



La distribuzione angolare di anti-neutrini in un detector a liquido scintillante di grandi dimensioni: un caso di studio sul detector LENA

Relatore: Dr. Mantovani Fabio

Laureando: Provenzano Andrea

Corelatore: Dr.ssa Ricci Barbara



Sommario

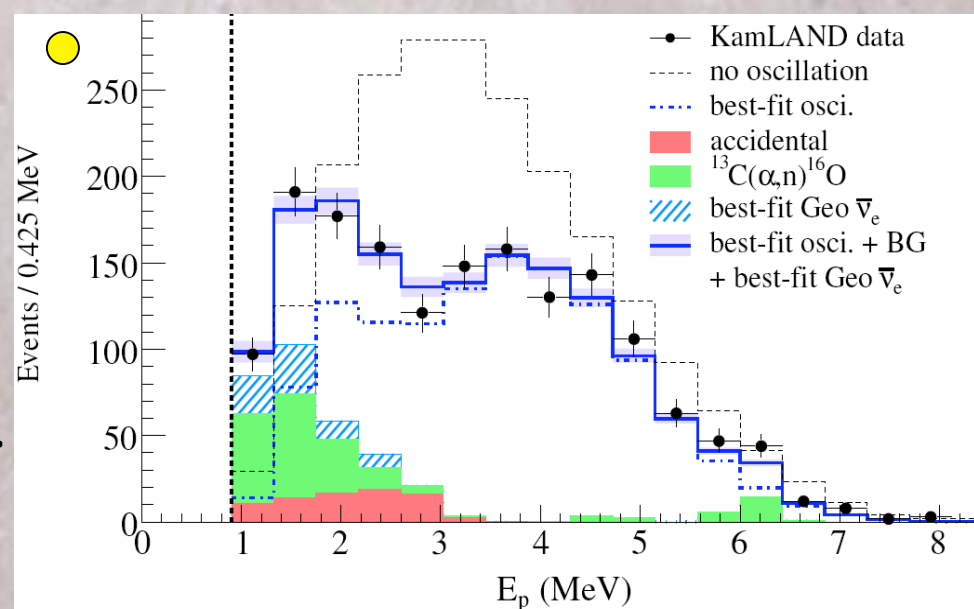
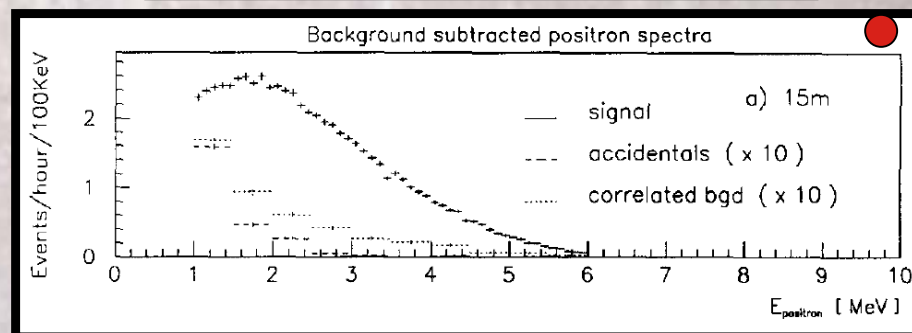
- Antineutrino: dalle prime ipotesi ai nuovi esperimenti.
- Motivazioni e metodi delle misure di anti-neutrini.
- Reazione beta-inversa.
- Processi di termalizzazione del neutrone.
- Principali elementi dopanti dei LS (Gadolinio, Boro e Litio)
- Il detector LENA
- Studio del segnale di geo-neutrini in LENA
- Conclusioni

Anti-neutrino: dalle prime ipotesi ai nuovi esperimenti

- 1914: prima osservazione dello spettro del decadimento β .
- 1930: W. Pauli ipotizza una nuova particella coinvolta nel decadimento β .
- 1956: prima misura sperimentale della sezione d'urto antineutrino-protone (esp. Savannah).
- 1995: misura accurata dello spettro di antineutrini da reattore (esp. Bugey).
- 1998: esperimenti long-baseline (Chooz, Paloverde).
- 2002-2010 KamLAND e Borexino.

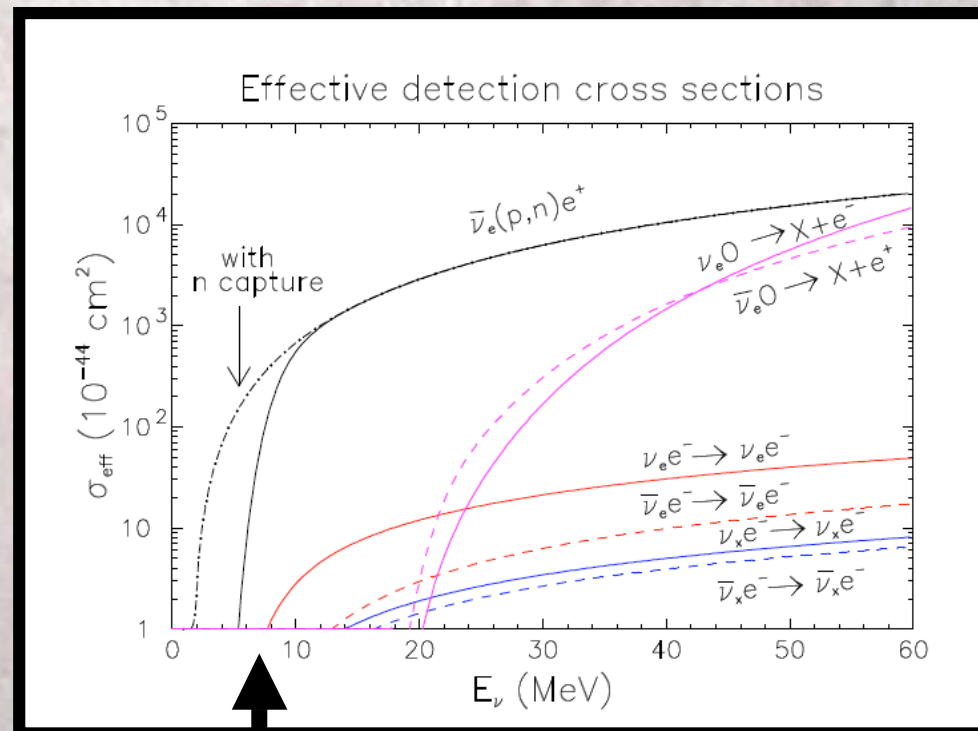
$$\sigma_{\text{exp}} = (1.2^{+0.7}_{-0.4}) \times 10^{-43} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{\text{th}} = (1.0 \pm 0.17) \times 10^{-43} \text{ cm}^2$$



Motivazioni e metodi delle misure di anti-neutrini

- Reattori: sorgenti antropiche forniscono flussi intensi utili allo studio della sezione d'urto dell'antineutrino-protonone e dei parametri di oscillazione.
- Terra: gli antineutrini permettono di esplorare la composizione chimica globale, ed in particolare la distribuzione di U, Th e ^{40}K .
- Esplosione di Supernova: comprendere le fasi finali del collasso gravitazionale di una stella di grande massa.

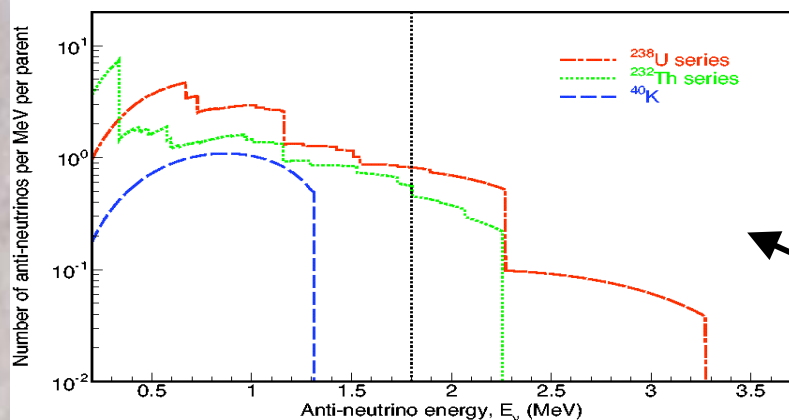


Sezione d'urto anti-neutrino-protonone è la più efficace a basse energie (Terra, Reattori).

Radioattività della Terra

- Composizione interna \Rightarrow osservazioni indirette del materiale proveniente dal mantello.
- Si stima che dei 40 TW emessi dalla superficie circa la metà siano dovuti al decadimento di ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K
- Con lo studio direzionale dei geo-nu \Rightarrow conferme delle abbondanze e del modello geo-chimico della terra.

Decay	$T_{1/2}$ [10^9 yr]	E_{max} [MeV]	Q [MeV]	$\varepsilon_{\bar{\nu}}$ [$\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$]	ε_H [W/kg]
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\ ^4\text{He} + 6e + 6\bar{\nu}$	4.47	3.26	51.7	7.46×10^7	0.95×10^{-4}
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\ ^4\text{He} + 4e + 4\bar{\nu}$	14.0	2.25	42.7	1.62×10^7	0.27×10^{-4}
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \bar{\nu}$ (89%)	1.28	1.311	1.311	2.32×10^8	0.22×10^{-4}



Il flusso totale:

$$\Phi_{\bar{\nu}} \approx 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Solo una frazione di geo-neutrini da U e Th sono sopra la soglia della beta inversa (no K)

B.S.E. model

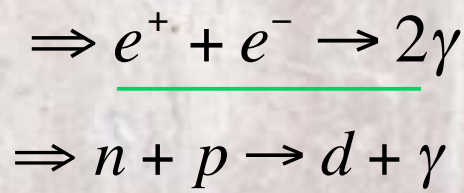
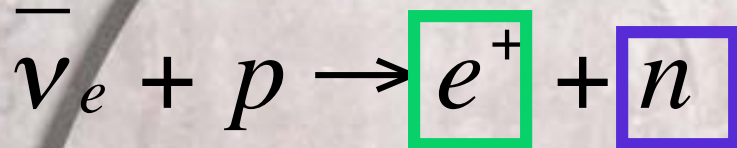
$$m(\text{U}) = 0.8 \times 10^{17} \text{ kg}$$

$$m(\text{Th}) = 3.2 \times 10^{17} \text{ kg}$$

$$m(\text{K}) = 0.91 \times 10^{21} \text{ kg}$$

Reazione beta-inversa

- La reazione utilizzata per il rilevamento degli antineutrini è la beta inversa:



Prompt signal

$$\tau \approx 210\mu\text{s}$$

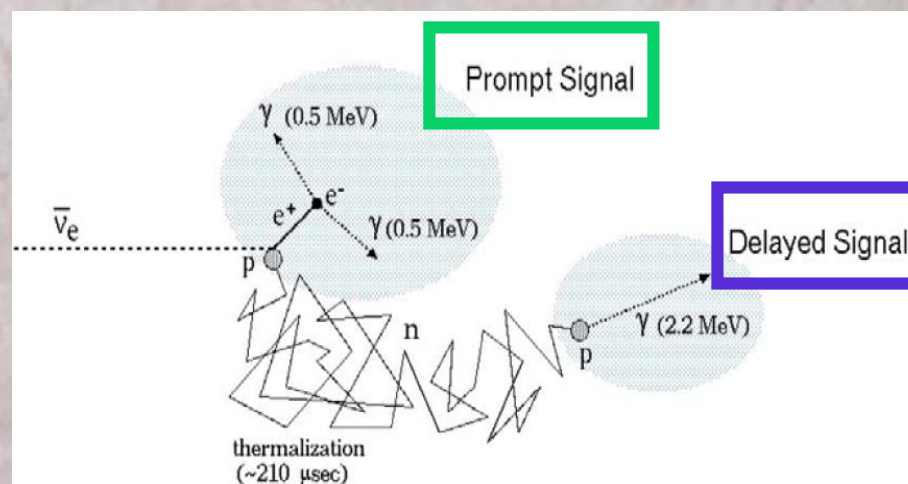
Delayed signal

- L'evento di cattura è segnato da una coincidenza tra prompt e delayed; l'intervallo tra i due segnali dipende dal cammino random del neutrone.
- L'angolo con cui viene emesso il neutrone, prima che avvengano urti, conserva informazioni sulla direzione dell'antineutrino incidente.
- Prima viene catturato il neutrone e maggiore è la probabilità di conoscere la direzione dell'antineutrino incidente

$$E_{\text{soglia}} = 1.8\text{MeV}$$

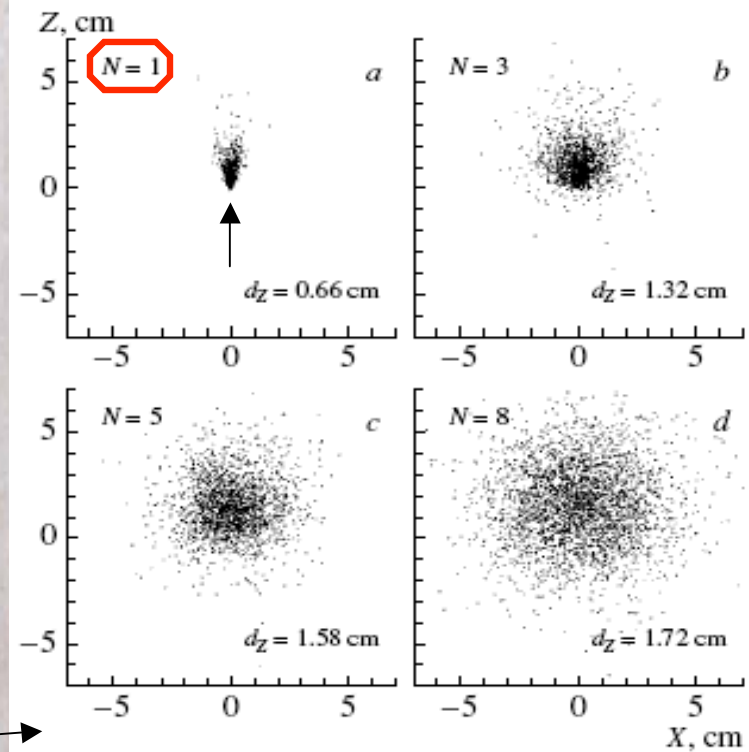
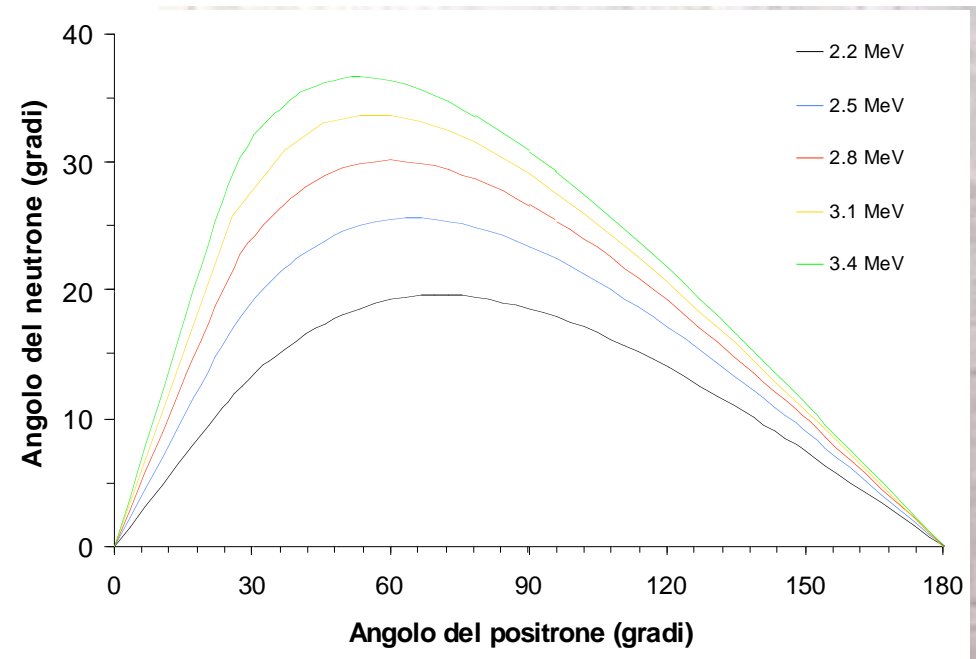
$$E_{\text{prompt}} = E_{\nu} - 0.8\text{MeV}$$

$$E_{\text{del} > H} = 2.2\text{MeV}$$



Termalizzazione del neutrone

- L'impulso maggiore è portato dal positrone.
- Fissata l'energia dell'anti-neutrino incidente il positrone può essere emesso in qualunque direzione a differenza del neutrone.
- Il processo di cattura neutronica è dominante, quando il neutrone ha energia termica.



Nucleo	<i>n° di urti durante la termalizzazione</i>
^1H	18
^2H	25
^4He	43
^{12}C	110

LS con gadolinio

- L'isotopo più utilizzato è ^{157}Gd :



$$\boxed{\sigma_{\text{Gad-termico}}} = 1.92 \times 10^5 \text{ barns}$$

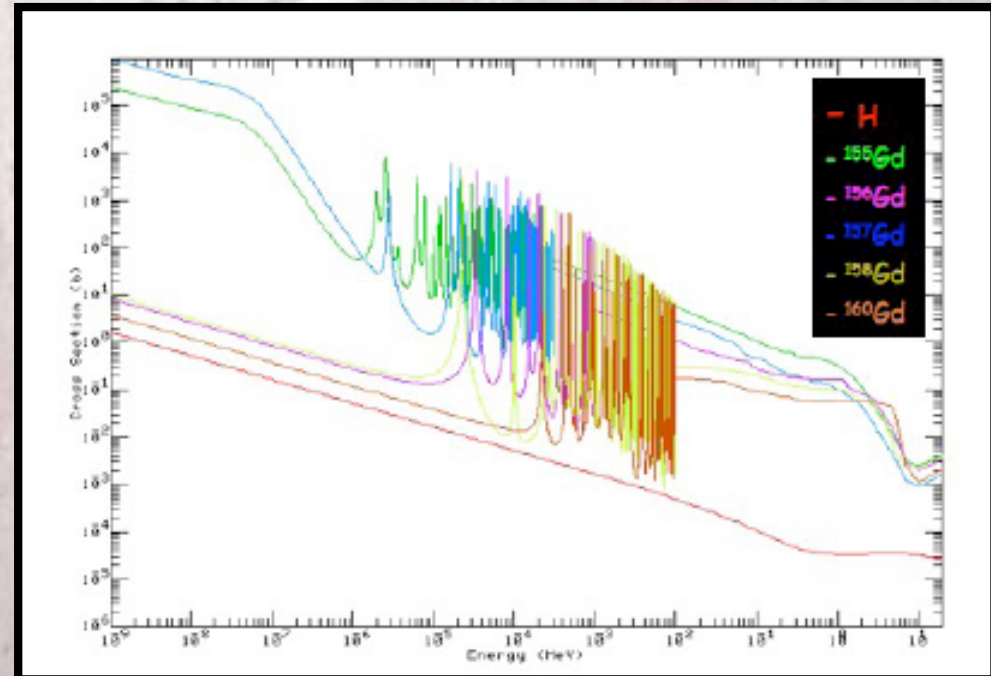
La probabilità di cattura pesata sull'abbondanza naturale per l'isotopo $\boxed{157}$ è 0.817.

+) **Vantaggi**

- Maggior sezione d'urto
- Rilascio di 8 MeV in cattura

-) **svantaggio**

$$\lambda_{\text{Gd}}(t) = \frac{\lambda_0}{1 + \alpha t} \quad \begin{array}{l} \lambda_0 = (587 \pm 33) \text{ cm} \\ \alpha = (4.2 \pm 0.4) \times 10^{-3} \text{ d}^{-1} \end{array}$$

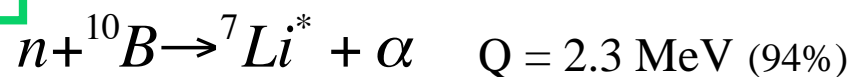


Concentrazione di Gd	τ_{cattura}
0.1	30.5
0.15	20.
0.2	16.
0.25	14.

LS con boro o litio

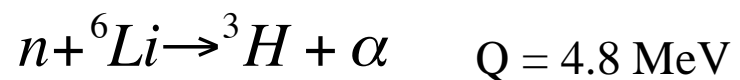
- Hanno valori di sezione d'urto minori rispetto al gadolinio.
- Lo scintillatore non subisce la perdita di trasparenza tipica del gadolinio. (n,a)

Boro



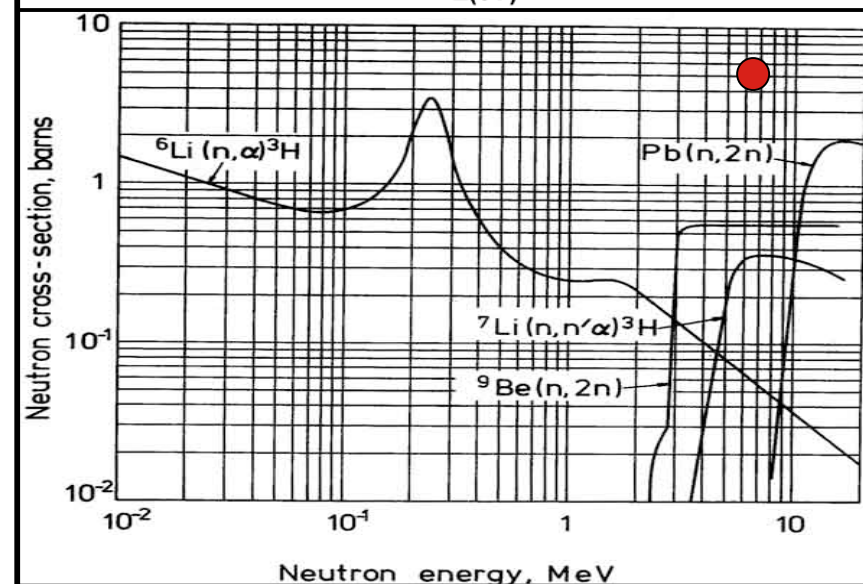
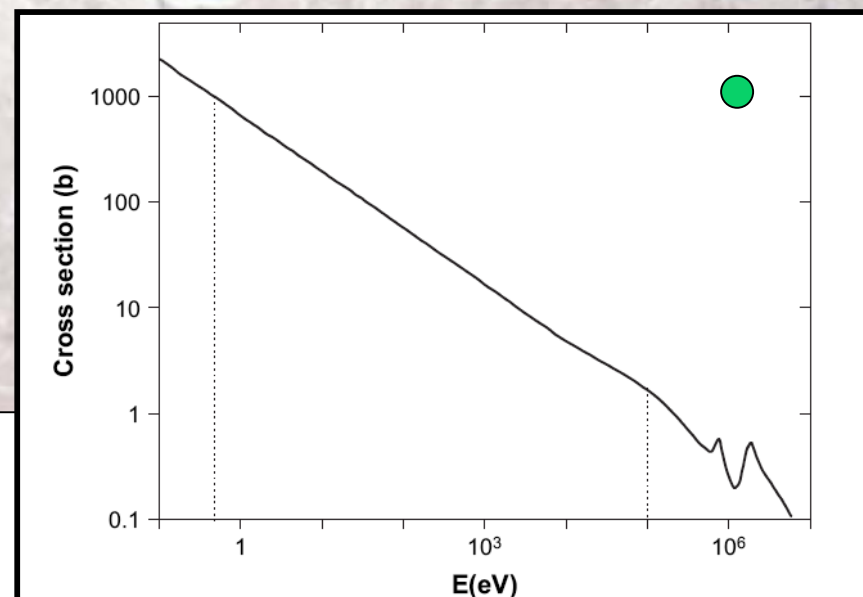
$$\sigma_{n\text{-termico}} = 3.8 \times 10^3 \text{ barns} \quad \text{Abb}_{\text{nat-iso}} = 0.199$$

Litio



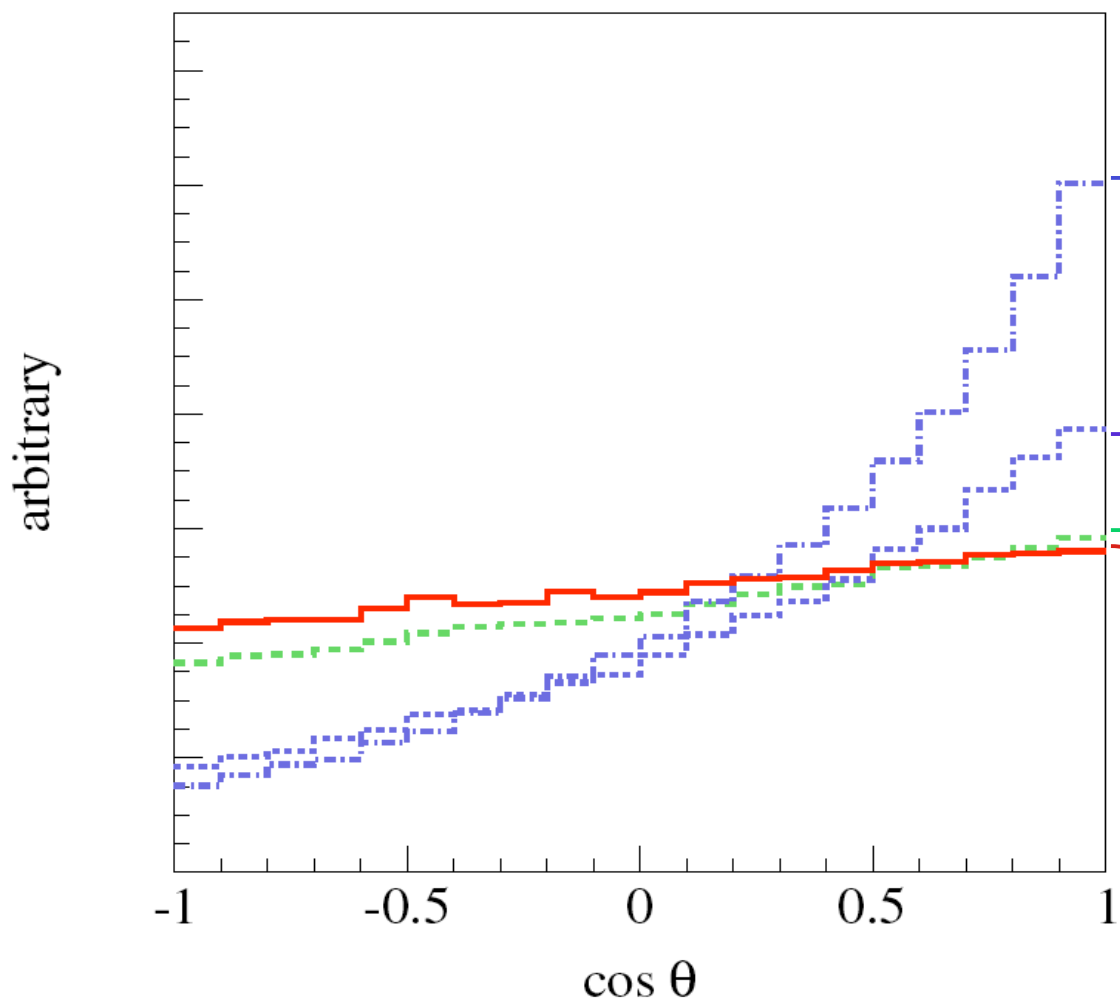
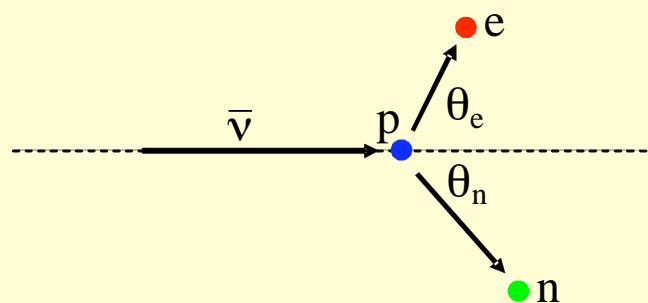
$$\sigma_{n\text{-termico}} = 9.4 \times 10^2 \text{ barns} \quad \text{Abb}_{\text{nat-iso}} = 0.075$$

NE320: ${}^6\text{Li}$ (1.5%) \Rightarrow lunghezza d'attenuazione 2.6 m \Rightarrow L.V.D.



Distribuzione angolare con LS dopati

Simulazione MC della distribuzione dell'angolo θ_n per la cattura di neutrone nella reazione β inversa con diversi dopanti nel LS.



^6Li 1.5% in peso

^6Li 0.15% in peso

^{10}B 1.0% in peso

KamLAND

Gruppi di ricerca sperimentali stanno studiando prototipi con questi dopanti.



- LENA è un progetto di L.V.D. (50 kt di scintillatore liquido).
- Siti candidati ad ospitare il detector: Pyhäsalmi (Finlandia) e Fréjus (Francia-Italia)
- Numerose motivazioni scientifiche: p-decay, neutrini solari, dark matter...
- Permetterà di misurare geo-neutrini con grandi statistiche (≈ 1000 eventi/anno).
- Con una decina di anni di acquisizione saremmo in grado di validare o confutare modelli geochimici terrestri
- Sarà a forma cilindrica, per evitare problemi di risoluzione spaziale dei fotomoltiplicatori.

Il detector LENA

Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m
shielding from cosmic rays: $\sim 4\,000$ mwe

Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)
Water Cherenkov Detector
1 500 phototubes
100 kt of water
reduction of fast
neutron background

Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m
70 kt of organic liquid
13 500 phototubes

Buffer

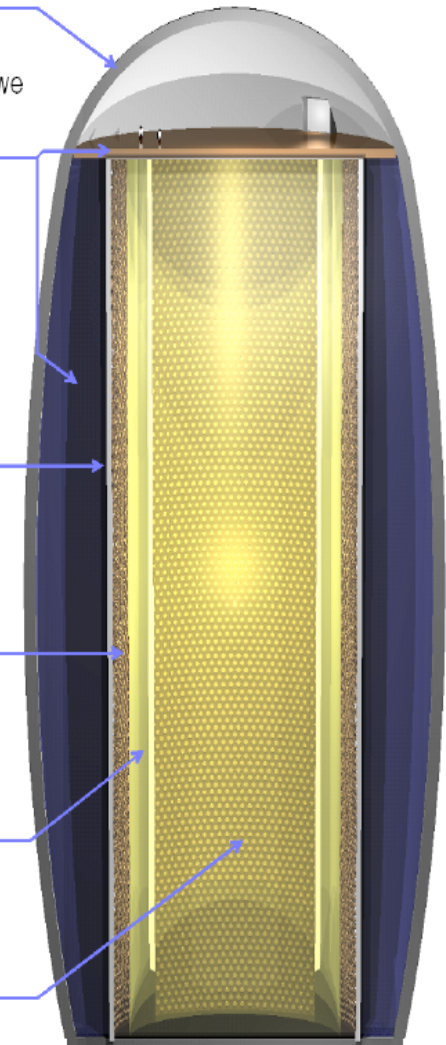
thickness: 2 m
non-scintillating organic liquid
shielding external radioactivity

Nylon Vessel

parting buffer liquid
from liquid scintillator

Target Volume

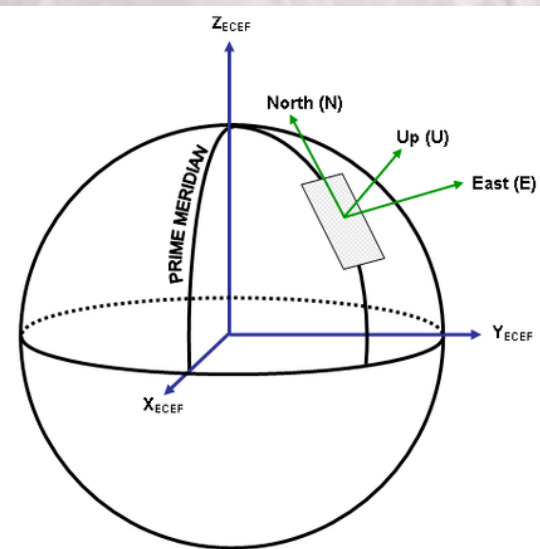
height: 100 m, diameter: 26 m
50 kt of liquid scintillator



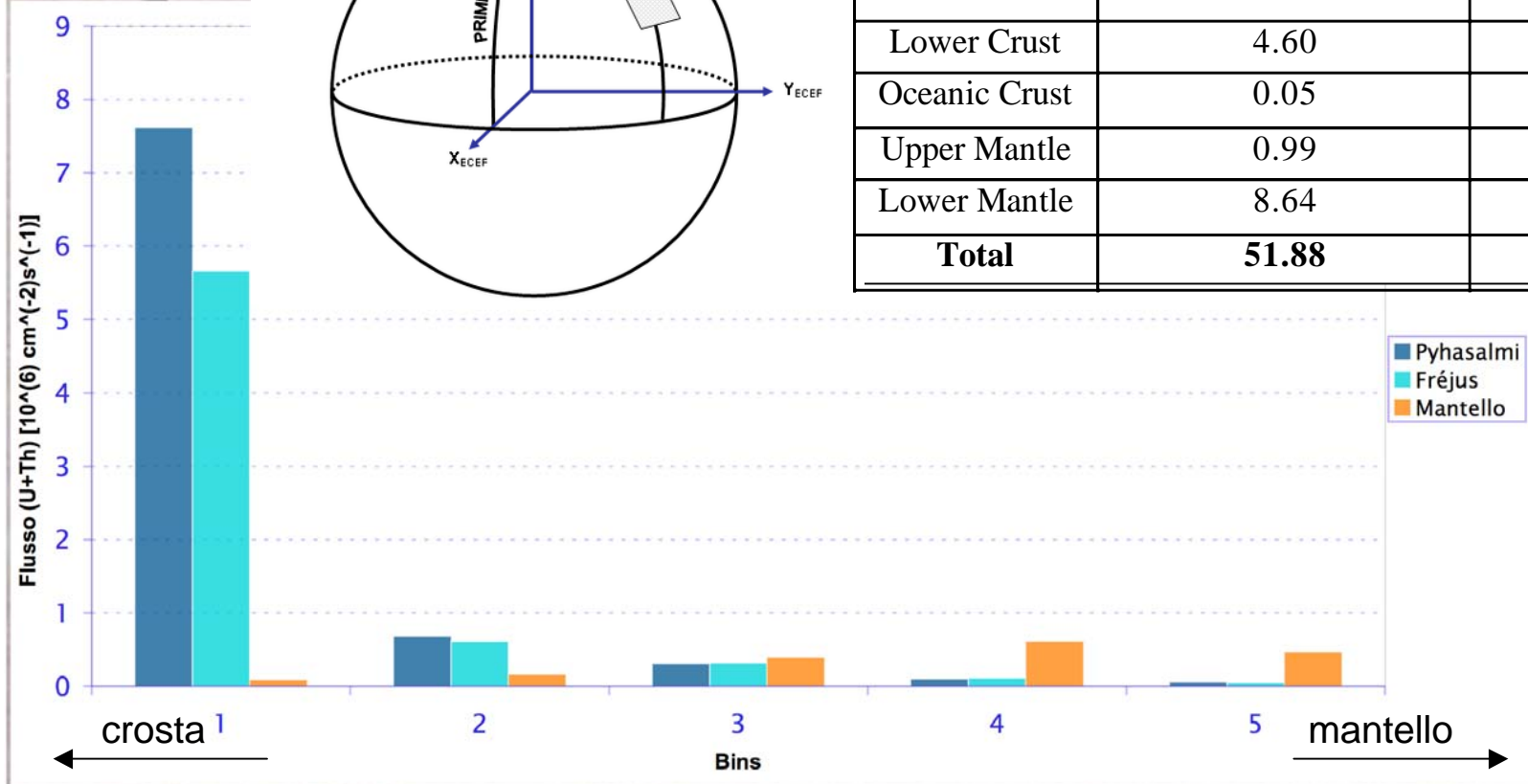


Segnale da geo-neutrini atteso in LENA

Utilizzando le abbondanze di U e Th fornite dal modello terrestre di riferimento abbiamo calcolato il segnale di geo-neutrini atteso nei due siti.



Strati	Pyhäsalmi S [U+Th] (TNU)	Fréjus S[U+Th] (TNU)
Sedimenti	0.77	1.40
Upper Crust	25.73	19.44
Middle Crust	11.10	8.31
Lower Crust	4.60	3.36
Oceanic Crust	0.05	0.09
Upper Mantle	0.99	0.99
Lower Mantle	8.64	8.64
Total	51.88	42.23



Conclusioni

Rilevare gli anti-neutrini è cruciale per:

- 1) Caratterizzazione delle proprietà fisiche (parametri osc., massa).
- 2) Comprendere la struttura di corpi astrofisici.

Abbiamo compreso che la reazione β -inversa è il miglior metodo di rivelazione dell'antineutrino a bassa energia: minimizzando il cammino random del neutrone è possibile avere informazioni sulla direzione del neutrino incidente.

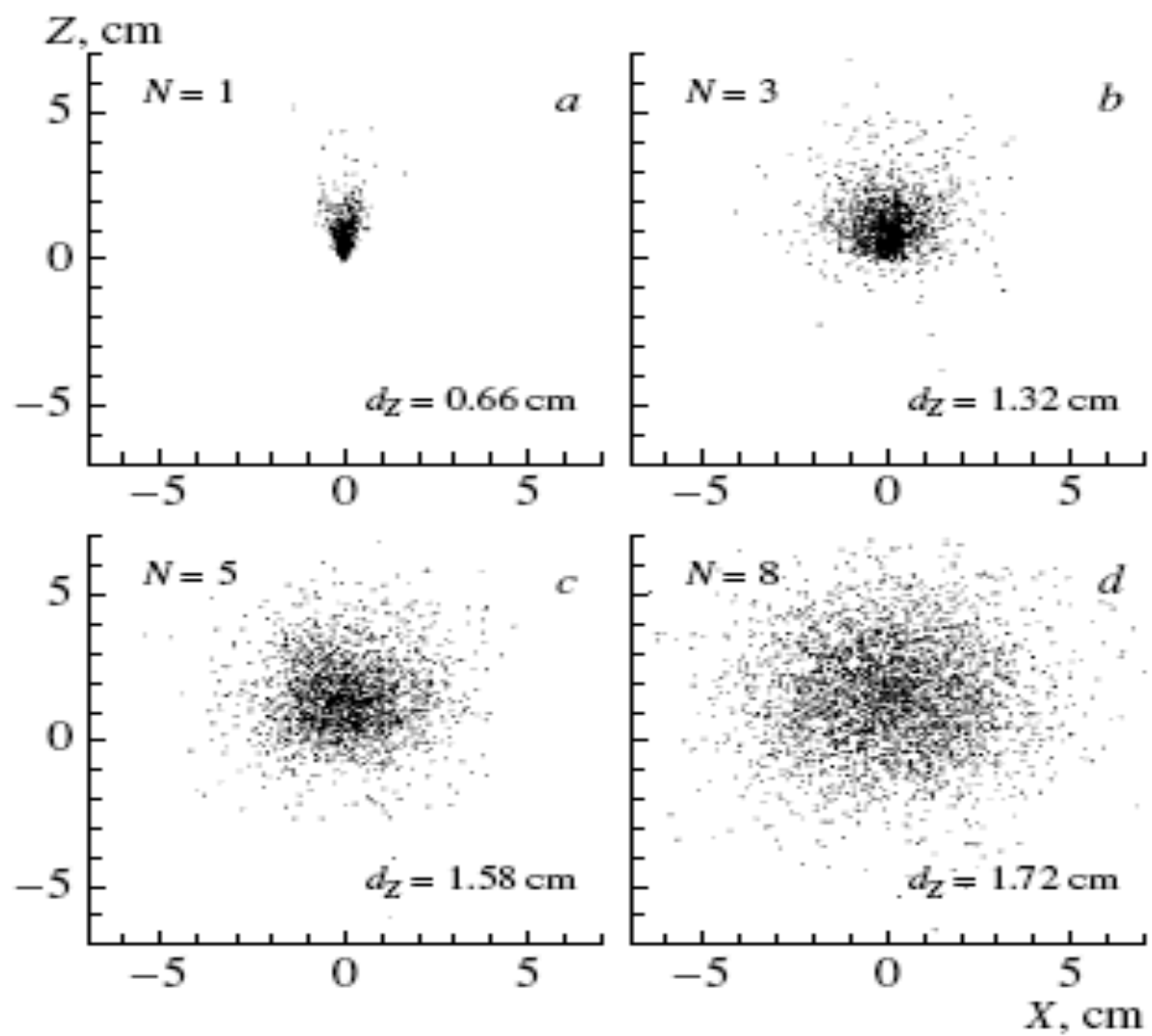
^{157}Gd , ^{10}B e ^6Li sono ottimi candidati per caratterizzare gli scintillatori del futuro.

Infine è stato studiato un LVD come LENA capace di fornire informazioni direzionali e di discriminare geo-neutrini provenienti dalla crosta da quelli generati nella crosta

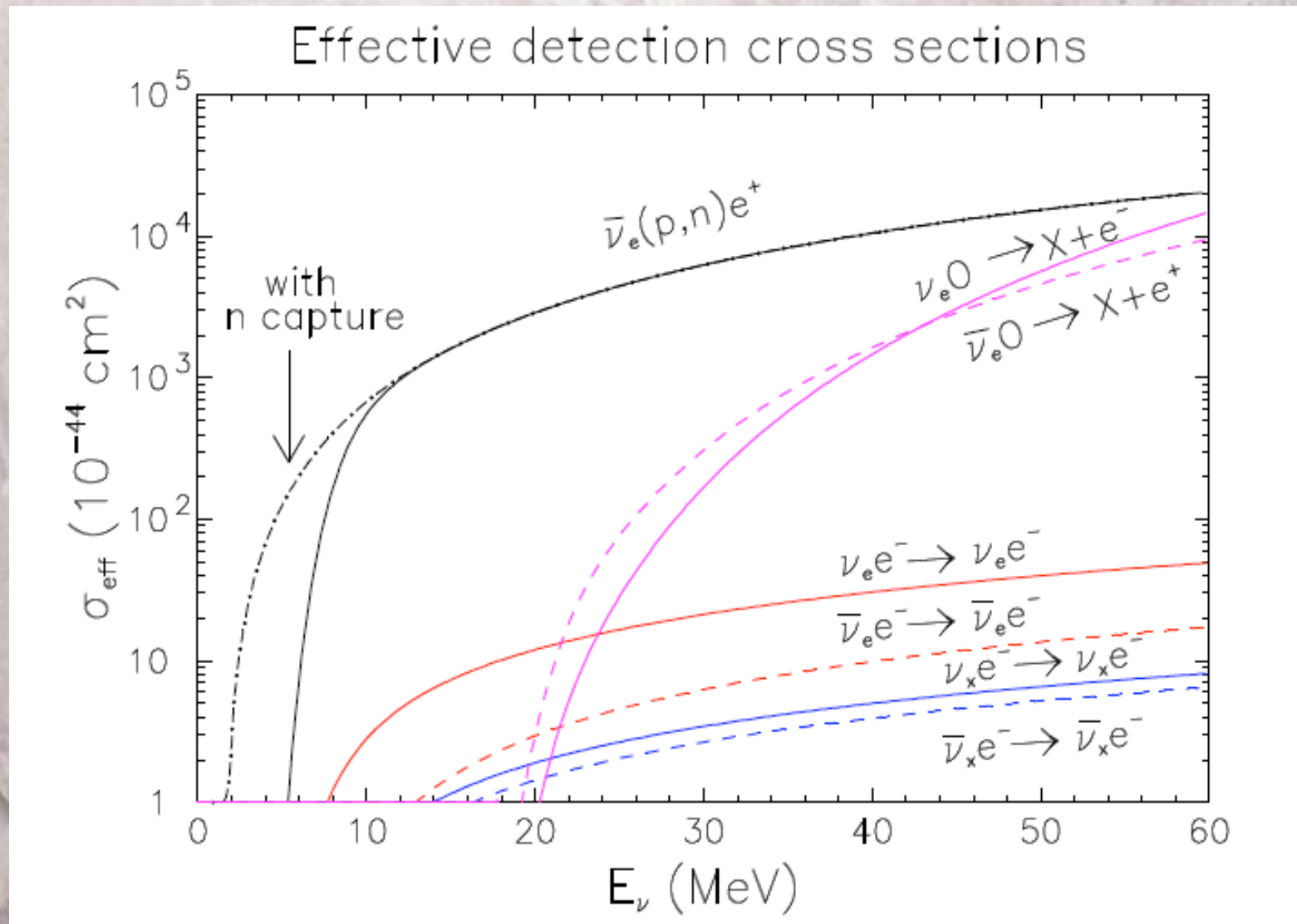




Memoria sulla direzionalità



Sezione d'urto antineutrino-protone



Oscillazione

- Fenomeno, conseguente alla natura massiva dei neutrini, che fu ipotizzato da B. Potecorvo (1950) [Confermato da KamLAND]

$$|v_k\rangle = \sum_{\alpha} U_{\alpha k} |v_{\alpha}\rangle$$

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{32} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

← Matrice di mescolamento

Autostati di **flavour** (interazione) sono legati ai processi con cui vengono creati e rilevati; gli autostati di **massa** legati al viaggio.

propagazione degli autostati di **massa** come soluzione di un **onda piana**, che nel caso unidimensionale diventa:

$$|v_k(L, T)\rangle = e^{\frac{i(E_k T - pL)}{\hbar}} |v_k(0, 0)\rangle$$

$$|v_{\alpha}(L, T)\rangle = \sum_{\beta} \left(\sum_k U_{\alpha k}^* e^{\frac{-i(E_k T - pL)}{\hbar}} U_{\beta k} \right) |v_{\beta}\rangle$$

In 2 dimensioni:

$$U_{e\mu} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix}$$

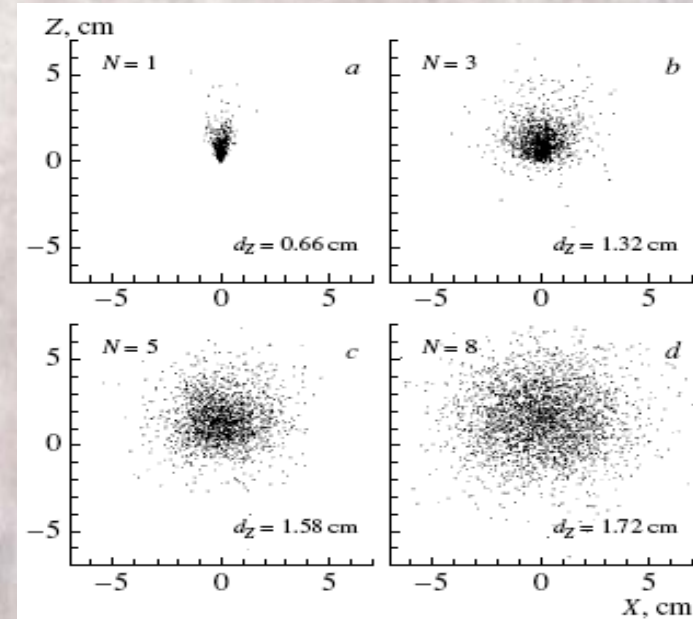
$$P_{e \rightarrow \mu}(L) = \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{c^3}{\hbar} \Delta m_{12}^2 \frac{L}{4E} \right)$$

$$\langle P_{ee} \rangle = 0.57$$

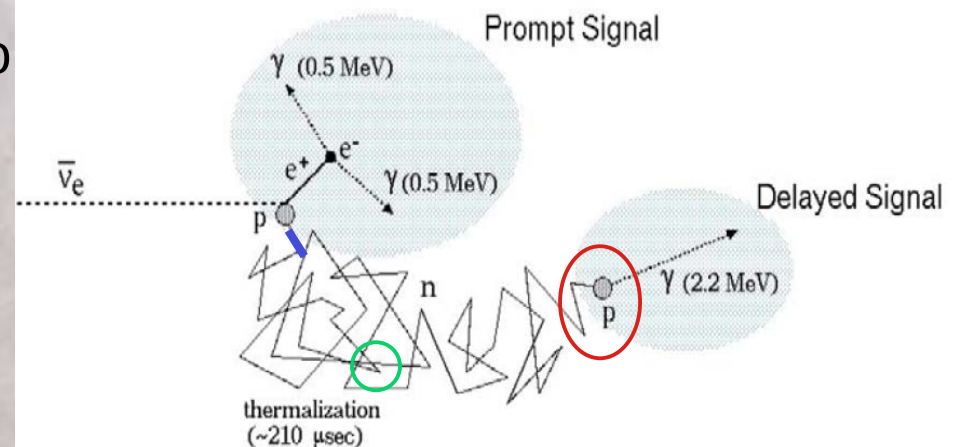


Termalizzazione e cattura neutronica

- I neutroni a bassa energia (1-15 KeV) provenienti dalla beta inversa sono concentrati nella direzione di incidenza dell' anti-neutrino; cosmedio $(n-n)=0.967$
- Il neutrone tramite successivi urti perde energia. Il processo di cattura neutronica è dominante, quando il neutrone termalizza.
- Nei primi otto urti la memoria sulla direzione dell'antineutrino incidente è parzialmente conservata.

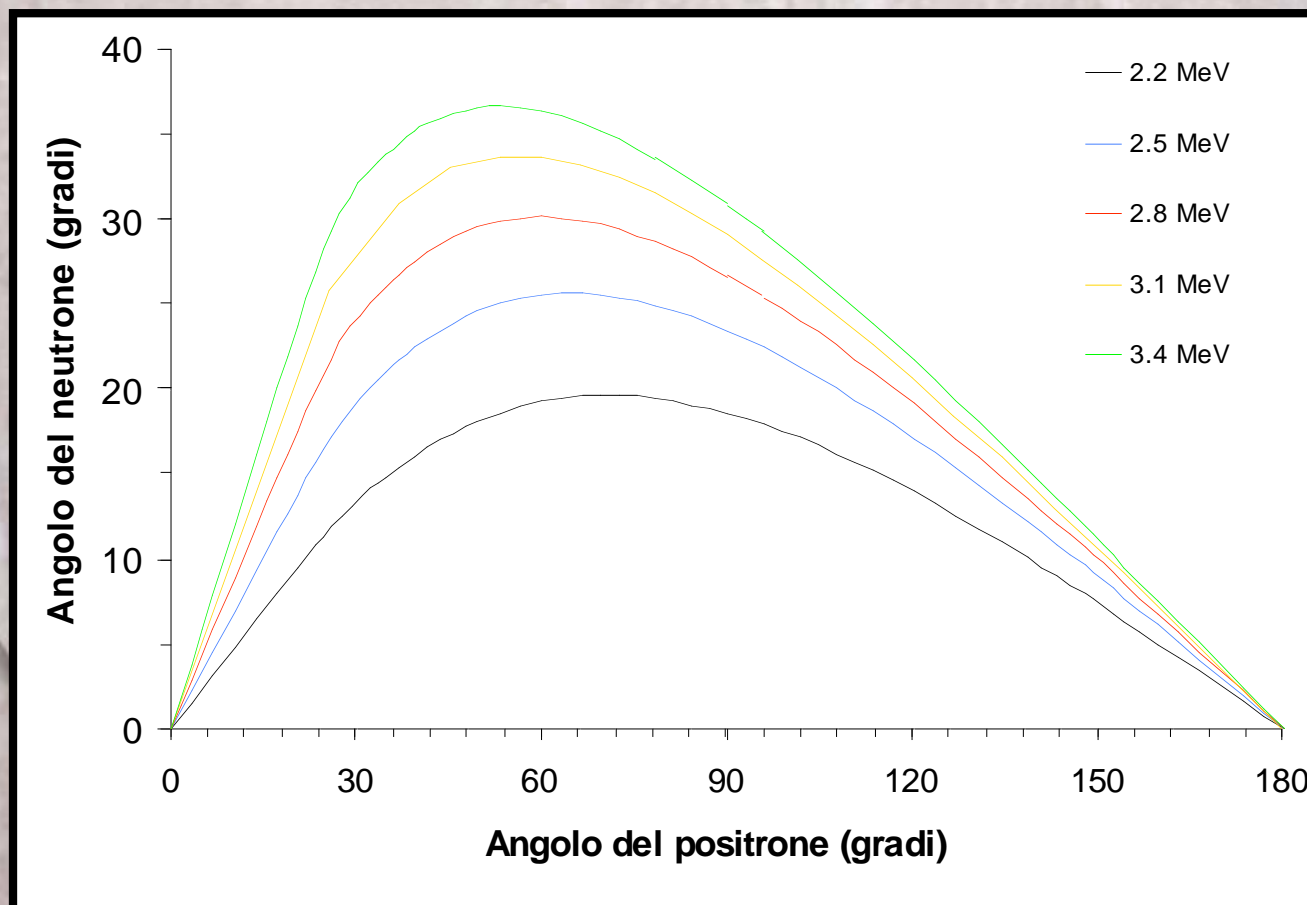


•Risulta utile ridurre il tempo medio di cattura e quindi il numero di urti necessari a termalizzare, attraverso l'opportuno drogaggio del liquido scintillatore con elementi dall'alta sezione d'urto neutronica.



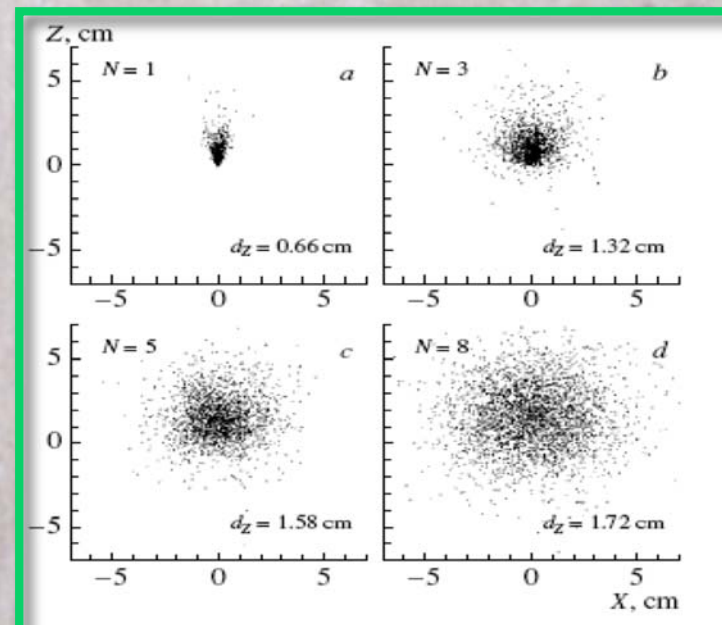
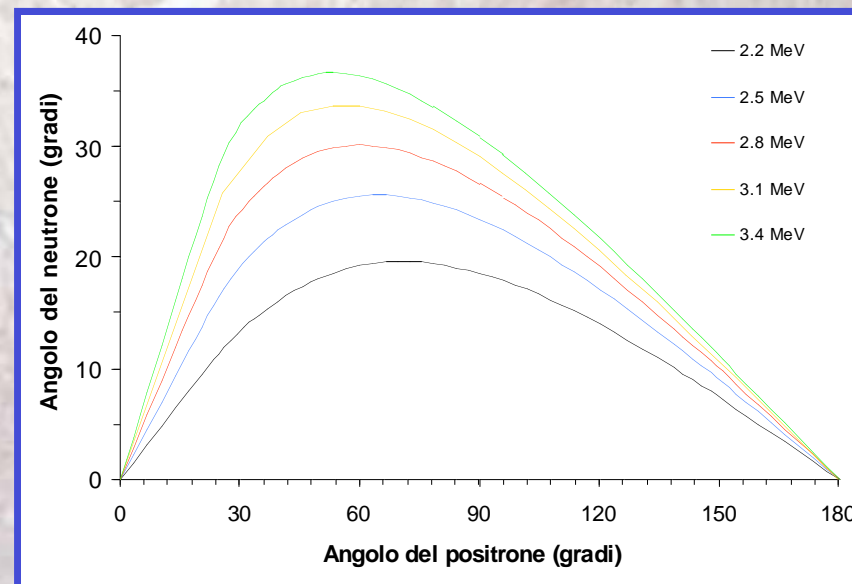
Cinematica (β -inversa)

Fissata l'energia dell'antineutrino incidente per ogni angolo con cui viene emesso il positrone rispetto alla direzione dell'antineutrino, esiste un corrispondente angolo di emissione del neutrone.



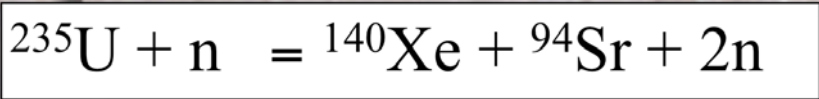
Termalizzazione e direzionalità

- L'impulso maggiore è portato dal positrone.
- Fissata l'energia dell' anti-neutrino incidente il positrone può essere emesso in qualunque direzione, al contrario del neutrone.
- Il processo di cattura neutronica è dominante, quando il neutrone termalizza.
- Effettuando una simulazione M.C. sul percorso del neutrone nel l.s. si osserva che entro un numero $N=8$ di urti l'informazione direzionale sull'antineutrino è conservata.

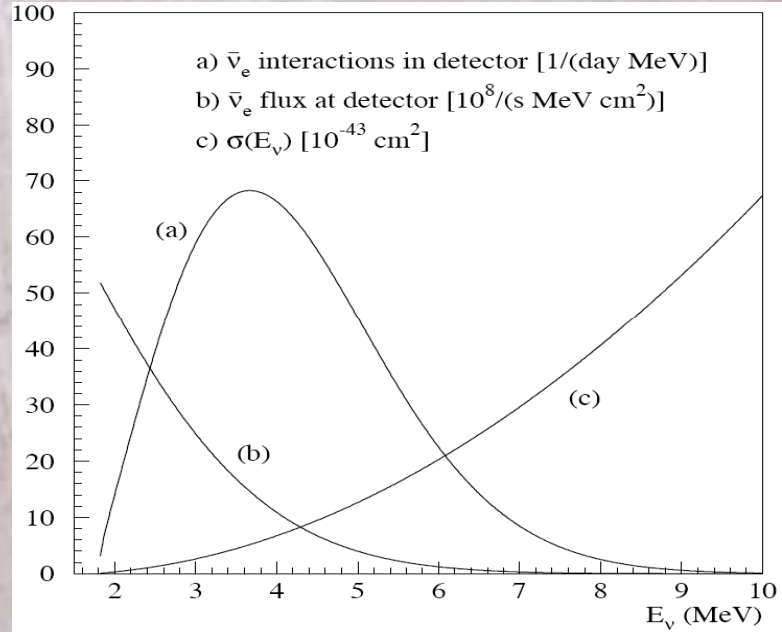
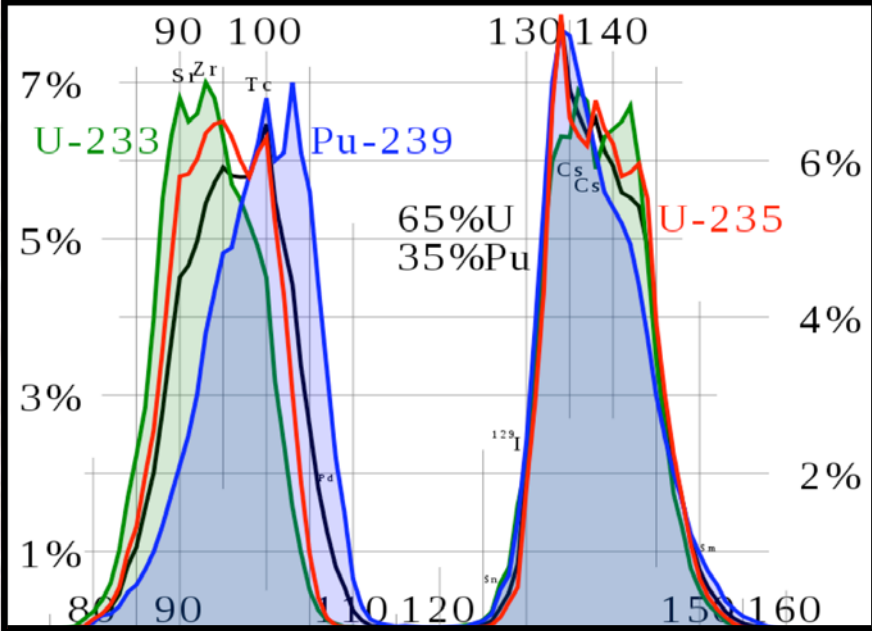
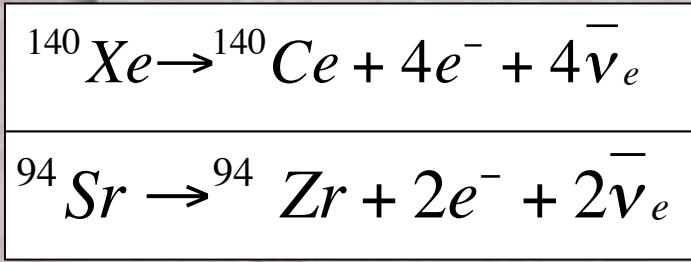


Reattori

- Processo alla base della creazione di anti- ν è la fissione
- Vengono generati in media 2.5 neutroni per ogni fissione, che possono a loro volta fissionare il materiale (controllata/catena).
- Per ^{235}U (0,7%) vengono generati in media 200 MeV e 6 antineutrini per fissione:



Attraverso 6 decadimenti beta:



Reference Model

- Per calcolare il flusso di geo-neutrini in un dato punto della terra si fa riferimento al reference model, che riporta le migliori informazioni sulla distribuzione di U e Th nella superficie terrestre, suddividendo la terra in 6 layer (O/C crust, S/H sediment, Ice, Water)
- Suddividiamo poi la superficie terrestre in matrici di $2^\circ \times 2^\circ$ che apportano un contributo indipendente, dei quali conosciamo in media la profondità, la densità e l'abbondanza $a(X)$ dell'elemento radioattivo X.
- L'UM si utilizzano le abbondanze del materiale emerso in superficie dalle profondità.
- Per LM, non avendo informazioni dirette, si fa riferimento ai vincoli di massa del B.S.E.