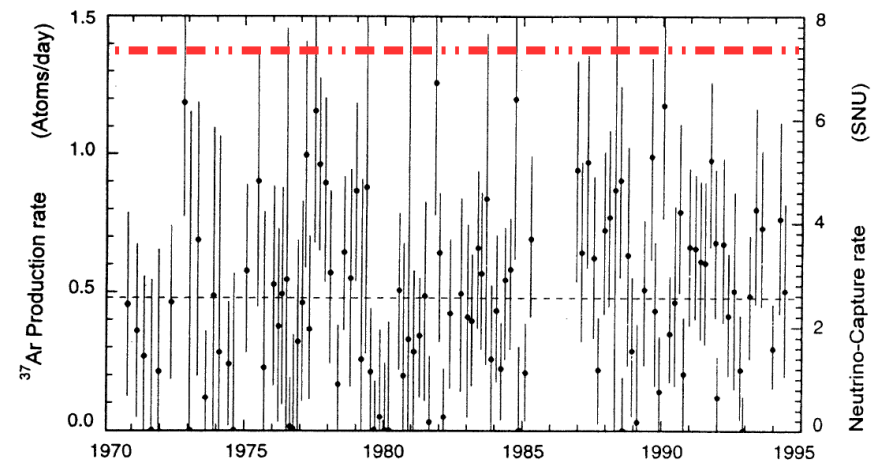
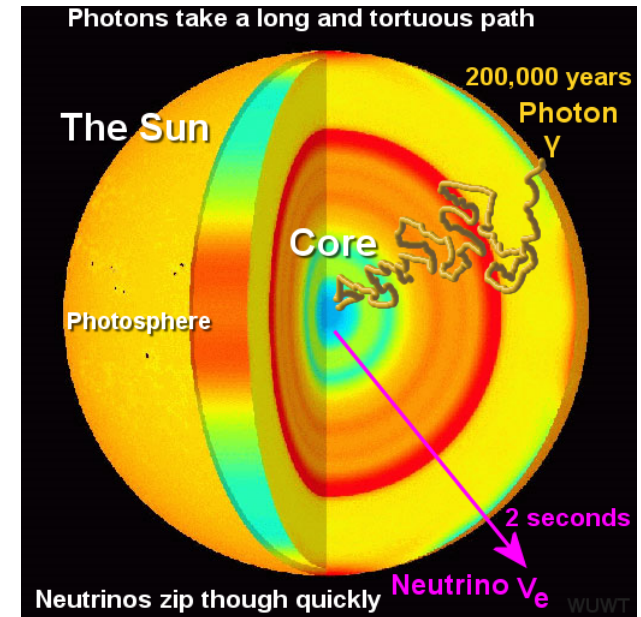
Parameter	best-fit	3σ
Δm_{21}^2 [10^{-5} eV ²]	7.37	6.93 – 7.97
$ \Delta m^2 $ [10^{-3} eV ²]	2.50 (2.46)	2.37 – 2.63 (2.33 – 2.60)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.297	0.250 – 0.354
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 > 0$	0.437	0.379 – 0.616
$\sin^2 \theta_{23}, \Delta m^2 < 0$	0.569	0.383 – 0.637
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 > 0$	0.0214	0.0185 – 0.0246
$\sin^2 \theta_{13}, \Delta m^2 < 0$	0.0218	0.0186 – 0.0248
δ/π	1.35 (1.32)	$(0.92 - 1.99)$ $((0.83 - 1.99))$

} 2 σ

$\Delta m^2 > 0$ gerarchia diretta, $\Delta m^2 < 0$ gerarchia inversa

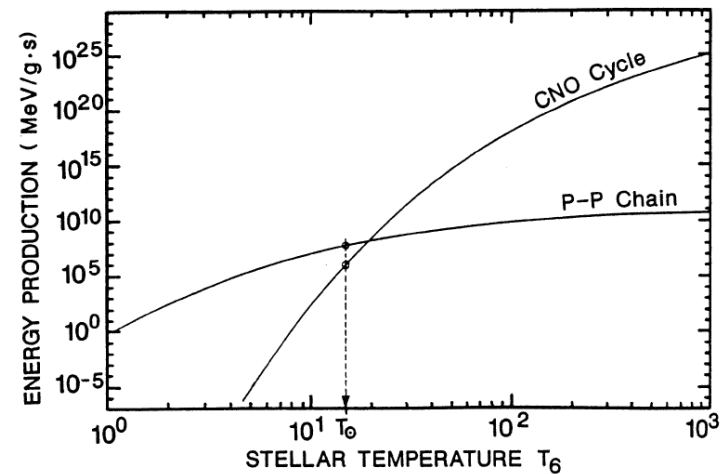
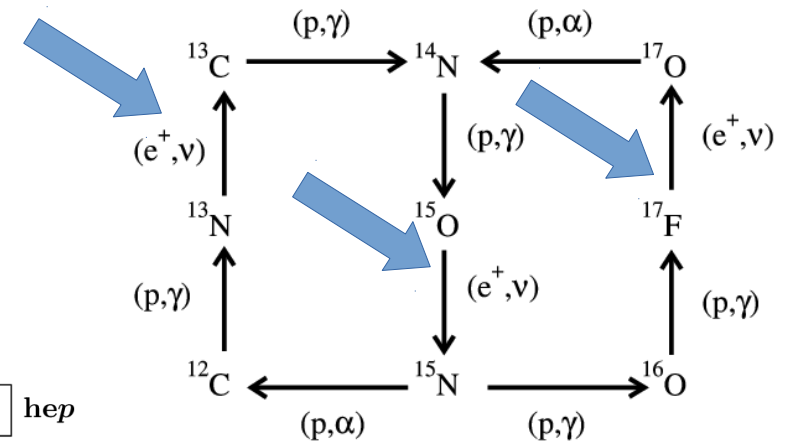
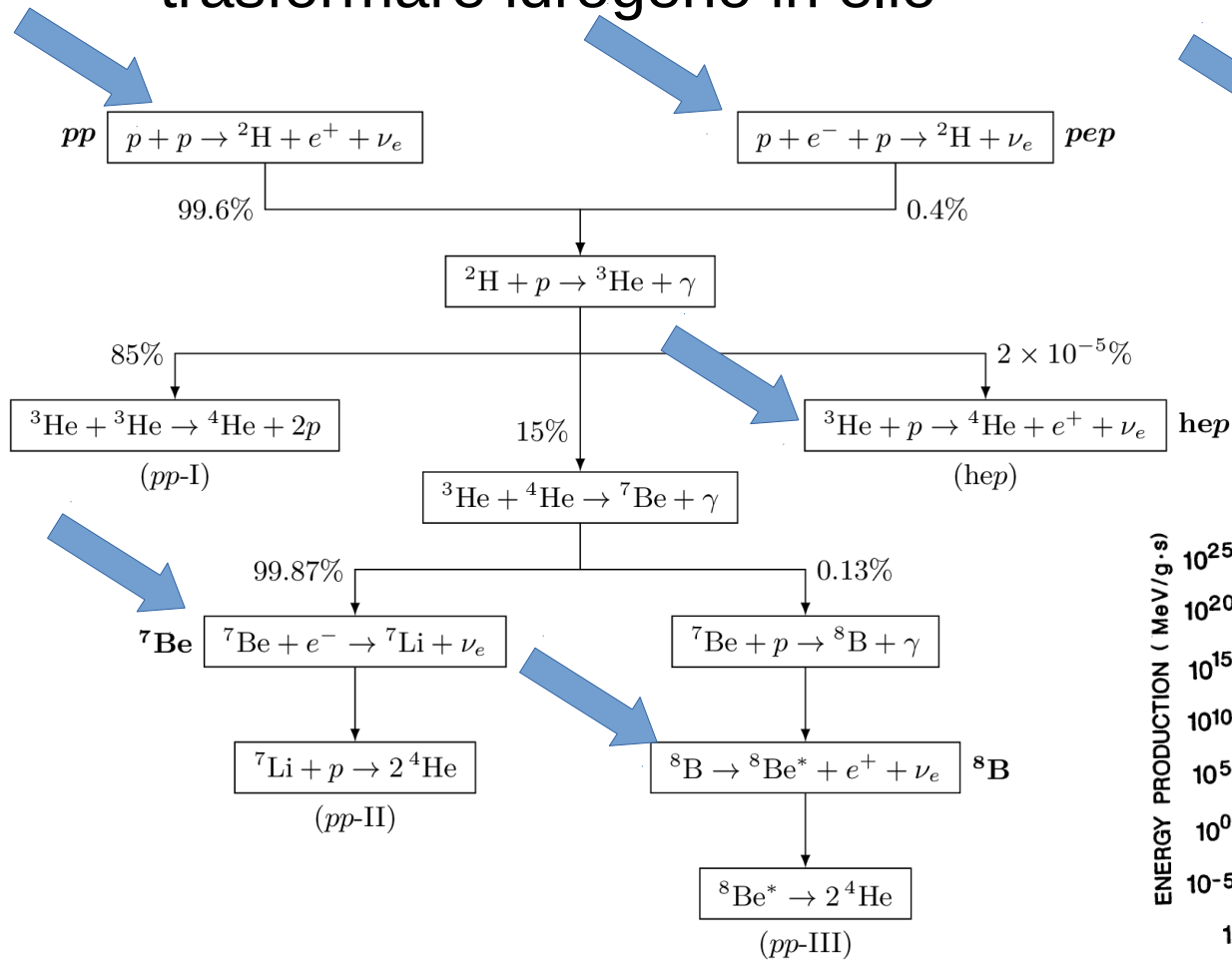
Neutrini solari

- ν solari $\rightarrow$ informazioni (real time) sui **processi** che avvengono nelle **stelle**
- I **modelli di evoluzione stellare** sono basati sulla riproduzione delle caratteristiche del Sole
- **Storicamente**: la misura di $\Phi(\nu)$ ha mostrato l'esigenza di introdurre fenomeni di oscillazione di neutrini (o di correggere sezioni d'urto nucleari a bassa energia)
- Effetti di materia nella propagazione dei ν non trascurabili!



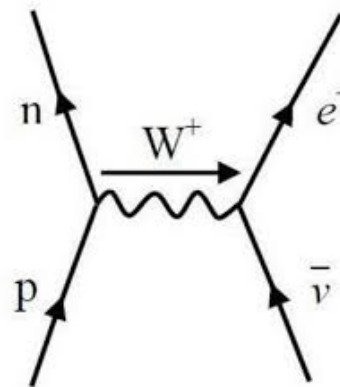
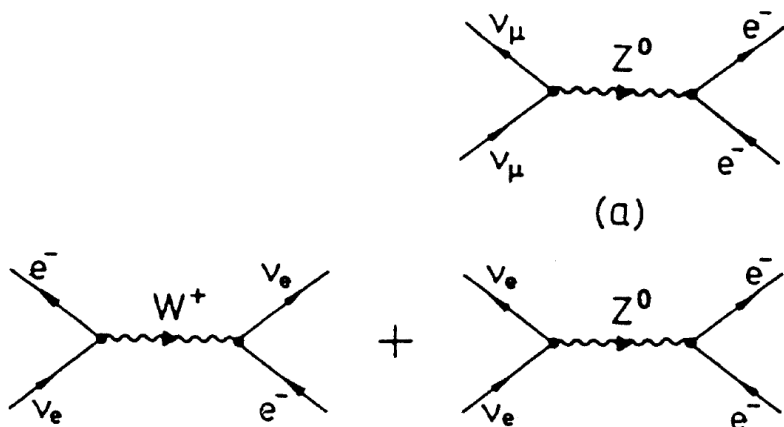
I neutrini solari

- Sono prodotti nelle reazioni nucleari che permettono di trasformare idrogeno in elio

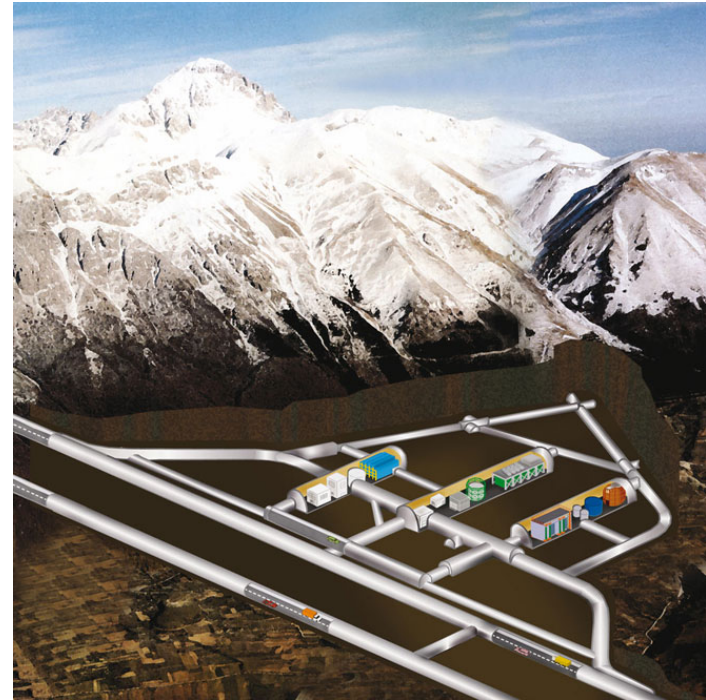
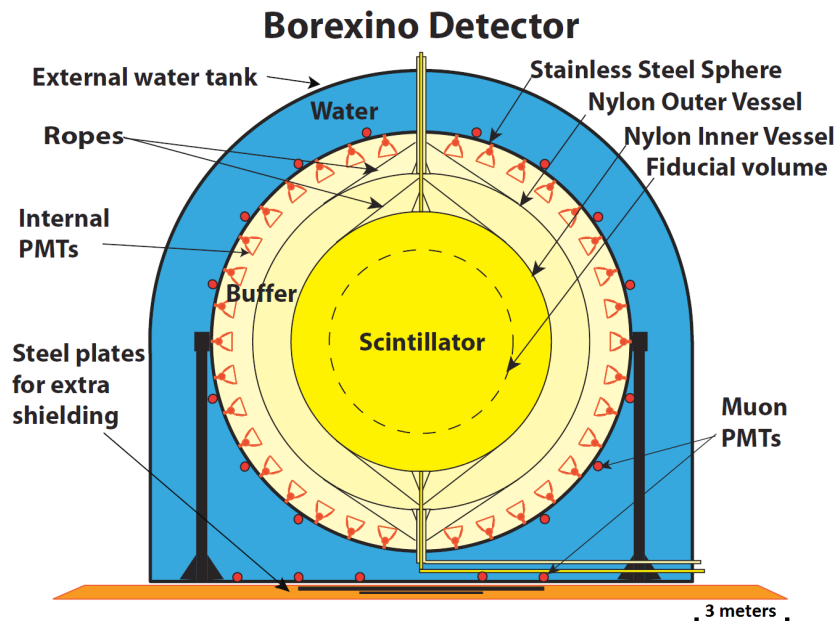


Come rivelare particelle così elusive?

- Bisogna massimizzare il numero di bersagli N_B
esperimento di grande massa
- **Basso fondo:** limitare eventi di radioattività naturale o cosmogenica che inducano un segnale
grandi schermature, esperimenti sotterranei
- Interazione dei neutrini con la materia usate per la rivelazione:
 $\nu \rightarrow$ scattering su elettrone $\bar{\nu}_e \rightarrow$ inverse beta decay



Borexino @ LNGS



- 300t di scintillatore
- 2212 PMT rivelano luce di scintillazione
- 900t Buffer liquido per schermare lo scintillatore
- 2.3 kt di acqua come rivelatore esterno per muoni
- Schermatura 3800 m.w.e. contro i raggi cosmici

Borexino @ LNGS



Borexino Collaboration



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



PRINCETON
UNIVERSITY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE"



St. Petersburg
Nuclear Physics Inst.

TUM
Technische Universität
München



University of
Houston



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKÓW



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Virginia
Tech

JGU
JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ



Universität
Hamburg



SKOBELTSYN INSTITUTE OF
NUCLEAR PHYSICS
НИИЯФ МГУ
LOMONOSOV MOSCOW STATE
UNIVERSITY



Joint Institute for
Nuclear Research



GRAN SASSO
SCIENCE INSTITUTE
CENTRO PER AVANZATE STUDIES
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



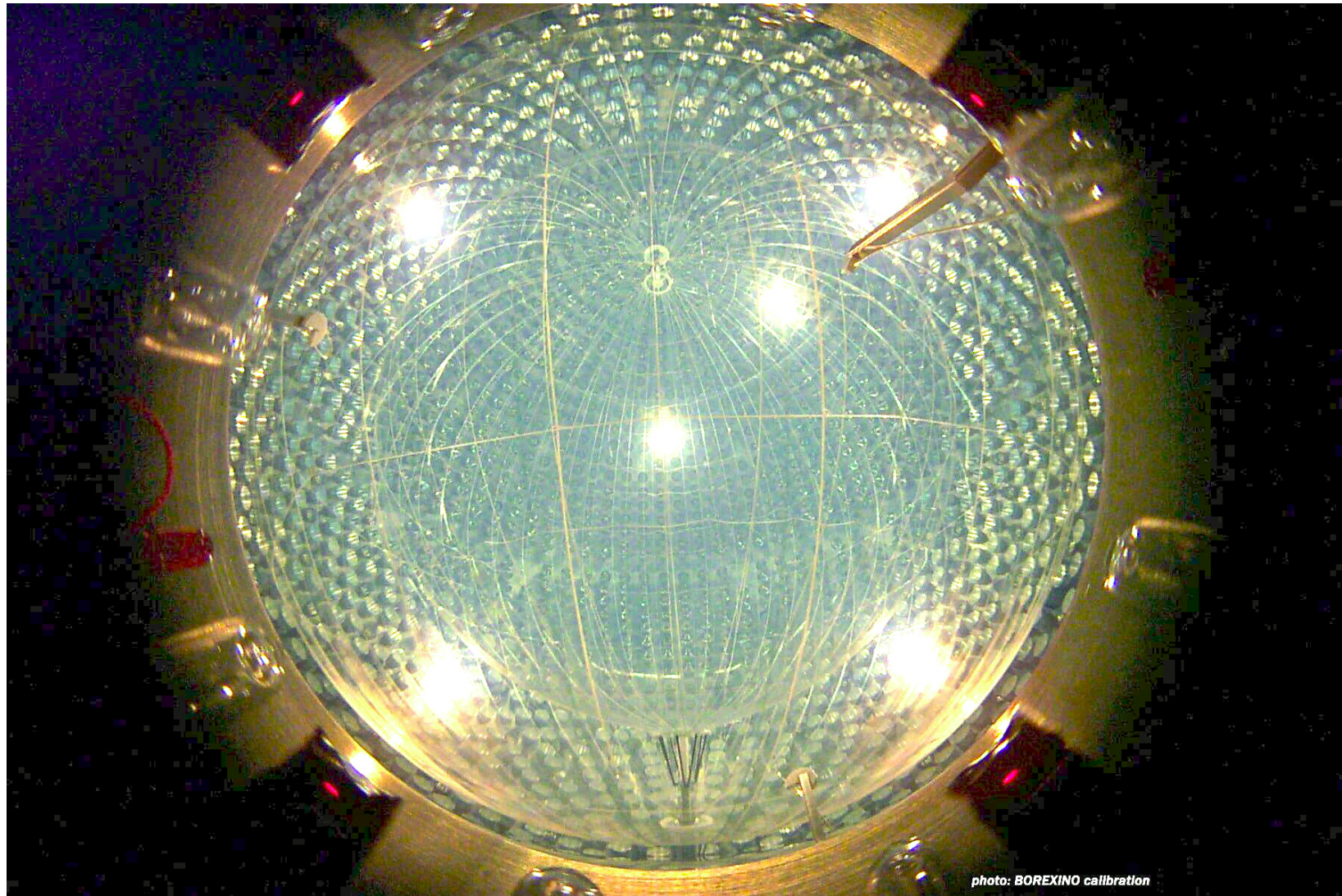
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



POLITECNICO
MILANO 1863

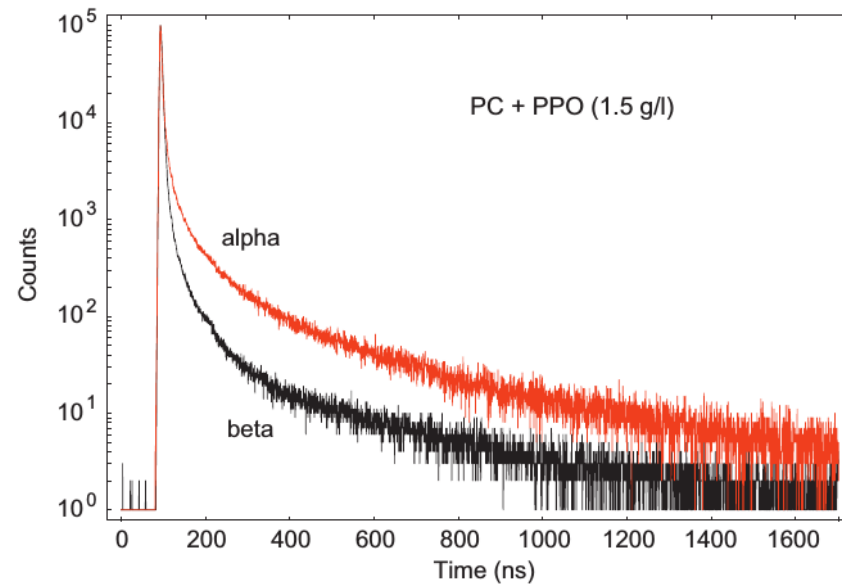
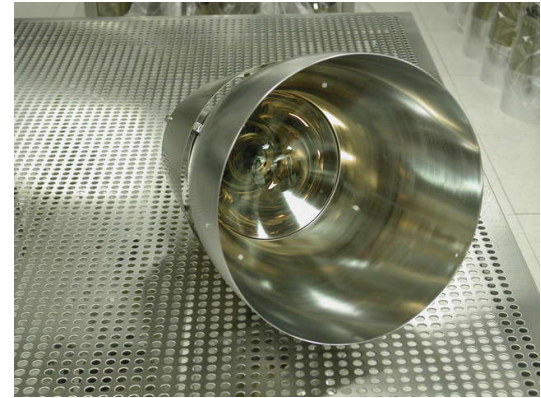
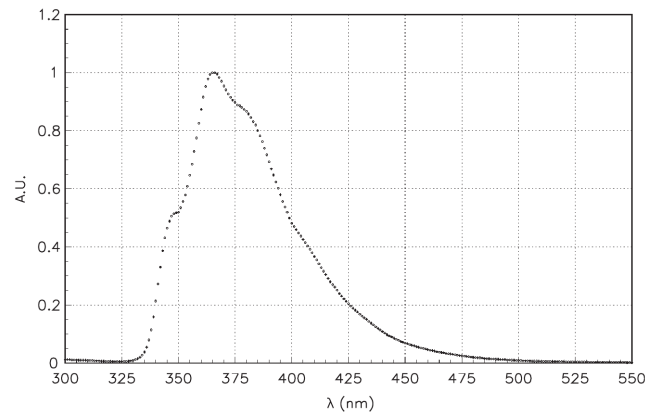


Borexino @ LNGS



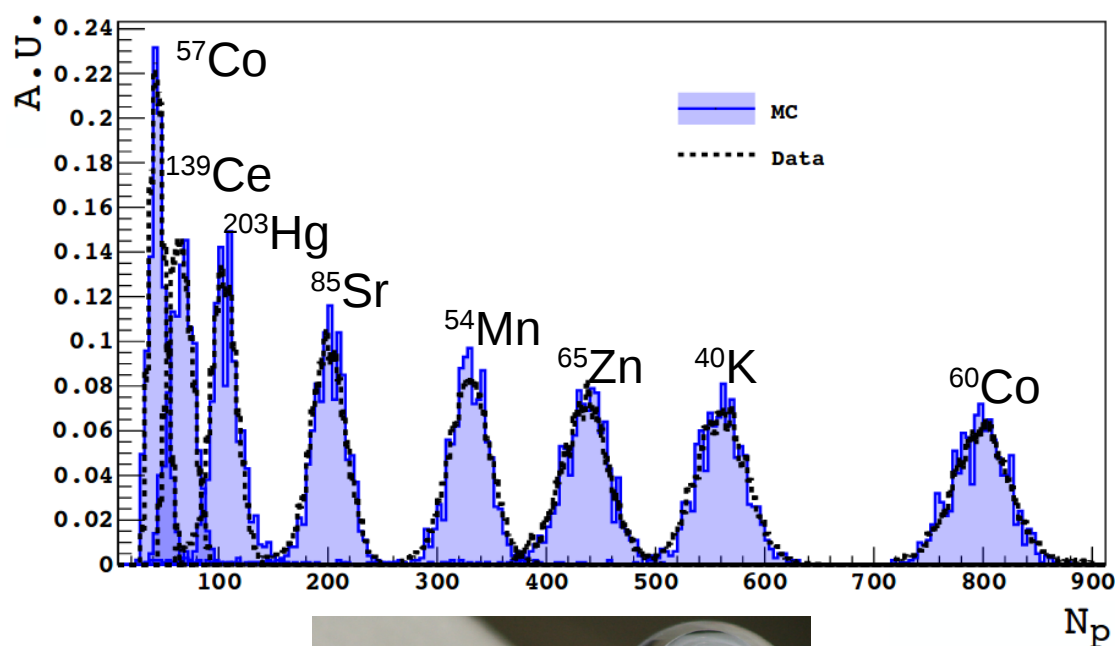
Scintillazione

- Dalla luce informazioni sull'evento:
 - posizione
 - energia
 - tipo di particella
- Luce isotropa:
 - no direzionalità

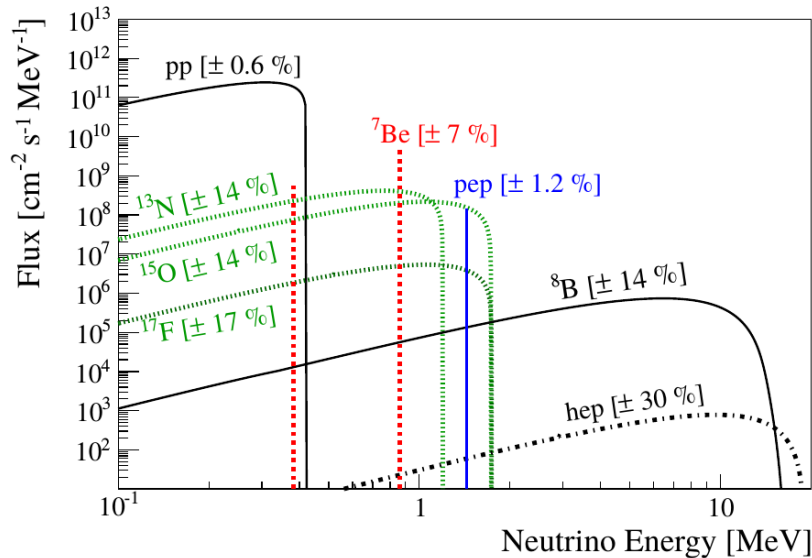


Rivelazione di neutrini

- ν rivelati tramite la luce di scintillazione
- Soglia energetica < 100 keV
- Risoluzione energetica $\sim 5\%$ @ 1 MeV
- Risoluzione spaziale ~ 16 cm @ 500 keV
- Rivelatore calibrato con sorgenti radioattive



La sfida di Borexino



- $\sigma \sim 10^{-17} \text{ mb}$
- $\phi \sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- $N_B \sim 10^{31}$
- Sono attesi ~ 50 eventi/giorno/100t (Be^7) $\rightarrow$ **$6 \times 10^{-9} \text{ Bq/kg}$**

- Acqua naturale
10 Bq/kg
- Roccia
100-1000 Bq/m³
- **Requisiti radiopurezza di 10 ordini di grandezza rispetto ai materiali comuni!**
- Grande R&D per la selezione e la pulizia dei materiali di costruzione

La sfida di Borexino

	Source of contamination	Typical flux	Borexino requirement	Strategy (hardware)	Strategy (software)	Result Phase 1	Result Phase 2
μ	cosmic	$\sim 200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ @ sea level	$< 10^{-10} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$	underground water detector	Cerenkov PS analysis	$< 10^{-10}$ eff. > 0.9992	$< 10^{-10}$ eff. > 0.9992
γ	rock	---	---	water	fid. vol.	negligible	negligible
γ	PMTs, SSS	---	---	buffer	fid. vol.	negligible	negligible
^{14}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}U ^{232}Th	dust, metallic	10^{-5} - 10^{-6} g/g	$< 10^{-16} \text{ g/g}$	distillation, W.E., filtration, mat. selection, cleanliness	tagging, α/β	$1.6 \pm 0.1 \cdot 10^{-17} \text{ g/g}$ $5.1 \pm 1 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$	$< 9 \cdot 10^{-19} \text{ g/g}$ $< 9 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$
^7Be	cosmogenic	$\sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/t}$	$< 10^{-6} \text{ Bq/t}$	distillation	--	not seen	not seen
^{40}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}Po	surface cont. from ^{222}Rn	---	$< 1 \text{ c/d/t}$	distillation, W.E., filtration, cleanliness	fit	May '07: 70 c/d/t Jan '10: $\sim 1 \text{ c/d/t}$	$< 1 \text{ c/d/t}$
^{222}Rn	emanation from materials, rock	10 Bq/l air, water 100 - 1000 Bq rock	$< 10 \text{ cpd } 100 \text{ t}$	N_2 stripping cleanliness	tagging, α/β	$< 1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$	$< 0.1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$
^{39}Ar	air, cosmogenic	17 mBq/m^3 (air)	$< 1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$	N_2 stripping	fit	$\ll ^{85}\text{Kr}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$
^{85}Kr	air, nuclear weapons	$\sim 1 \text{ Bq/m}^3$ (air)	$< 1 \text{ cpd } 100 \text{ t}$	N_2 stripping	fit	$30 \pm 5 \text{ cpd/100 t}$	$< 7 \text{ cpd/100 t}$
^{210}Bi	surface cont. from ^{222}Rn	---	---	water extraction	fit	10 - 50 cpd/100 t	~ 25

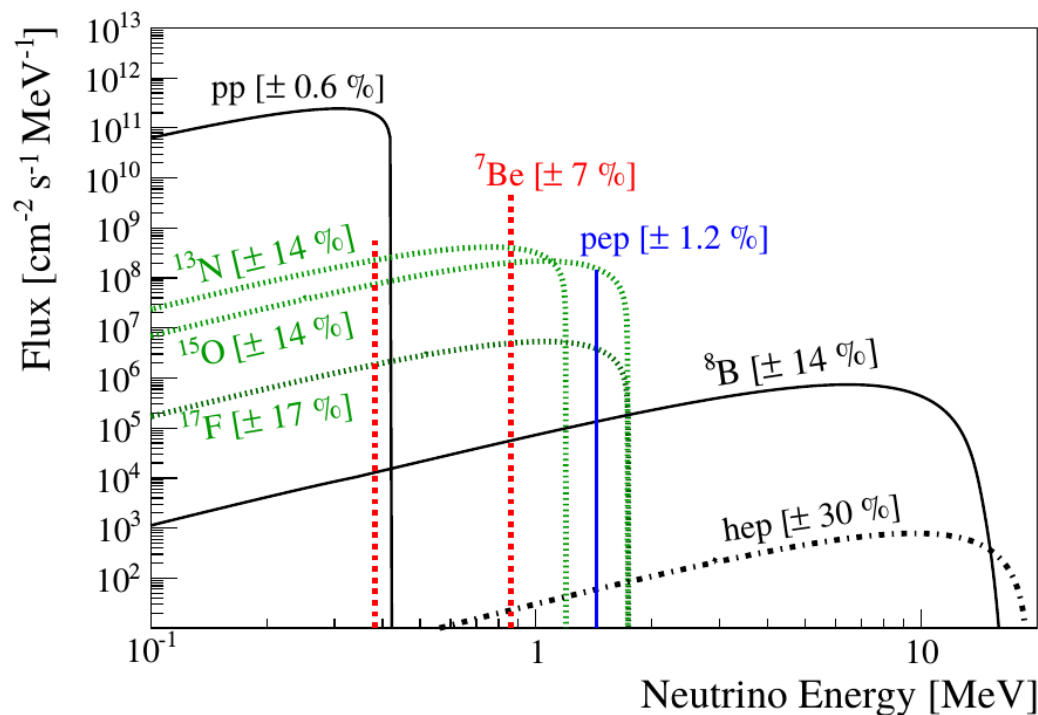
Flussi attesi dal Modello Solare Standard

Solar- ν	Φ_ν (GS98) high metallicity [cm ⁻² s ⁻¹]	Φ_ν (AGSS09) low metallicity [cm ⁻² s ⁻¹]	R_ν (GS98) high metallicity [cpd/100 ton]	R_ν (AGSS09)low metallicity [cpd/100 ton]	Main background
<i>pp</i>	5.98 (1 $\pm$ 0.006)	6.03 (1 $\pm$ 0.006)	130.8 $\pm$ 2.4	131.9 $\pm$ 2.4	¹⁴ C
⁷ Be* (384 keV)	0.53 (1 $\pm$ 0.07)	0.48 (1 $\pm$ 0.07)	1.90 $\pm$ 0.14	1.73 $\pm$ 0.12	⁸⁵ Kr, ²¹⁰ Bi
⁷ Be* (862 keV)	4.47 (1 $\pm$ 0.07)	4.08 (1 $\pm$ 0.07)	46.48 $\pm$ 3.35	42.39 $\pm$ 3.05	⁸⁵ Kr, ²¹⁰ Bi
<i>pep</i>	1.44 (1 $\pm$ 0.012)	1.47 (1 $\pm$ 0.012)	2.73 $\pm$ 0.05	2.79 $\pm$ 0.06	¹¹ C, ²¹⁰ Bi
¹³ N	2.96 (1 $\pm$ 0.14)	2.17 (1 $\pm$ 0.14)	2.42 $\pm$ 0.34	1.78 $\pm$ 0.23	
¹⁵ O	2.23 (1 $\pm$ 0.15)	1.56 (1 $\pm$ 0.15)	2.75 $\pm$ 0.42	1.92 $\pm$ 0.29	
¹⁷ F	5.52 (1 $\pm$ 0.17)	3.40 (1 $\pm$ 0.16)	0.068 $\pm$ 0.012	0.042 $\pm$ 0.007	
CNO	5.24 (1 $\pm$ 0.21)	3.76 (1 $\pm$ 0.21)	5.24 $\pm$ 0.54	3.74 $\pm$ 0.37	¹¹ C, ²¹⁰ Bi
⁸ B	5.58 (1 $\pm$ 0.14)	4.59 (1 $\pm$ 0.14)	0.44 $\pm$ 0.07	0.37 $\pm$ 0.05	²⁰⁸ Tl, ext γ

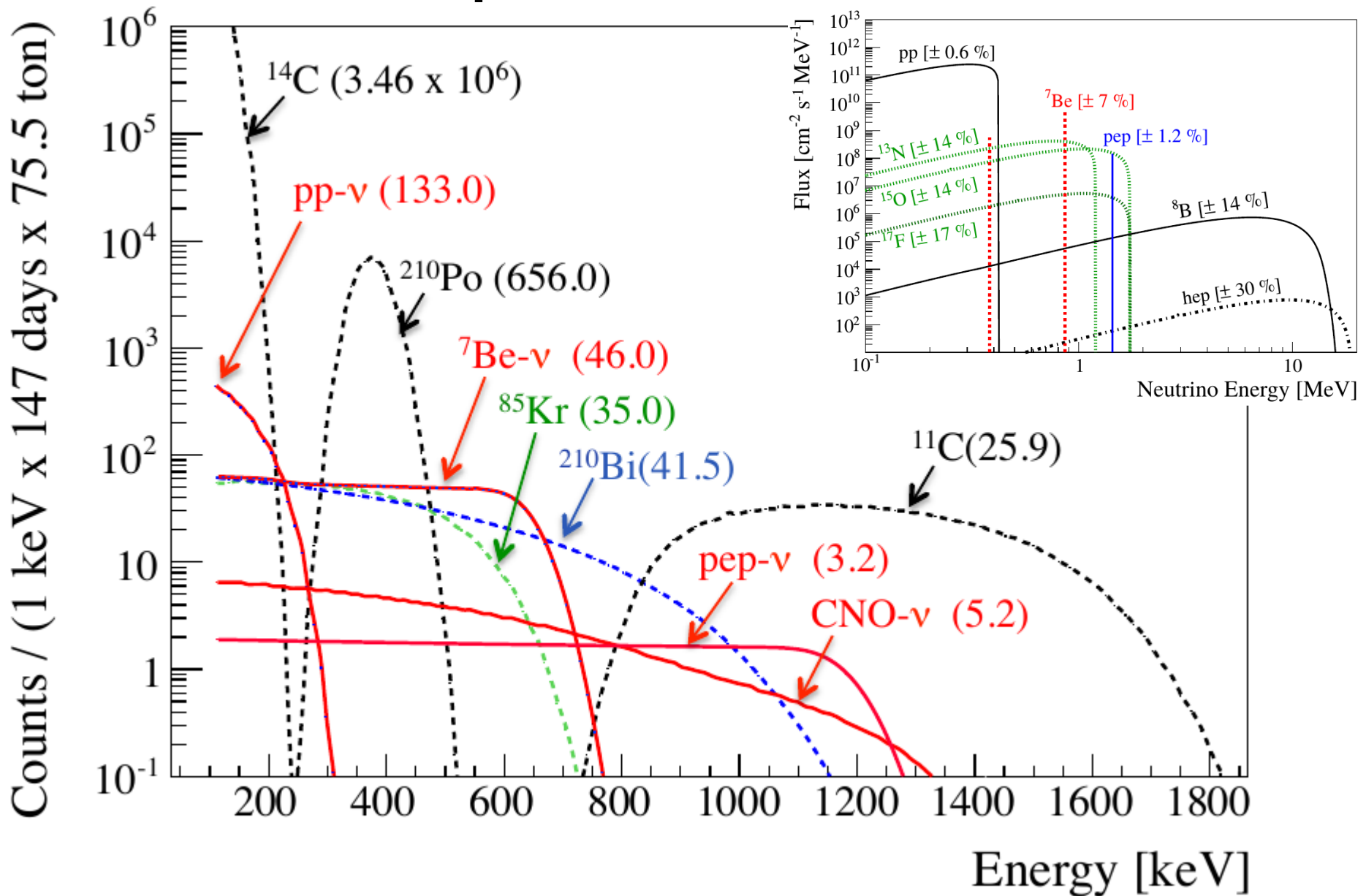
*The production branching ratios of the 384 and 862 keV ⁷Be- ν lines are 0.1052 and 0.8948, respectively. The respective ratio of interaction rates in Borexino is 3.9:96.1.

Flussi dei neutrini solari misurati

- Misurati:
 - ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, pep e pp
- Limiti:
 - CNO (${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$, ${}^{17}\text{F}$)
- Tecnica:
 - fit dello spettro energetico + (distribuzione radiale degli eventi, pulse shape)



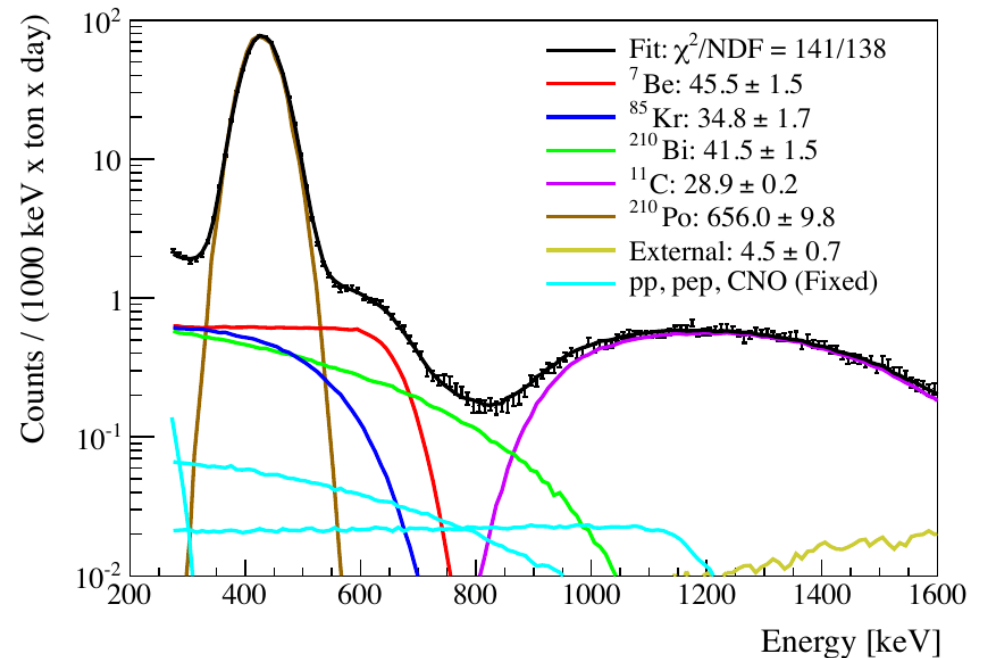
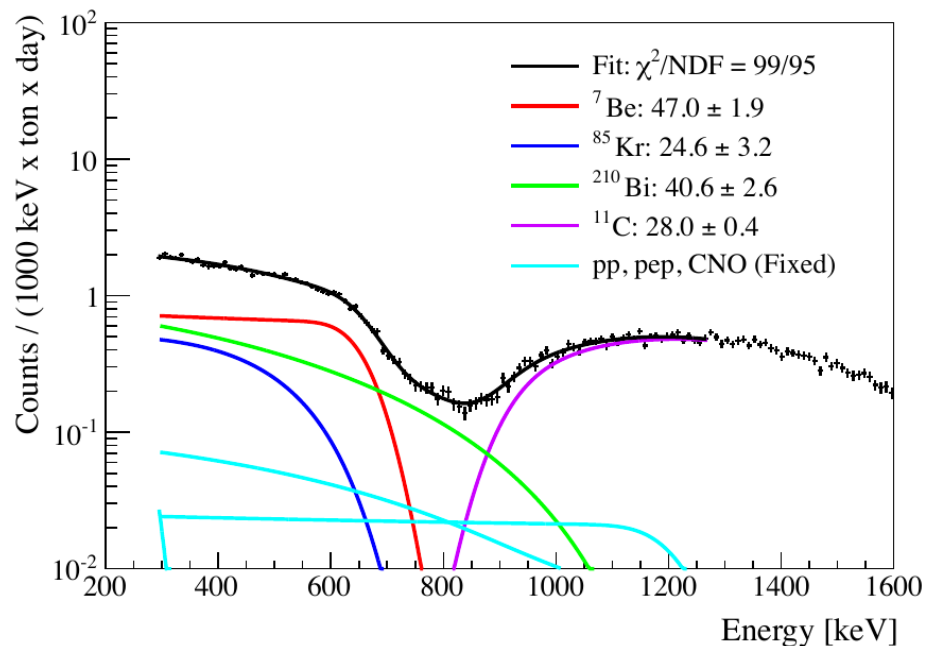
Lo spettro atteso



Neutrini ^7Be

- Fit effettuato con metodi analitici ed attraverso metodi Monte Carlo

$$R(^7\text{Be}) = 46.0 \pm 1.5(\text{stat}) {}^{+1.5}_{-1.6}(\text{sys}) \text{ cpd}/100 \text{ ton}$$

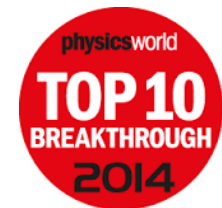
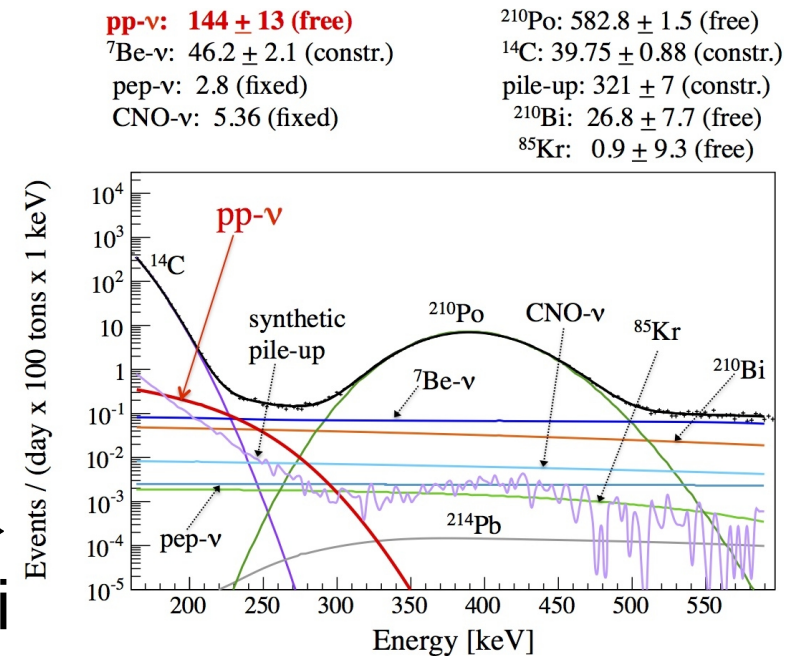


Neutrini catena pp

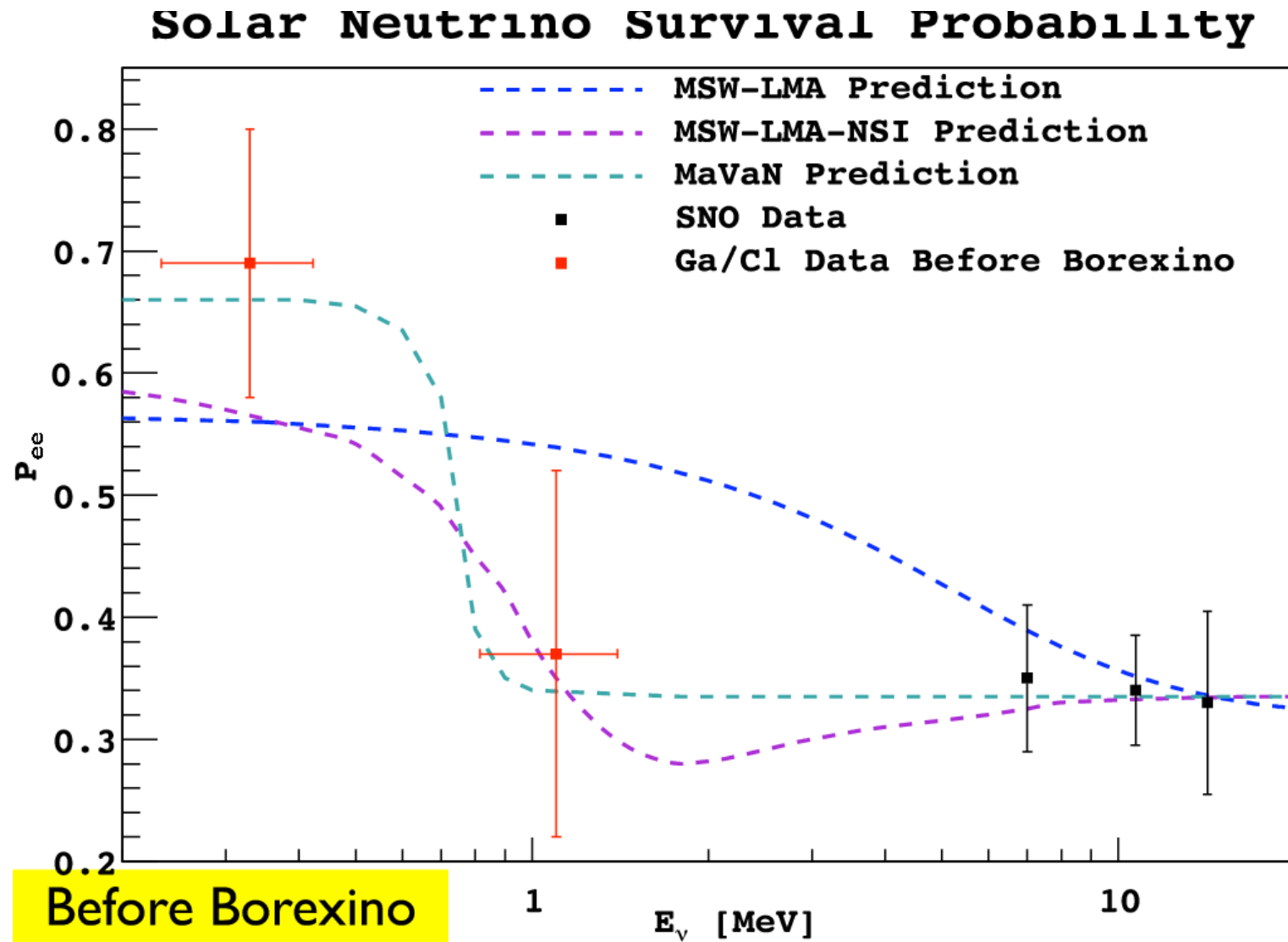
- Rate di interazione

$144 \pm 13(\text{stat}) \pm 10(\text{sys})$ cpd/100t

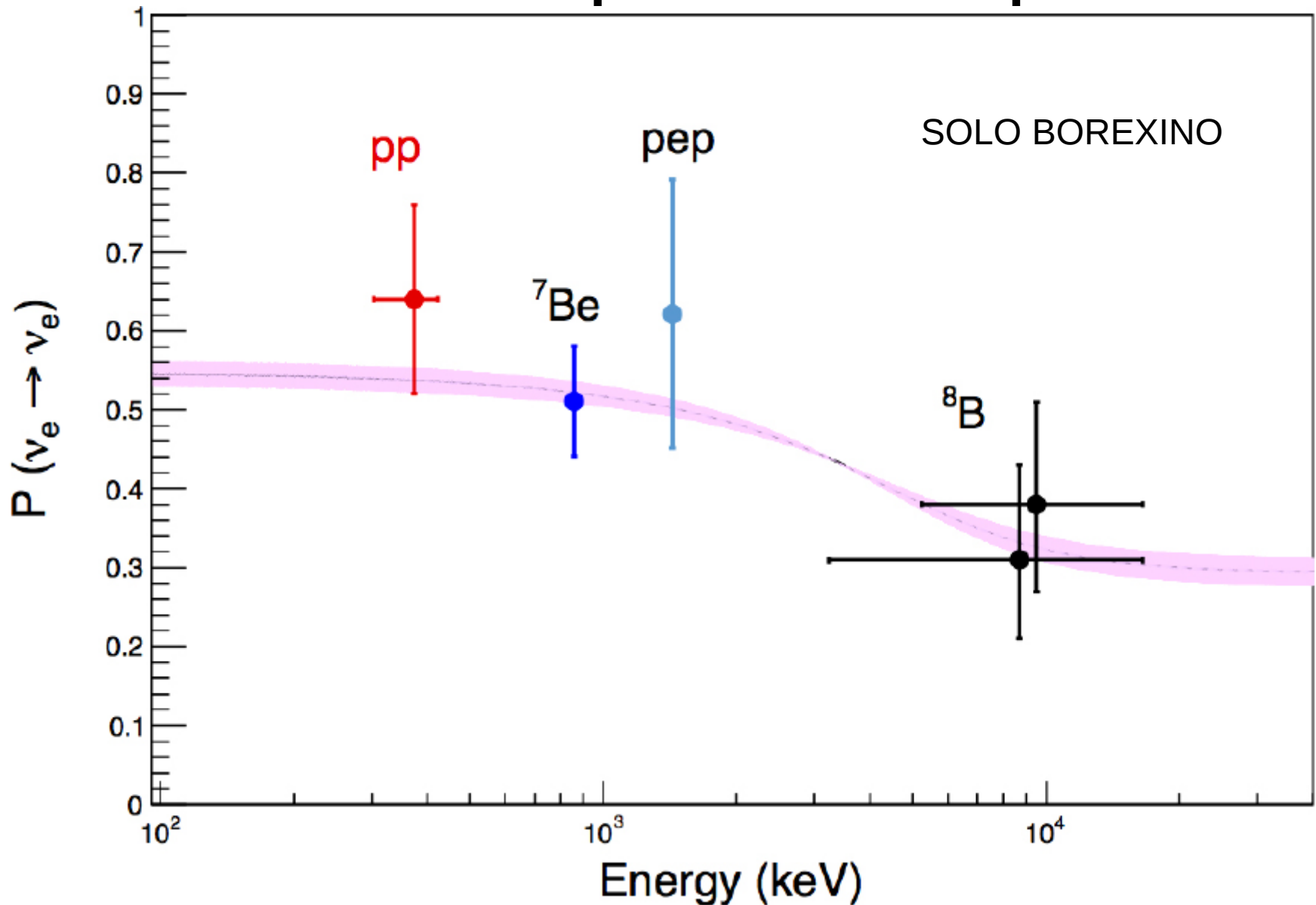
- In accordo con le previsioni del Modello Solare Standard
- Il flusso di neutrini misurato è in accordo con le misure di luminosità → Sole stabile su scale tempi di 10^5 anni
- **Stiamo capendo come funziona il Sole**



Borexino: prima e dopo



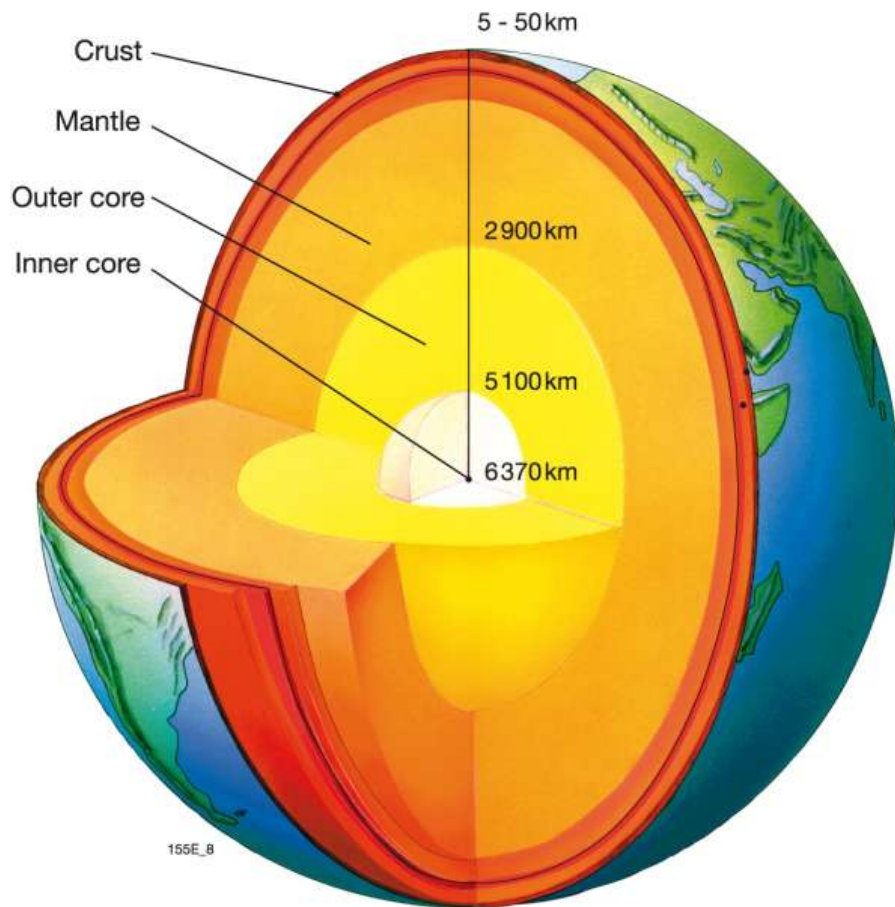
Borexino: prima e dopo



Geoneutrini: da dove viene il calore della Terra?

- $\bar{\nu}$ emessi dalle catene di ^{238}U , ^{232}Th e dal ^{40}K presenti all'interno della Terra (HPE)
- Flusso di geoneutrini importante per la validazione dei modelli geologici
- **Borexino**, grazie alla grande massa ed al basso fondo **può misurare geoneutrini!**

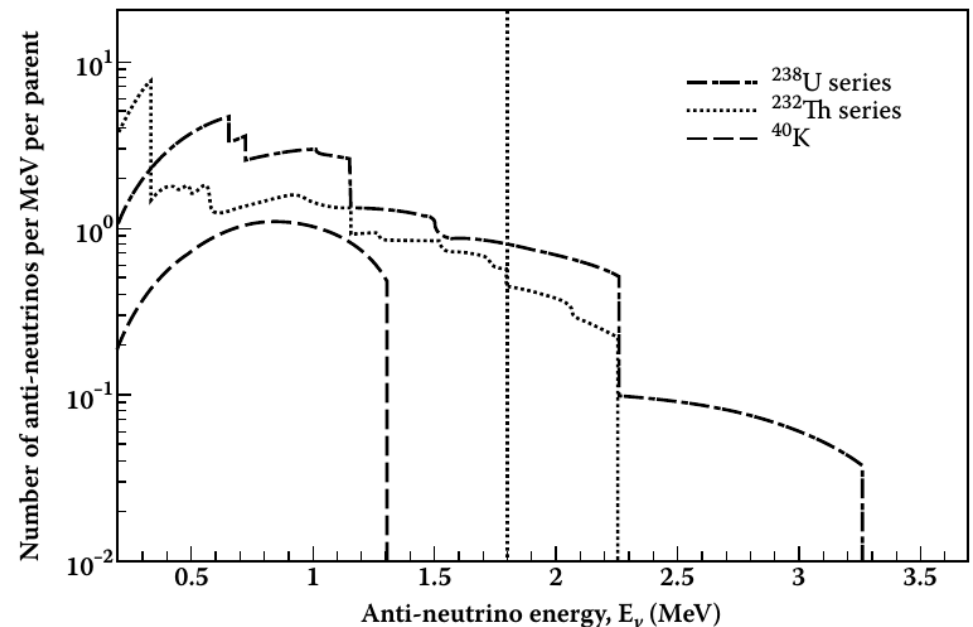
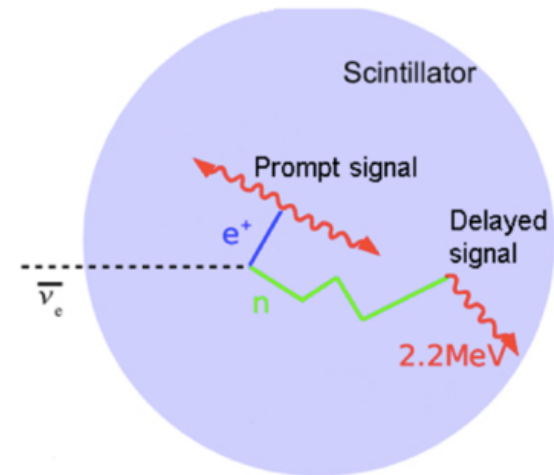
Geoneutrini: sorgente del calore



- Terra attuale formata in processo di differenziazione
- Per affinità chimica HPE presenti soprattutto nella crosta (ppm)
- Qual è la concentrazione nel mantello? → Diversi modelli
- Geochemical → HPE da campioni di roccia
- Cosmochemical → HPE da meteoriti
- Geodynamical → calore dovuto internamente a HPE e raffreddamento secolare

Rivelazione di geoneutrini in Borexino

- Rivelati attraverso inverse beta decay
- soglia 1.8 MeV
- Il e^+ ionizza e annichila:
 - stima energia del $\bar{\nu}$ incidente
- Il neutrone viene catturato su H e un γ da 2.2 MeV è emesso
- $\Delta t \sim 256 \mu s$

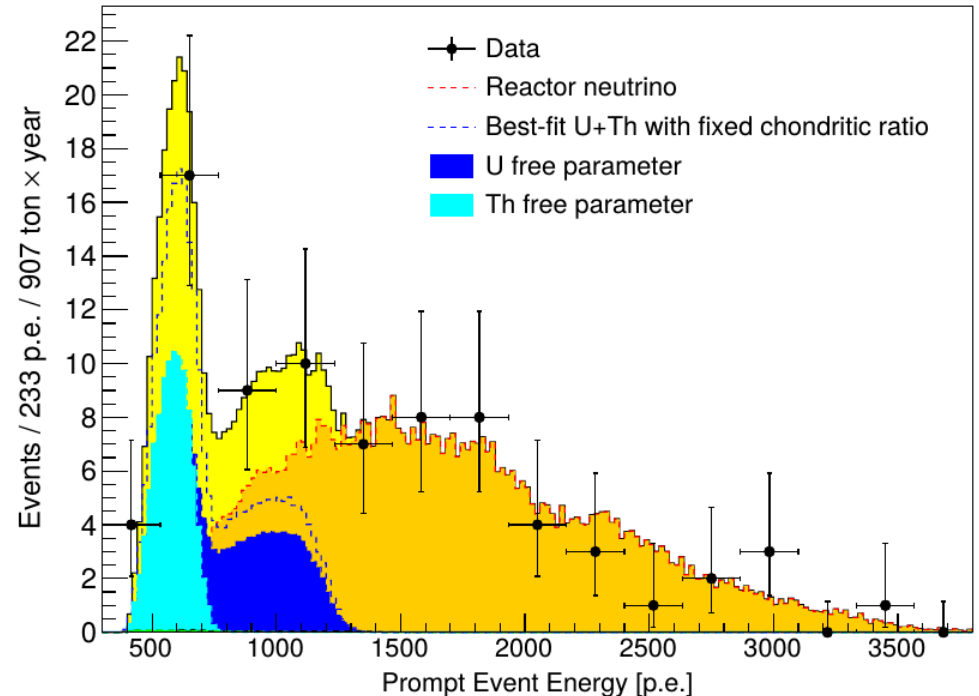


Analisi dati

- **Strategia:**
 - Ricerca coincidenze prompt (e^+) - delayed (cattura n)
- **Fondo ineludibile:**
 - $\bar{\nu}$ da reattore
 - Si discriminano da geo ν perché il loro spettro si estende fino a ~ 10 MeV
- **Altre sorgenti di fondo sono trascurabili:**
 - Coinidenze accidentali
 - cosmogenici (${}^9\text{Li} - {}^8\text{He}$) che decadono β - $n \rightarrow$ identificazione eventi di muoni attraverso il veto
 - ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$

Segnale di geo- ν in Borexino

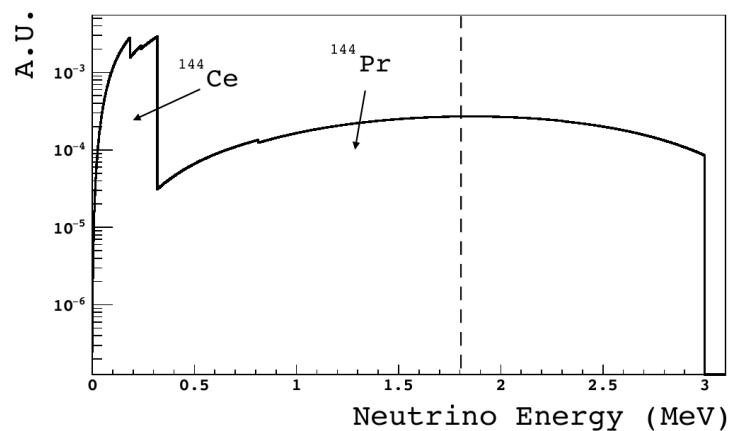
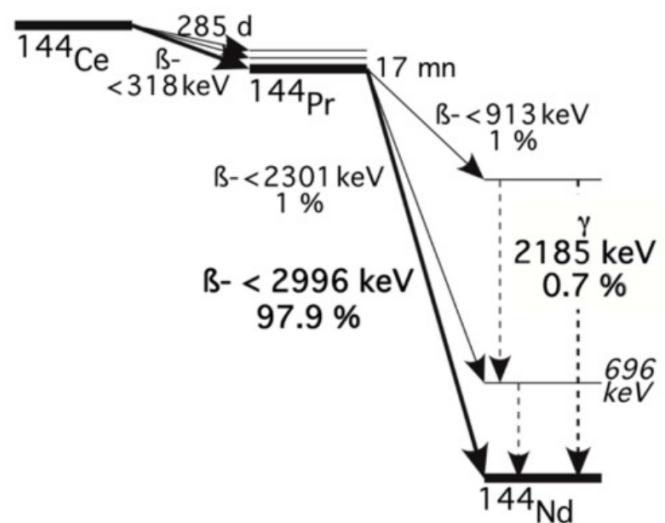
- $\varepsilon = 84.2\%$
- $m(\text{Th}):m(\text{U}) = 3.9$
- $\text{geov}: 23.7^{+6.5}_{-5.7}(\text{stat})^{+0.9}_{-0.6}(\text{sys})$
- Reattori: $52.7^{+8.5}_{-7.7}(\text{stat})^{+0.7}_{-0.9}(\text{sys})$
- **Rigettata ipotesi di non
esistenza di geo- ν a 5.9σ !**



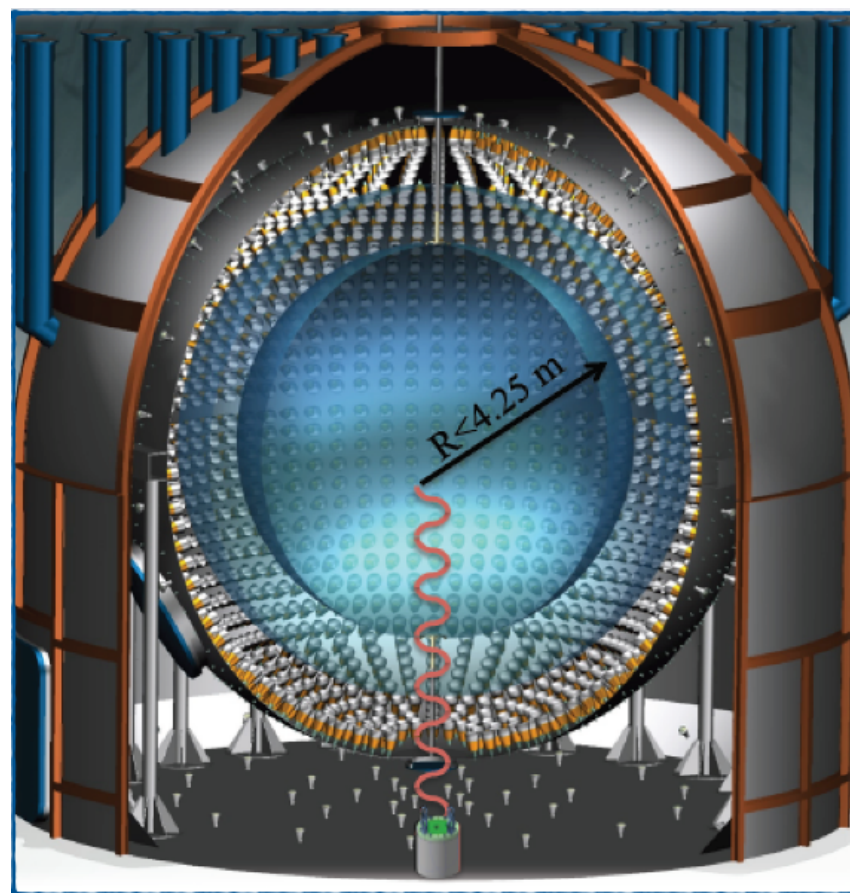
Il futuro di Borexino: SOX

- Dati provenienti da diversi esperimenti di oscillazione di neutrino (reattori, acceleratori, sorgenti di ν) mostrano anomalie
- Globalmente sarebbero spiegate se venisse introdotto un nuovo neutrino
- Esso è chiamato “sterile” in quanto non accoppiato al bosone Z^0
- $\Delta m^2_{14} \sim \text{eV}^2$, $\sin 2(2\theta_{14}) \sim 0.1$
- **Borexino ha il potenziale per fornire una risposta definitiva riguardo all'esistenza dei neutrini sterili**

Il futuro di Borexino: SOX

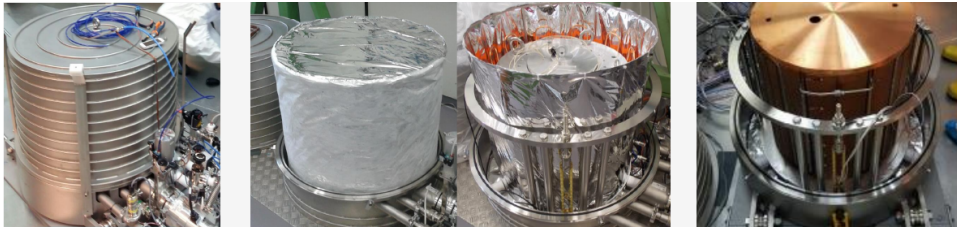


- Generatore di $\bar{\nu}$ posta sotto Borexino (^{144}Ce - ^{144}Pr), attesi 10000 eventi in 1.5 anni



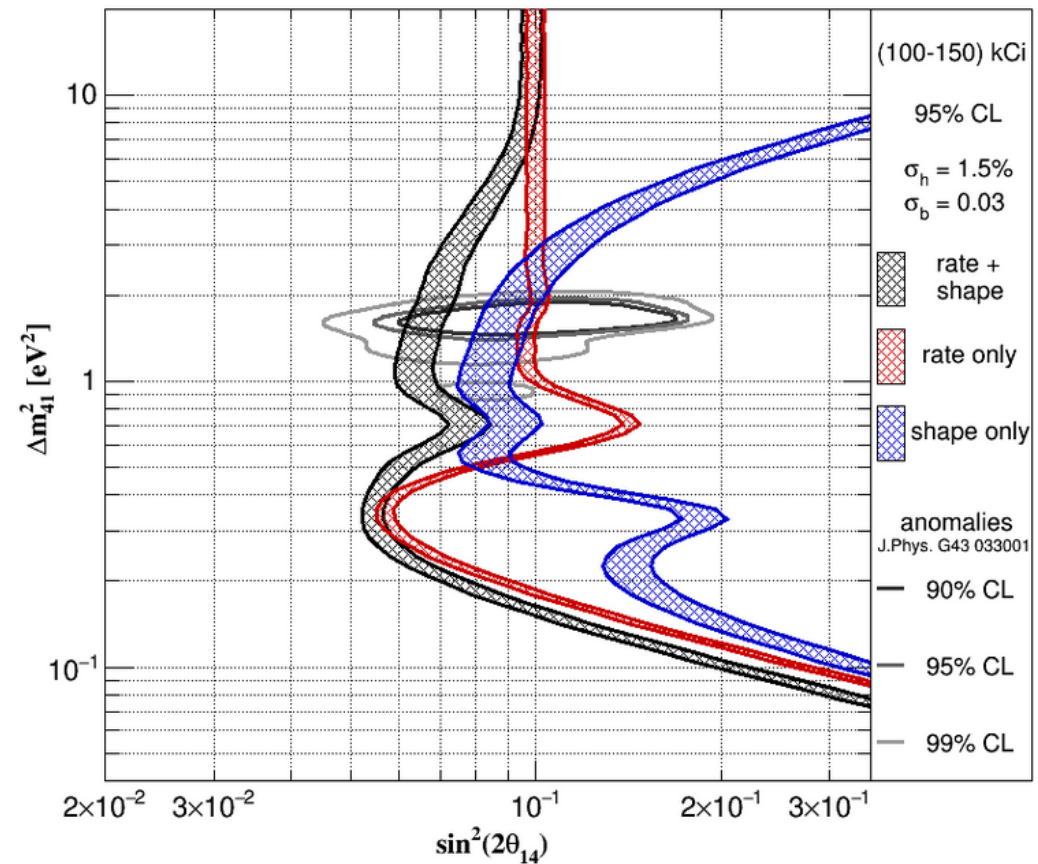
Il futuro di Borexino: SOX

- Analisi dati basata sul confronto tra rate di eventi atteso e rivelato → è fondamentale la misura dell'attività della sorgente



- Possibilità di vedere le oscillazioni spaziali di probabilità di interazione di neutrino

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{41}^2 (eV^2) L(m)}{E(MeV)}$$



Presa dati inizio 2018!

Attività svolta a Genova

Genova partecipa all'esperimenti BOREXINO e SOX dal momento dell'ideazione. Tra le attività principali:

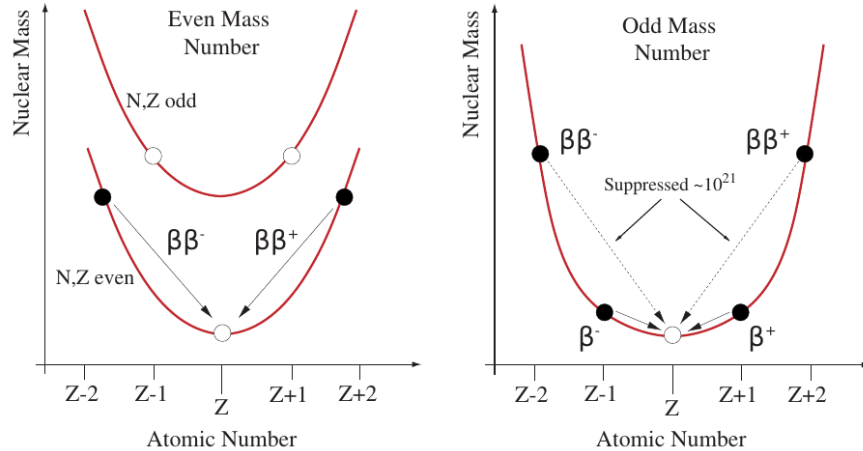
- R&D su scintillatori e costruzione esperimento
- DAQ
- Sviluppo codice simulazione
- Analisi dati (ν solari, geo ν)
- Idea esperimento SOX
- Sviluppo calorimetro
- Analisi potenziale scoperta

Breve digressione sulle attività di gruppo su:

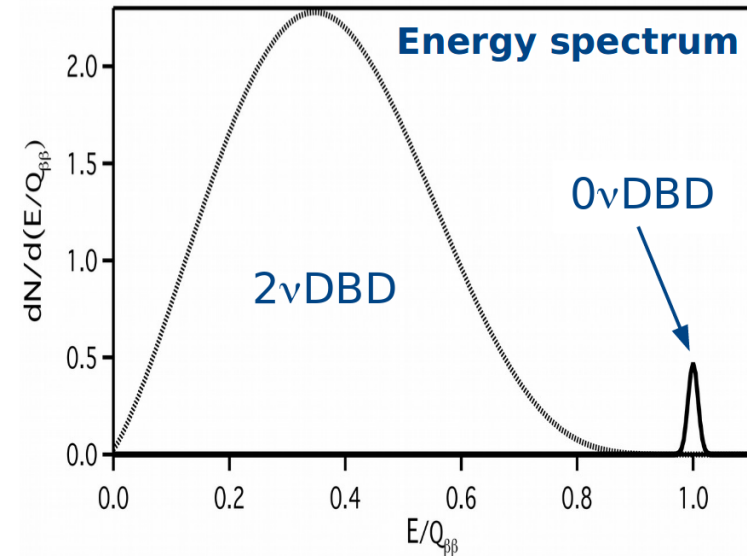
$0\nu\beta\beta \rightarrow$ CUORE

$\delta_{CP} \rightarrow$ DUNE

Cuore: $0\nu\beta\beta$



- $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$
- Ammesso in alcuni decadimenti di nuclei pari pari
- Se rivelato: neutrini di Majorana, $\Delta L = 2$
- **Mai osservato sperimentalmente**



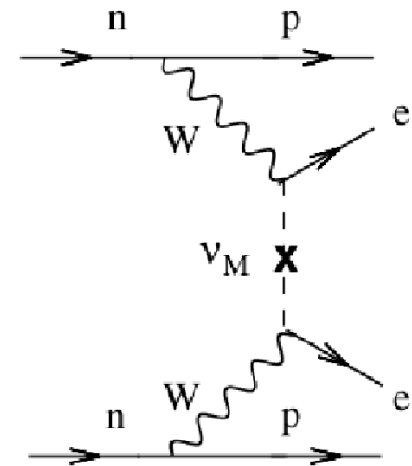
- Piccolo picco all'endpoint
- Grande massa
- Basso background
- Alta risoluzione energetica

$0\nu\beta\beta$

- Scambio di un neutrino di Majorana leggero

$$(T_{0\nu}^{1/2})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 / m_e^2$$

Spazio delle fasi Fisica nucleare $\langle m_{\beta\beta} \rangle^2 = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|^2$

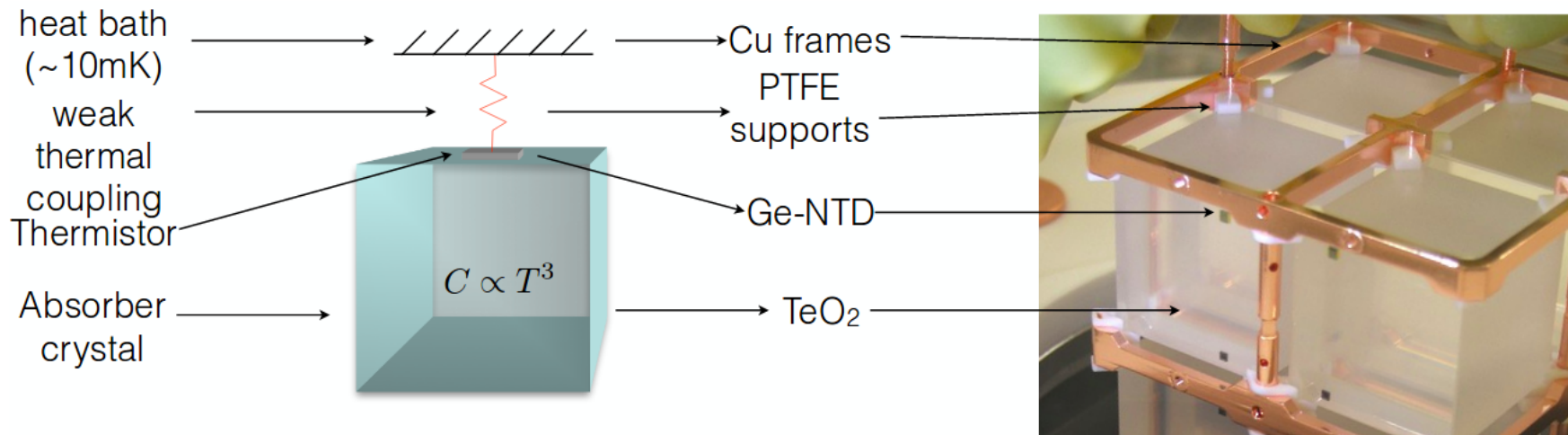


- Sperimentalmente

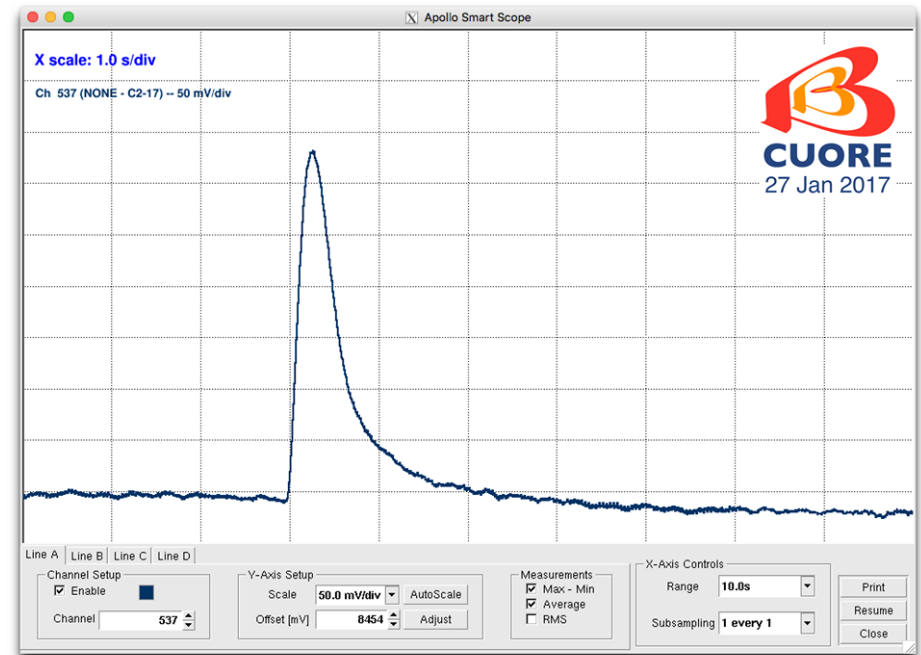
$$S^{0\nu} \propto \eta \sqrt{\frac{M t}{b \Delta E}}$$

- η : abbondanza isotopica
- M : massa in analisi
- t : tempo di misura
- b : background index cnt (keV kg y)⁻¹
- ΔE : risoluzione energetica (keV FWHM)

La tecnica

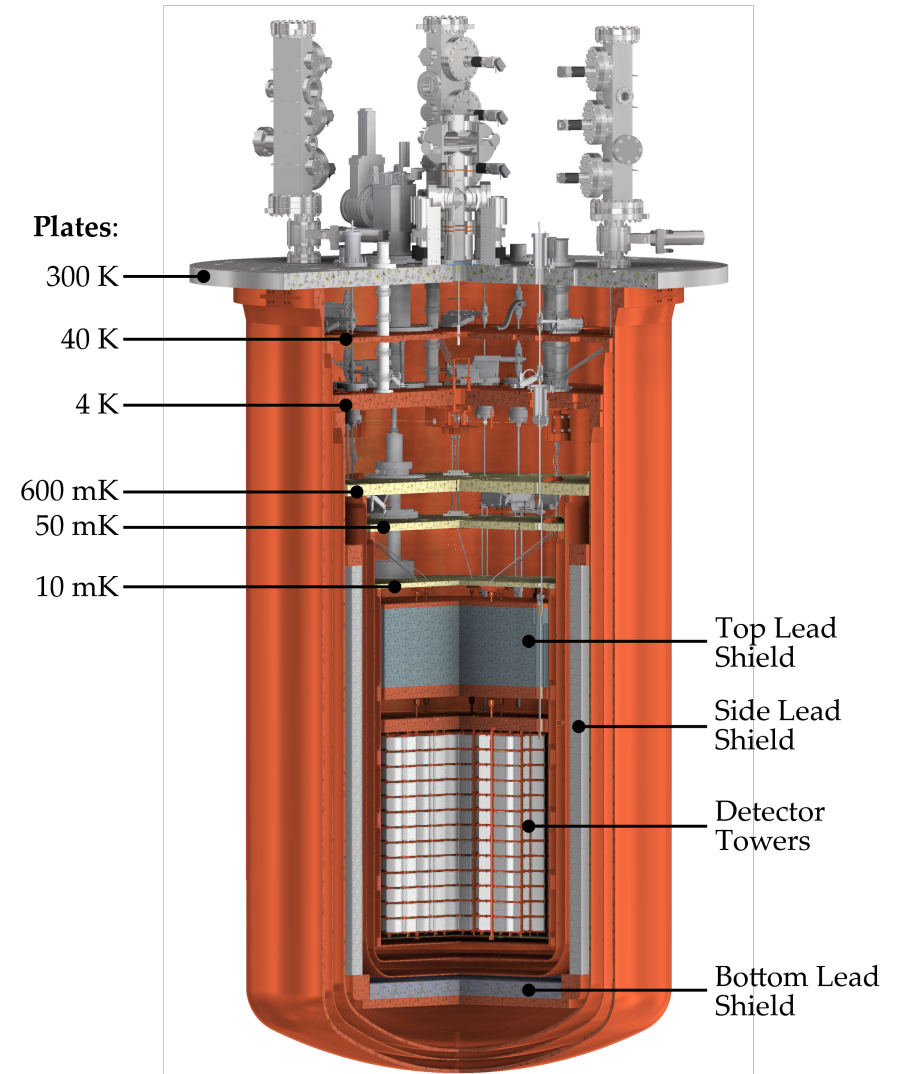


- $\Delta T = E/C$
- **Assorbitore:**
 TeO_2 5x5x5 cm³
 massa: 0.75 kg
 $\Delta T/\Delta E_{\text{dep}} \sim 10\text{-}20 \mu\text{K/MeV}$
- **Sensore:** NTD
 $R = R_0 \exp[(T_0/T)^{1/2}]$



L'esperimento

- 988 cristalli TeO_2 , 19 torri
- 742 kg di TeO_2 (206 kg di ^{130}Te)
- Criostato: cristalli @ 10 mK
- $b = 0.01 \text{ cnt (keV kg y)}^{-1}$
- $\Delta E = 5 \text{ keV FWHM}$



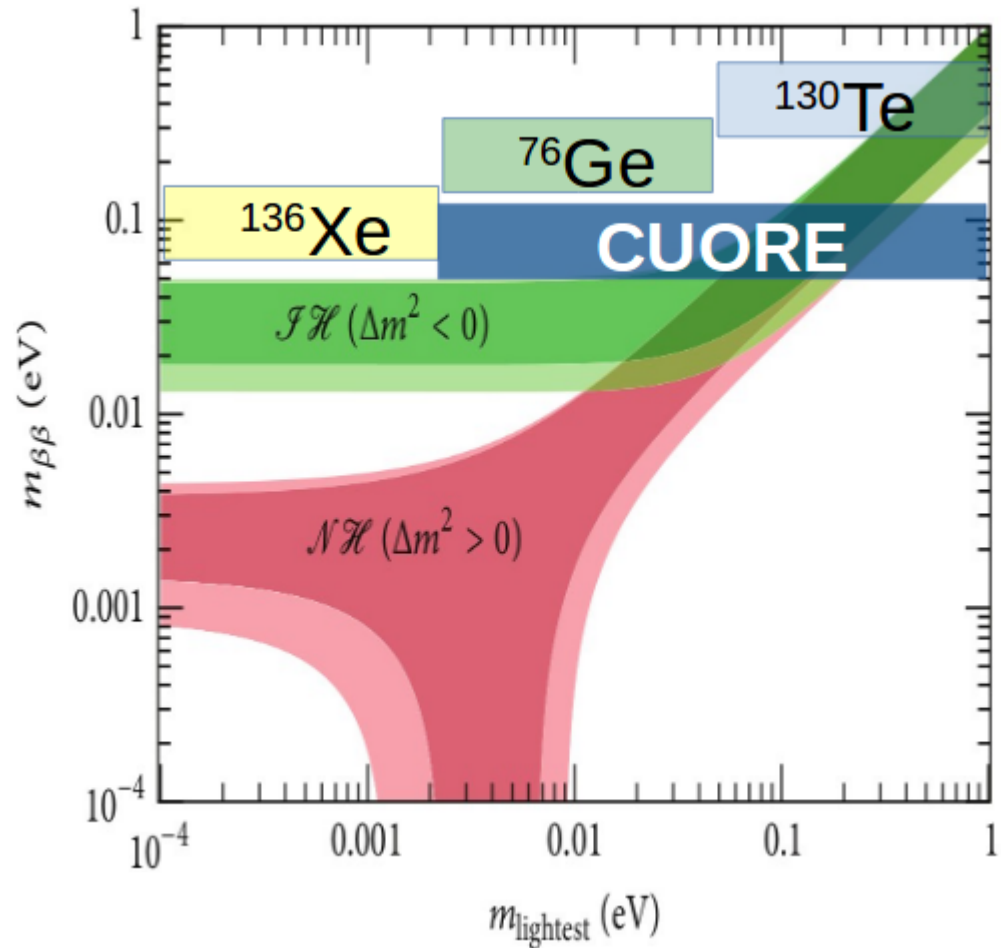
L'esperimento

- 988 cristalli TeO_2 , 19 torri
- 742 kg di TeO_2 (206 kg di ^{130}Te)
- Criostato: cristalli @ 10 mK
- $b = 0.01 \text{ cnt (keV kg y)}^{-1}$
- $\Delta E = 5 \text{ keV FWHM}$

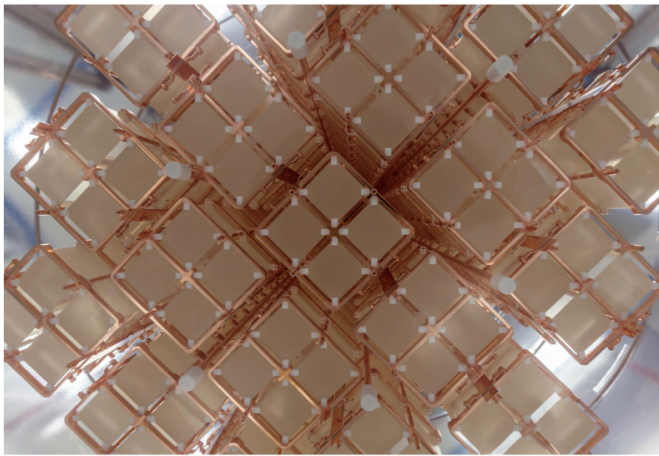
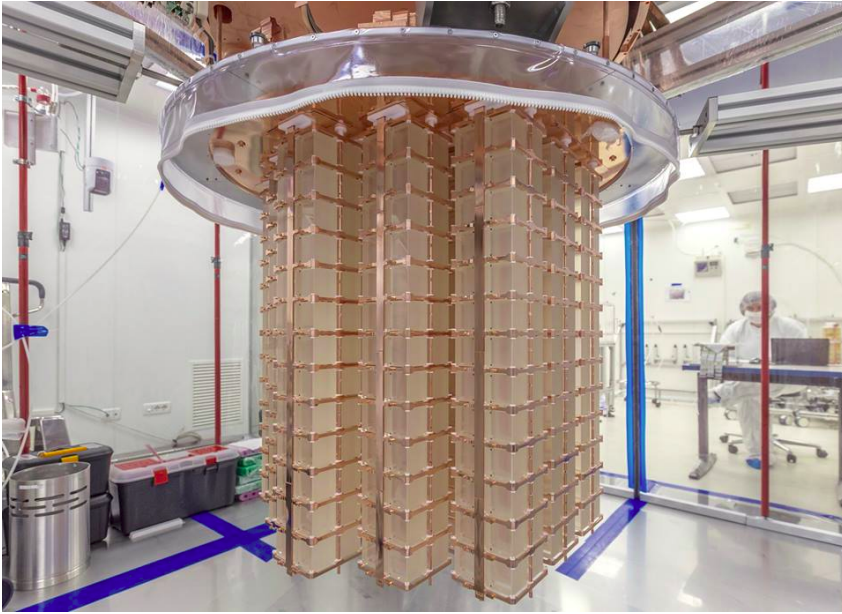
Genova:

- costruzione esperimento
- DAQ e analisi dati

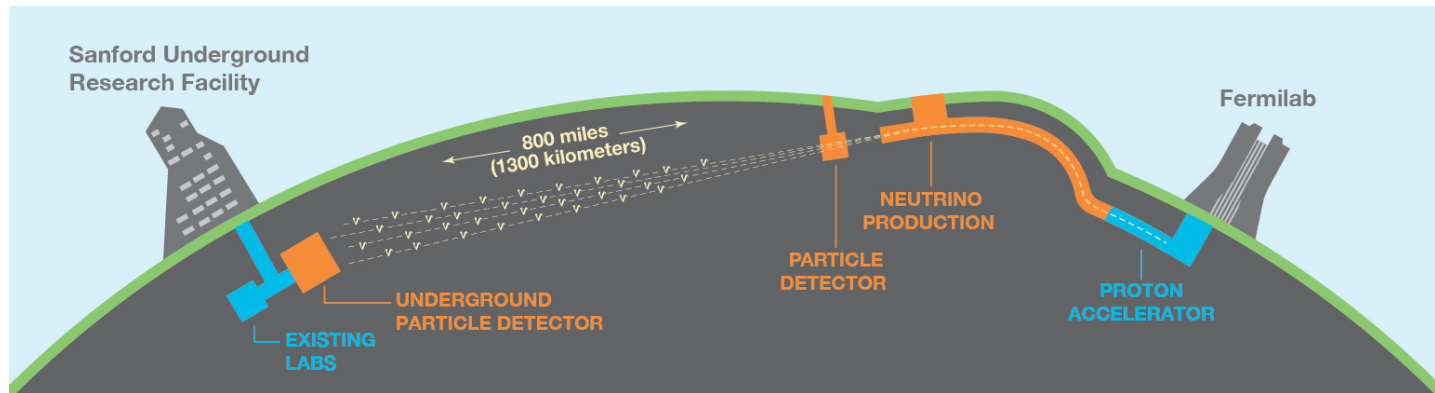
PRESA DATI INIZIATA!!



Installazione CUORE

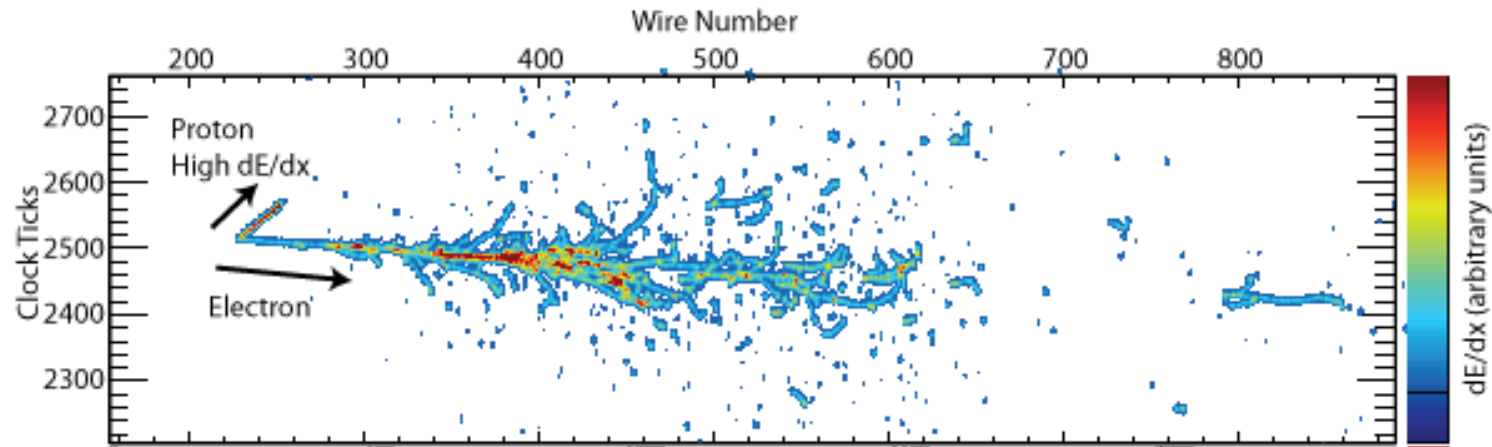


DUNE



- Misura della fase δ_{CP} $\rightarrow$ violazione di CP nel settore leptónico
- Misura attraverso oscillazioni $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ e $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$
- Fascio di $\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ prodotti al Fermilab ($E \sim \text{GeV}$)
- Baseline $\sim 1300 \text{ km}$
- Near detector per caratterizzare il fascio
- Far detector per rivelare le oscillazioni
- Ampio programma di fisica: δ_{CP} , θ_{13} , θ_{23} , gerarchia di massa, decadimento del protone, sezioni d'urto neutrino-materia

DUNE



- **Far detector:**
 - LAr TPC
 - Grande massa (40 kton)
 - Detector underground (1.5 km)
- **Prototipi:**
 - Prototipi in costruzione (CERN)
 - Tecnologia simile ad ICARUS
- **Near detector:**
 - Design in fase di progettazione
- **Presa dati DUNE:**
 - Inizio presa dati nel 2027

Possibilità di tesi di laurea sull'esperimento

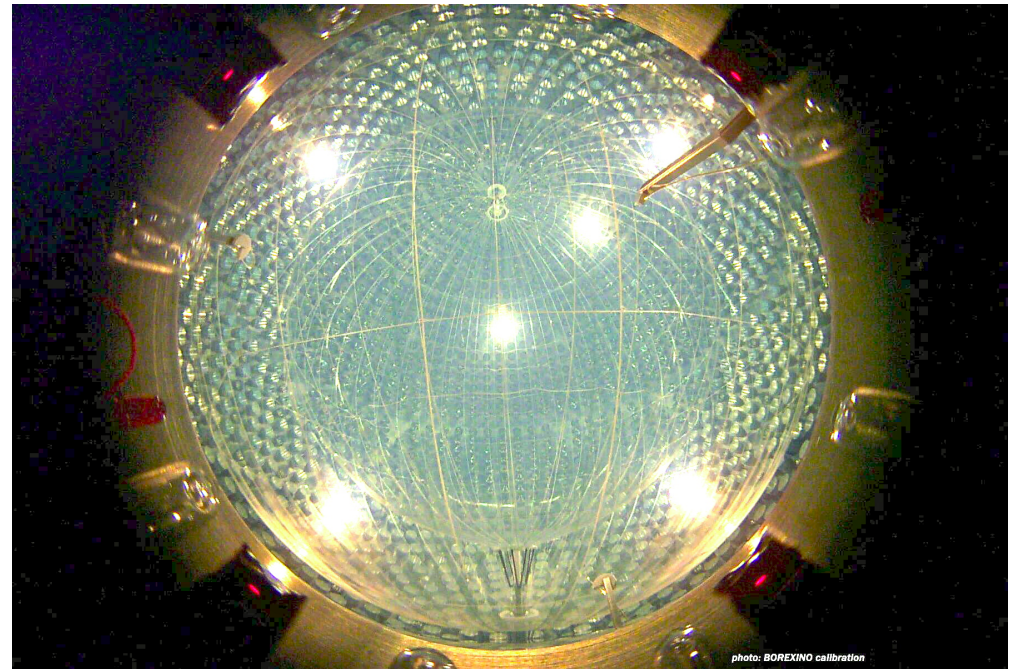
Conclusioni

- La fisica del neutrino è una linea di ricerca molto attiva
- Esistono tuttora molte questioni aperte sulla natura di queste particelle e sulle loro proprietà
- La generazione attuale e futura di esperimenti potrà rispondere a molte di queste domande
- I neutrini possono aiutarci a comprendere meglio i meccanismi e la composizione del Sole e l'interno della Terra

Backup

L'esperimento Borexino

- Esperimento in presa dati presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dal 2007
- Utilizza la scintillazione come tecnica per rivelare neutrini
- Ha una massa attiva di circa 300 tonnellate di scintillatore liquido



Neutrini catena pp

- Analisi a bassa energia ($Q = 420$ keV, $T_e < 261$ keV)
- Forma spettrale del ^{14}C ?
- Pile-up di eventi (soprattutto ^{14}C con ^{14}C)

