

Studio del segnale di anti-neutrini da reattore nell'esperimento Borexino

Relatore:

Fabio Mantovani

Corelatore:

Barbara Ricci

Laureanda:

Silvia Vitali



Sommario

- Introduzione: antineutrini e motivazioni dello studio.
- Produzione degli antineutrini nei reattori.
- Studio del flusso di antineutrini da reattore in Borexino.
- La reazione β inversa.
- Stima del segnale atteso in Borexino: confronto tra miei calcoli ed i risultati pubblicati dalla Borexino Collaboration.



Introduzione agli antineutrini

- Gli anti-neutrini / neutrini hanno **interazioni solo di tipo debole** con la materia (interazione gravitazionale trascurabile sulla terra) e viaggiano a velocità prossime a c .
- Esistono **tre flavour** di neutrini/anti-neutrini, che completano le tre famiglie di leptoni carichi.

$$\begin{pmatrix} e \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \tau \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}.$$

$$\Delta m^2 = 7.59_{-0.21}^{+0.19} \cdot 10^{-5} eV^2$$

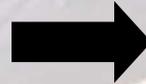
$$\theta = 34.4_{-1.2}^{+1.3} \text{ deg}$$

Probabilità di sopravvivenza ($1 - P_{e \rightarrow \mu}$)
considerando solo e, μ : dipende da L ed E !!

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left[\frac{1,27 \Delta m_{12}^2 (eV^2) L(\text{km})}{E(\text{GeV})} \right]$$

- Fra i fenomeni più importanti da ricordare c'è il fenomeno delle **OSCILLAZIONI**: il neutrino cambia flavour percorrendo una distanza L .

Per valori di $L/E \rightarrow \infty$



$$\langle P_{ee} \rangle \sim 0,57$$



Perché gli anti-neutrini da reattore?

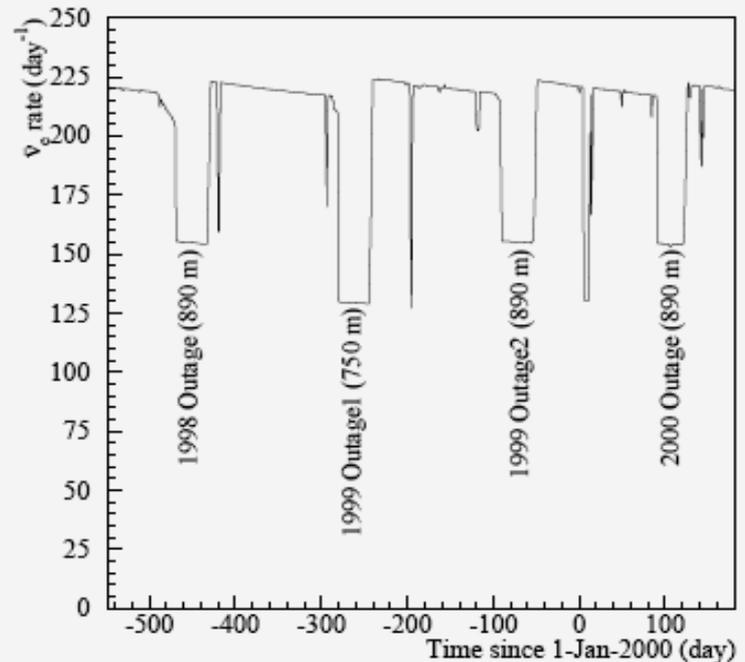
La rivelazione di $\bar{\nu}$ /anti- ν dà informazioni **dirette** e in **tempo reale** sul reattore (applicazioni civili e militari)

Nel caso degli anti- ν prodotti in un **reattore** è possibile calcolare in anticipo il **numero di eventi atteso** al detector se si conoscono:

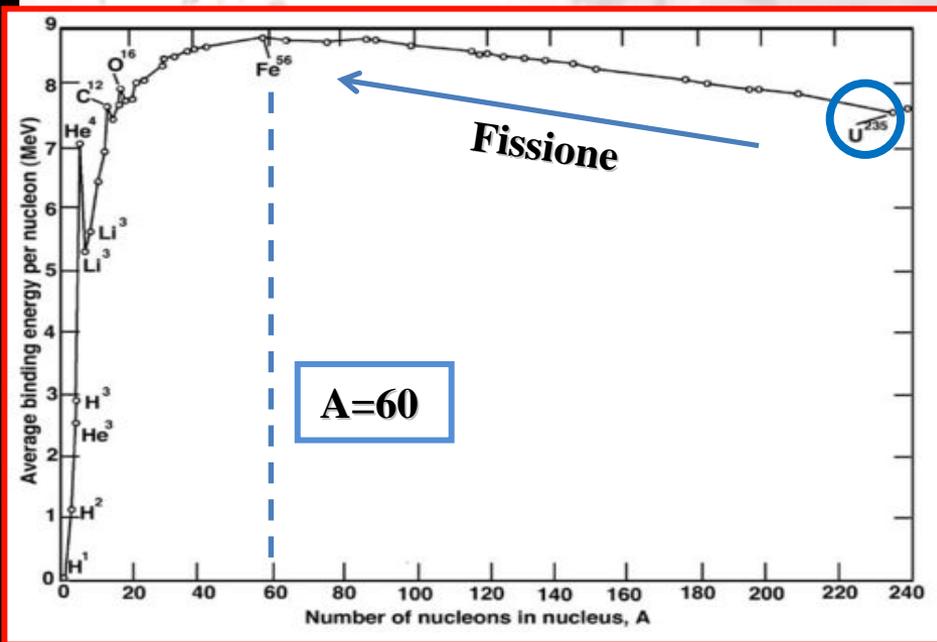
- **distanza** reattore – detector
- **fission rate** del reattore,
- **potenza termica**
- **spettro energetico** degli anti- ν

- Valutare il deficit eventi nello studio delle **oscillazioni di neutrino**.
- Valutare numero di eventi nello studio dei **geoneutrini**

FLUSSO ANTI- $\bar{\nu}$ IN FUNZIONE DI t



Energia di legame e fissione nucleare



- **FISSIONE** : nucleo pesante si divide in **frammenti** spontaneamente o con un apporto di energia **esterna** (neutrone).
- Deve produrre energia \rightarrow **ESOERGONICA** se i frammenti sono più legati del nucleo iniziale:

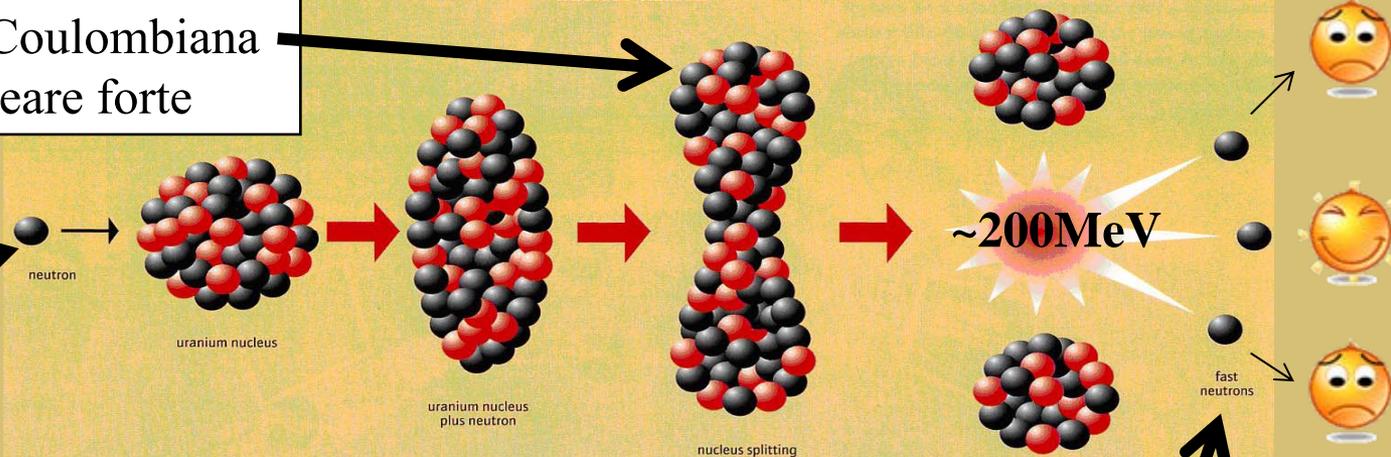
$$\epsilon(A) < \epsilon(A_1), \epsilon(A_2)$$

Deformazione : forza Coulombiana prevale sulla forza nucleare forte

Neutrone d'innescò

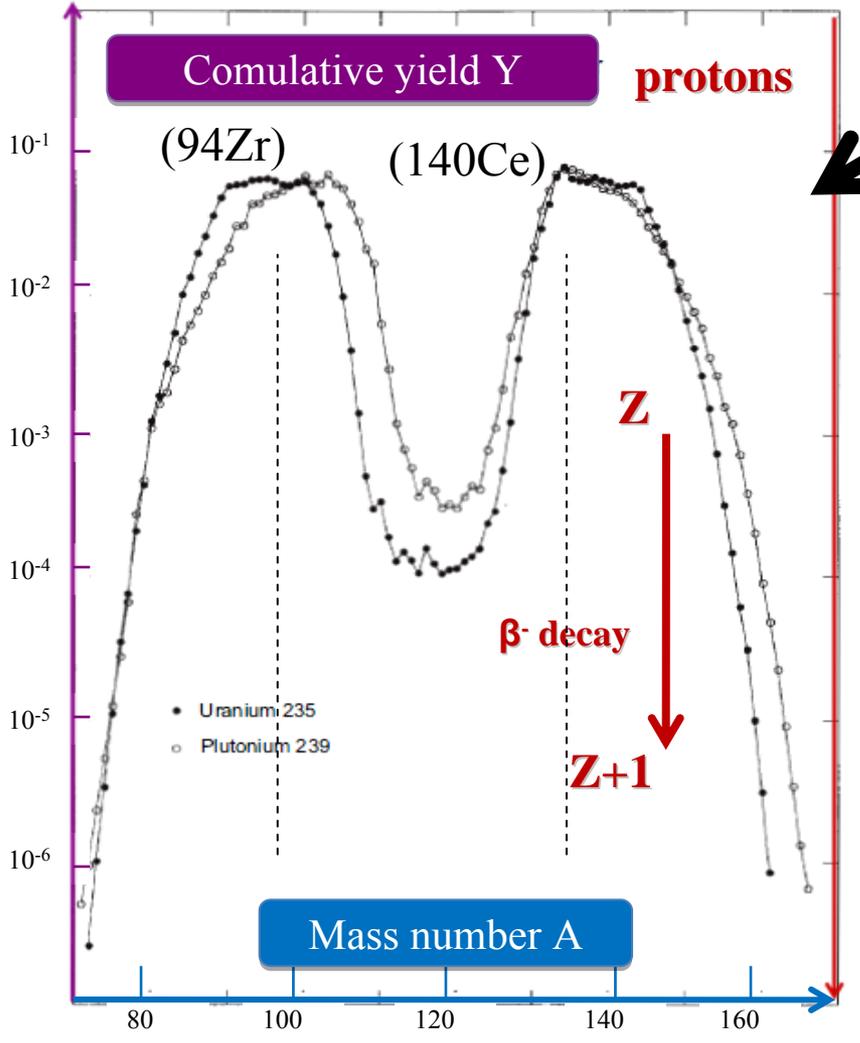
nuclear fission

Nuclei instabili

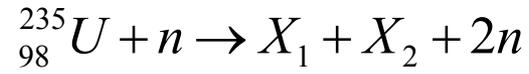


Neutroni liberi, solo 1 innesca!

Prodotti di fissione

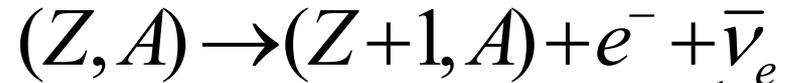


Distribuzione del numero di massa dei frammenti



→ Surplus di neutroni nei frammenti:

• Decadimento β^- :



Si producono ~ 6 anti- ν per fissione!

- Emissione di neutroni (2-3 per fissione di U).
- Emissione ~200MeV di energia.

La fissione nel reattore

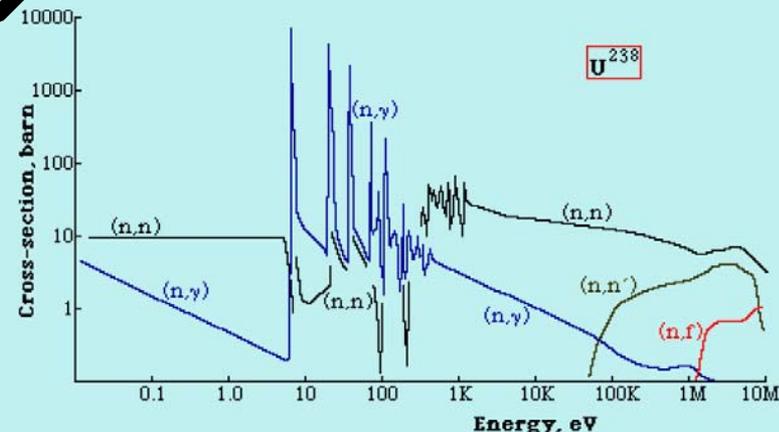
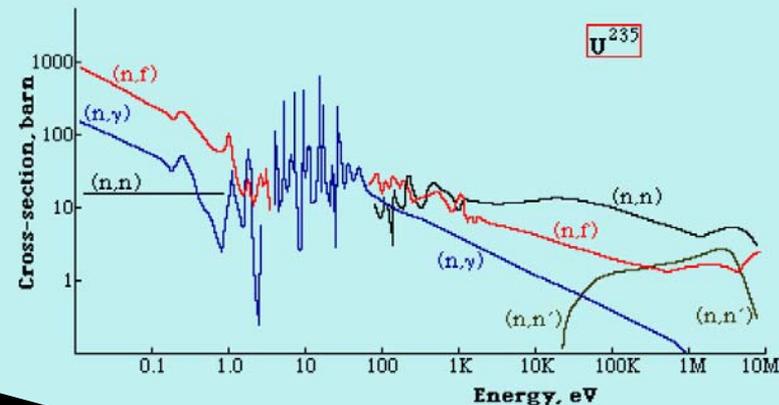
N fissioni $\rightarrow Nk$ fissioni $\rightarrow Nk^2$ fissioni

Reazione a catena controllata $\rightarrow k=1$.

Isotopi che fissionano:

^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu \rightarrow più del 99% delle fissioni.

Fission rate (n_f / t) di ogni isotopo dipende da **sezioni d'urto neutroniche** (fissione, cattura, scattering), quindi dall'energia dei neutroni (MeV).



$$\left(\frac{n_f}{t} \right)_i = P \frac{p_i}{Q_i}$$

Power fraction

Q-valore

Potenza effettiva

Nucleo	Q_i [MeV]	f_i	p_i
^{235}U	$201,7 \pm 0,6$	0,57	0,56
^{238}U	$205,0 \pm 0,9$	0,078	0,078
^{239}Pu	$210,0 \pm 0,9$	0,295	0,302
^{241}Pu	$212,4 \pm 1,0$	0,057	0,059

Ciclo del combustibile

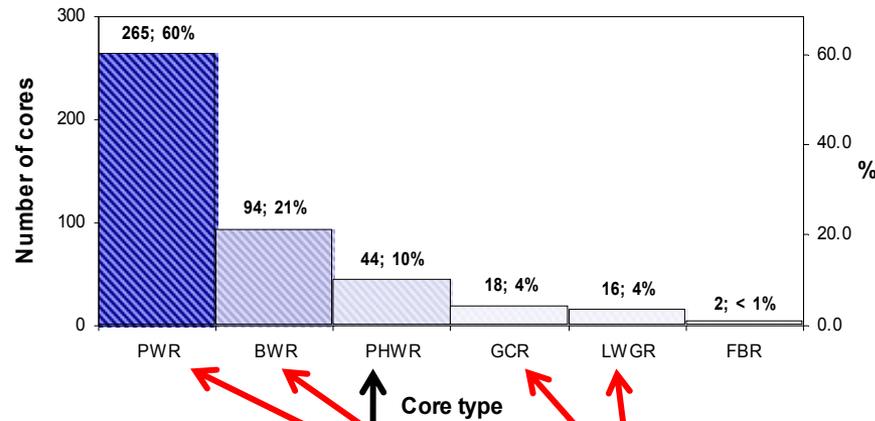
- Il fission rate di un isotopo dipende dal **burnup** [MWd/ton]: aumenta nel tempo.

235U si consuma

238U resta quasi costante (costituisce il 97% del combustibile arricchito e fissiona 10 volte meno di 235U)

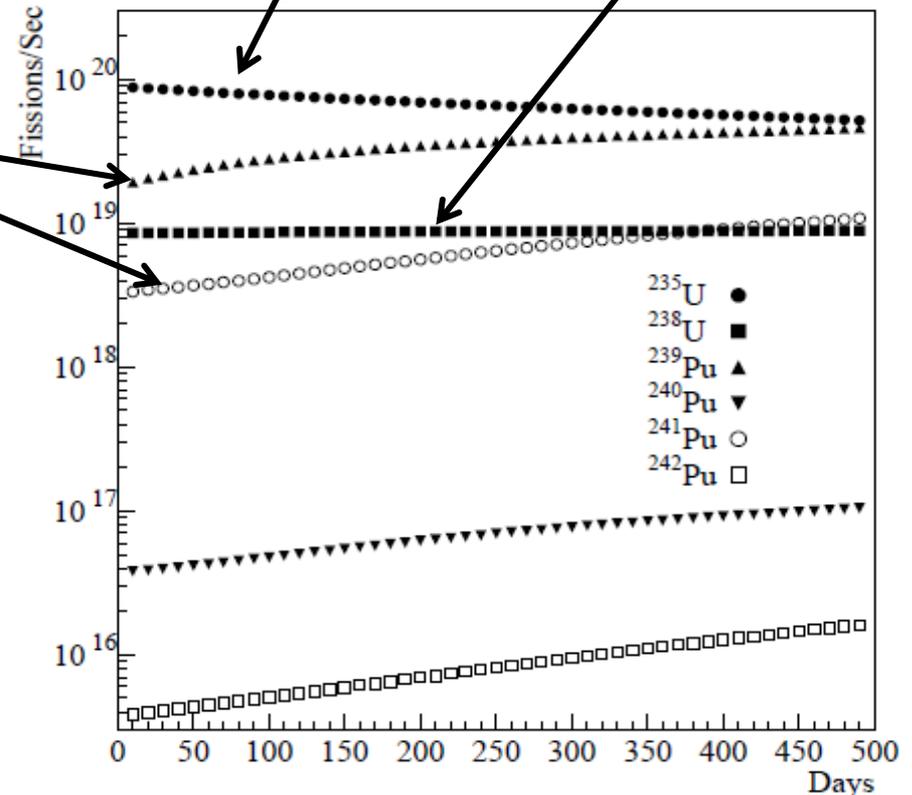
Pu si genera da cattura neutronica di 238U

Principali tipi di reattori

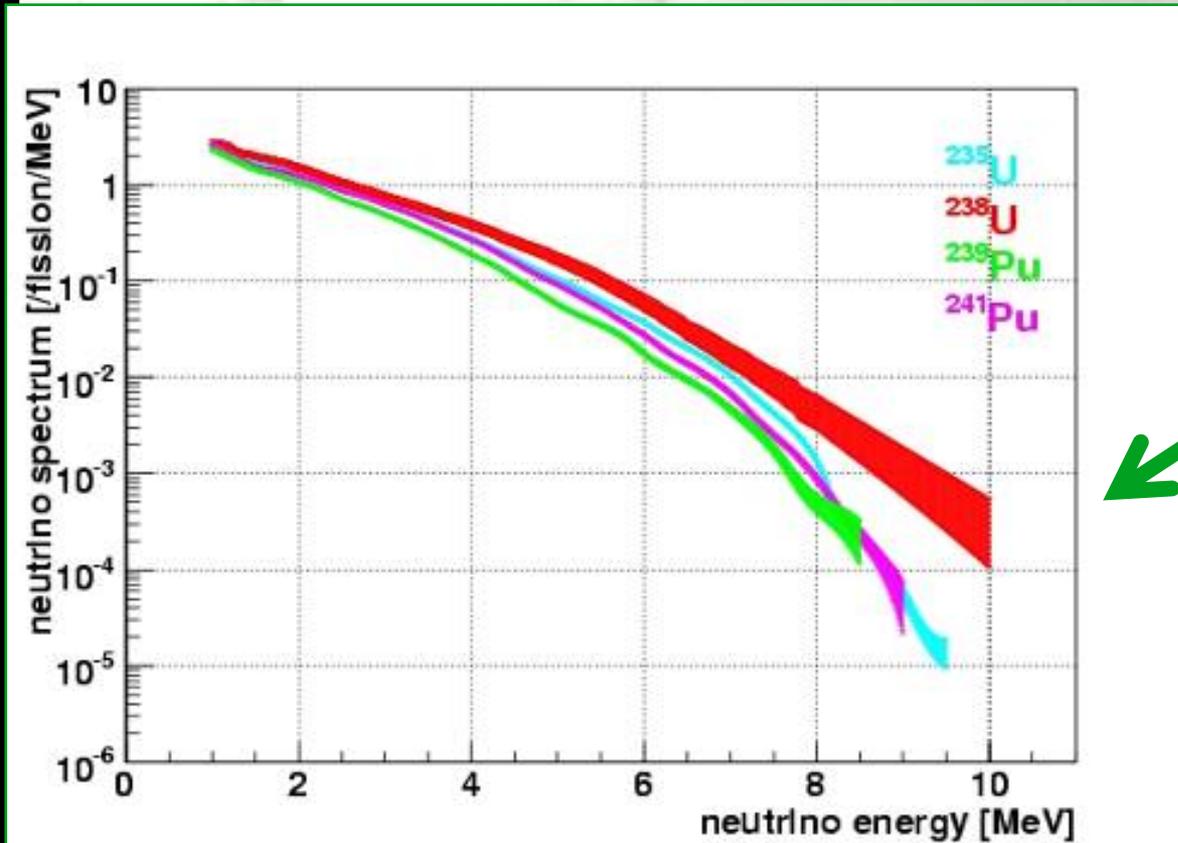


Uranio naturale

Uranio arricchito
3-5%



Spettro degli antineutrini



SPETTRO DI OGNI REATTORE è unico: dipende dal **fission rate** e dallo **spettro di antineutrini prodotti da ogni isotopo**.

$$\Phi_r(E_{\bar{\nu}}) = \sum_i^{\text{isotopes}} f_i \cdot \phi_i(E)$$

Di 6 **anti-ν** prodotti nei β-dacay solo alcuni hanno **E > 1,8 MeV** (RIVELABILI con **reazione β inversa**).

Nuclide <i>l</i> -esimo	N_l^{ν}
^{235}U	1,92(1±0,019)
^{238}U	2,38(1±0,020)
^{239}Pu	1,45(1±0,021)
^{241}Pu	1,83(1±0,019)

Calcolo del flusso

Giorni effettivi di presa dati

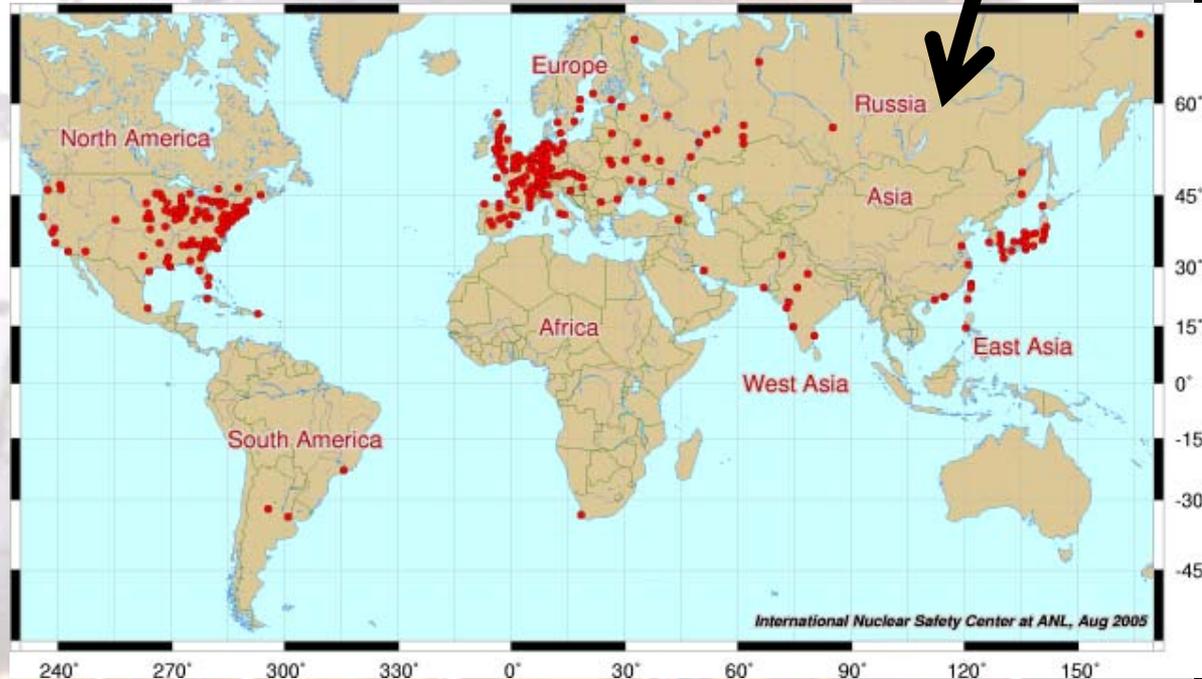
$$\Phi(E_{v_e}) = \sum_{r=1}^{N_{react.}} \sum_{m=1}^{mesi} \frac{T_m}{4\pi L_r^2} \cdot P_{rm} \times \sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{Q_i} \cdot \phi_i(E_{v_e}) \cdot P_{ee}(E_{v_e}; \hat{\theta}, L_r)$$

Potenza effettiva
= Potenza nominale * Load Factor

Probabilità di sopravvivenza
nel vuoto

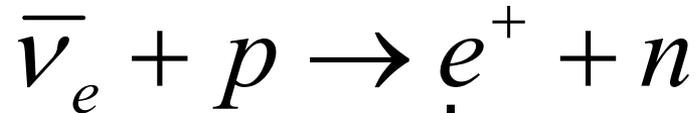
Si tiene conto dei
439 reattori nel
mondo descritti dal
database IAEA.

Nell'ambito di questa tesi
abbiamo sviluppato un
DB con tutte le
informazioni dei 439
core del mondo: lat, long,
 W_{Th} , W_{El} , LF_m, \dots



La reazione beta inversa

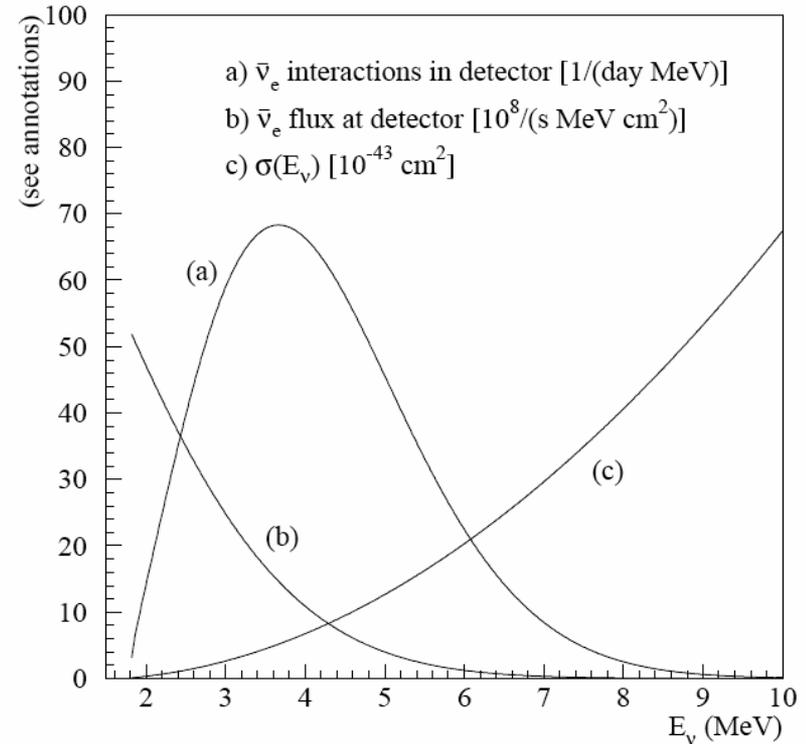
Avviene su **p** liberi → scintillatore ricco di idrogeni (es: C9H12)



$$E_{prompt} = E_{\bar{\nu}} - 1,8MeV + 2m_e$$
$$\rightarrow E_{\bar{\nu}} \approx E_{prompt} + 0,8MeV$$



- Energia di soglia:
 $E_0 = 1,806MeV$



$$\langle \sigma \rangle = (5,89 \pm 0,18) * 10^{-43} cm^2 / fission$$

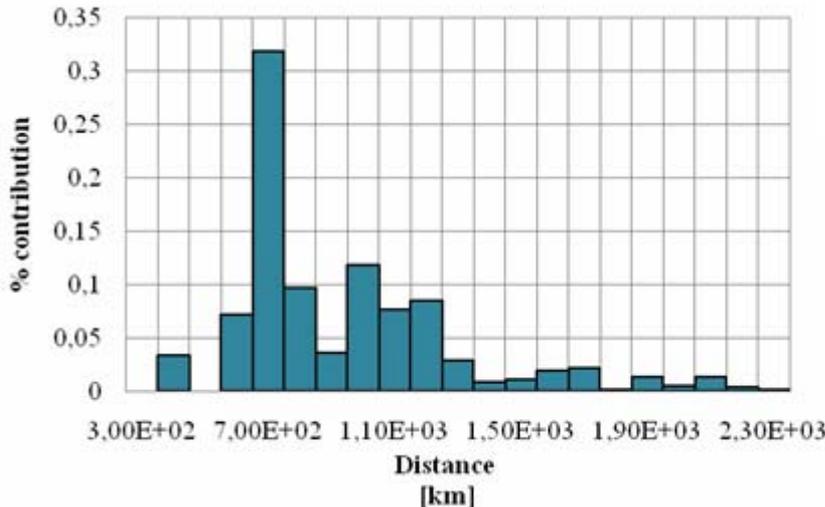
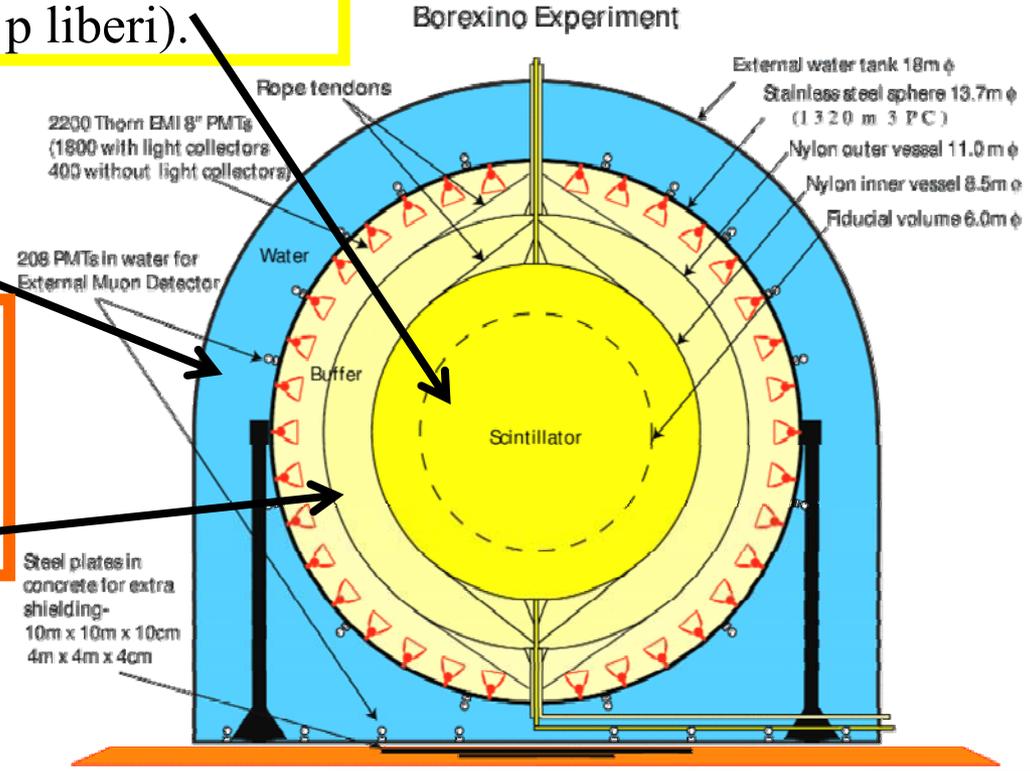
Sezione d'urto media pesata sullo spettro da reattore.

Borexino [LNGS]

Scintillatore : pseudocumene (C₉H₁₂) + fluorescenti.
 278ton → 171ton massa fiduciale (10⁻³¹ p liberi).

Water Tank + 208PMT → rivelano
 μ per Cerenkov

Buffer (pseudocumene) + 2200PMT
 → 1800direzionali (solo scintillatore attivo);
 400 tutta sfera interna per neutroni di back ground.



CONTRIBUTO AL SEGNALE:

- reattore più vicino: 3,3%
- il 30% del segnale viene dai reattori posti a circa 700 km

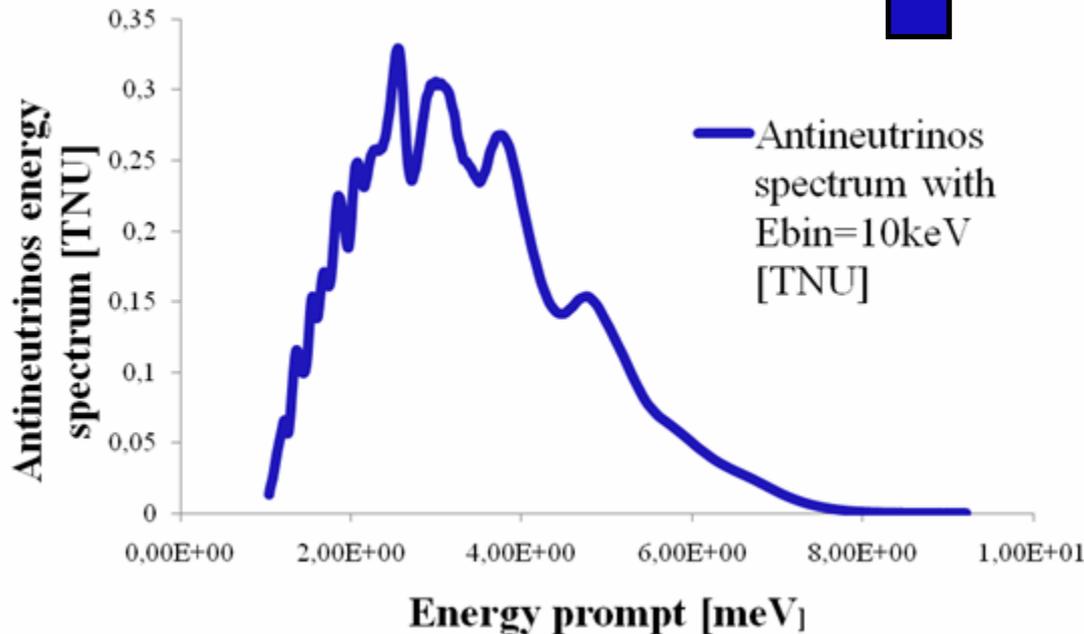
■ contribution with osc. in vac.

Stima del segnale

$$N_{tot} = \varepsilon \cdot N_p \cdot \int dE_\nu \Phi_\nu(E_\nu) \sigma(E_\nu)$$

$$= \varepsilon \cdot N_p \sum_{r=1}^{R_{reactors}} \frac{P_r^{nom}}{4\pi L_r^2} \left(\sum_{m=1}^{M_{mesi}} LF_{rm} T_m \int dE_\nu \sum_{i=1}^{4_{isotopes}} \frac{P_i}{Q_i} \phi_i(E_\nu) P_{ee}(E_\nu, L) \sigma(E_\nu) \right)$$

Spettro integrato su energia e moltiplicato per efficienza e protoni liberi del detector → numero di eventi!



Il segnale viene calcolato in TNU:

$$1\text{TNU} = 1\text{event}/(10^{32}\text{p}\cdot\text{yr}).$$

Si converte questo valore con massa fiduciale e live time ottenendo:

$$[\text{dic. 2007} - \text{dic. 2009}]$$

$$N_{\text{exp}} = (14,3 \pm 0,7) \text{ events}$$

$$(\text{=} N [\text{TNU}] \cdot \text{livetime} [\text{yr}] \cdot \text{massa fiduciale} [\text{ton}] \cdot 6,2 \cdot 10^{28} [\text{p-liberi/ton}])$$

Il segnale in Phys. Lett. B 687 2010

Periodo presa dati: **dicembre 2007-dicembre2009.**

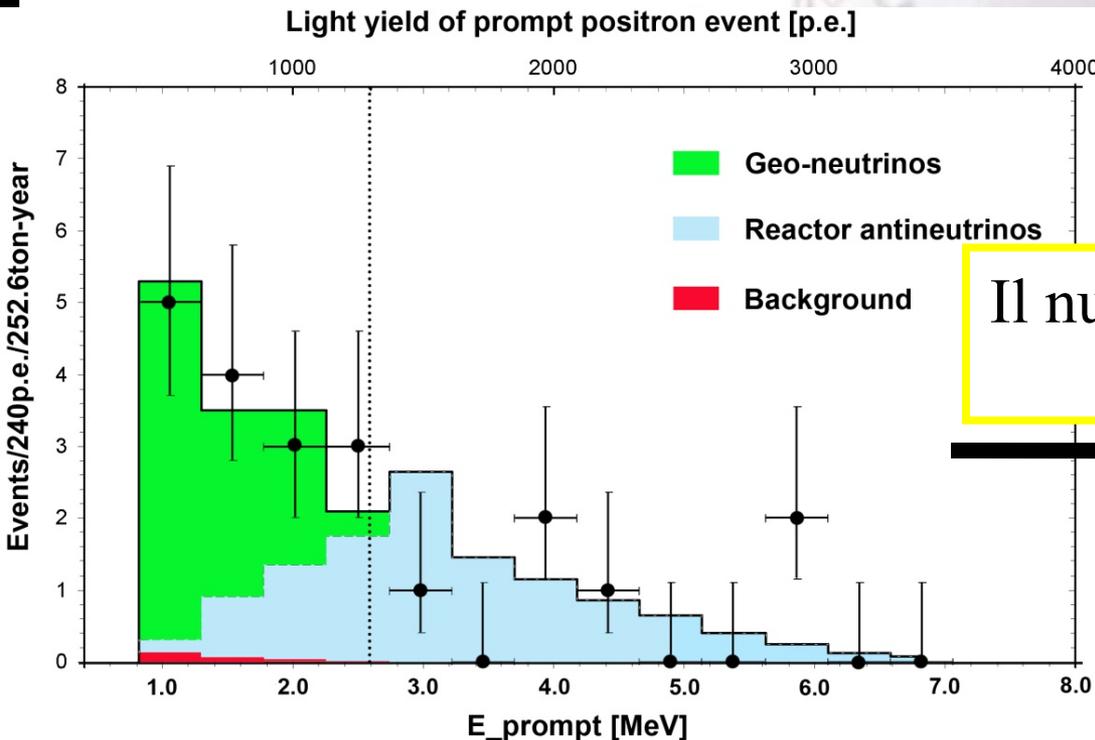
Si considerano i parametri **live-time** e **fiducial mass**.

$T=537,2$ day

$M_{\text{fid}}=171,6$ ton

- Il numero di eventi **atteso** da anti- ν da reattore è:

$$N_{\text{expBor}} = 14,4 \pm 0,8 \text{ events}$$



Il numero di eventi **osservato** è:

$$N_{\text{geo}} = 9,9^{+4,1}_{-3,4} \begin{pmatrix} +14,6 \\ -8,2 \end{pmatrix}$$
$$N_{\text{react}} = 10,7^{+4,3}_{-3,4} \begin{pmatrix} +15,8 \\ -8,0 \end{pmatrix}$$

Conclusioni

- La mia stima del segnale è consistente sia con la stima di Borexino sia con il numero di eventi da reattore osservato.

$$N_{\text{exp}} = (14,3 \pm 0,7) \text{ events}$$



- Nella stima si considera un errore del 5% imputato principalmente a incertezze su:

- angolo di mixing,
- spettro energetico da isotopi,
- potenza termica effettiva dei reattori,
- fission rate (ciclo combustibile e composizione)

$$N_{\text{exp-Bor}} = 14,4 \pm 0,8 \text{ events}$$

$$N_{\text{meas}} = 10,7^{+4,3}_{-3,4} \begin{pmatrix} +15,8 \\ -8,0 \end{pmatrix}$$

Il risultato di questa tesi può essere ulteriormente raffinato se si tiene conto di:

- Effetto di materia.
- Antineutrini da scorie.
- Livetime e LF presi con una maggior risoluzione temporale.
- Avere maggiori dettagli su

W_{Th}