



**Università degli Studi di Ferrara**

**Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali**

Dipartimento di Fisica

Corso di Laurea in Fisica

**L'esplorazione del pianeta Terra  
attraverso i geo-neutrini**

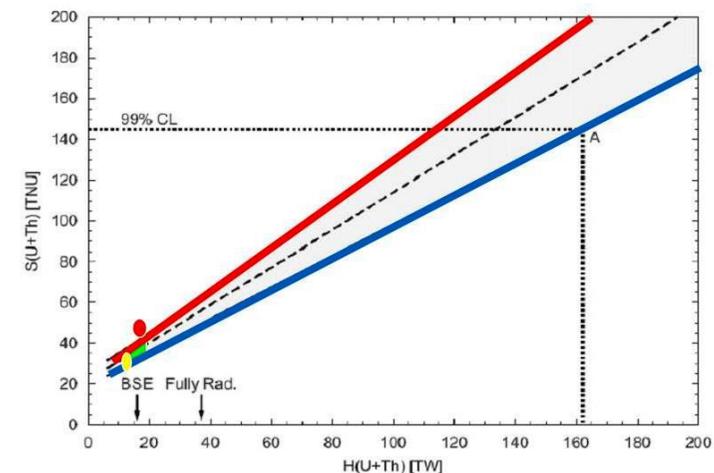
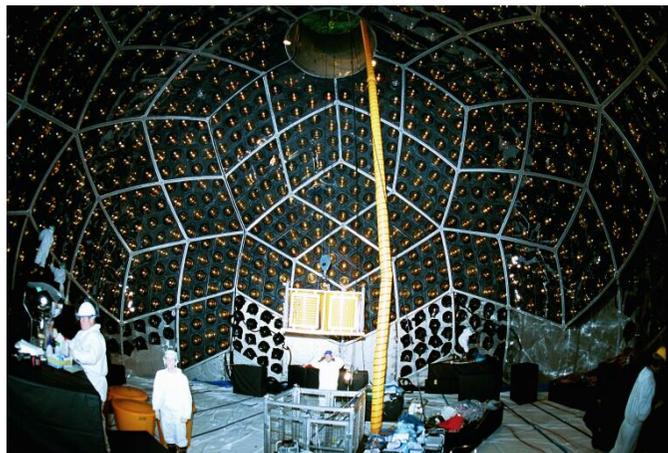
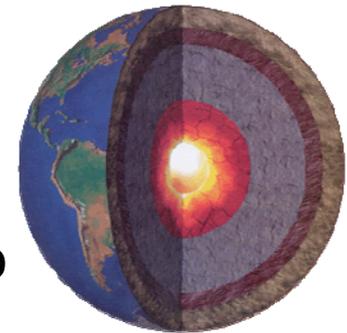
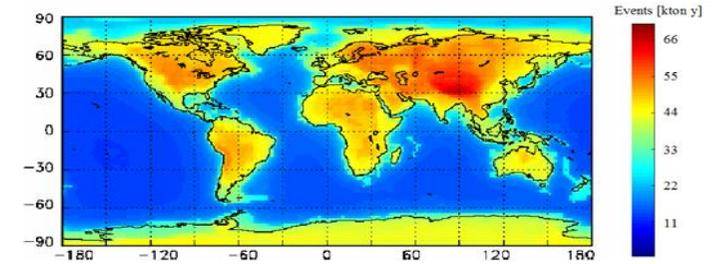
Relatore  
**Dr. Mantovani Fabio**

Laureando  
**Golfarini Cristian**

Anno Accademico 2009– 2010

# Summary

- Che sono i geo-neutrini?
- Che conosciamo del pianeta Terra?
- Il Preliminary Earth Model e la composizione della Terra
- Domande ancora aperte sul pianeta Terra
- I geo-neutrini: una sonda per l'esplorazione terrestre
- Il reference model e le previsioni di flusso di geo-neutrino
- I rivelatori attualmente operativi
- I primi risultati pubblicati dalla collaborazione dell'esperimento KamLAND
- Conclusioni e prospettive



# I geo-neutrini\*

I geo-neutrini sono gli antineutrini prodotti dalla radioattività naturale della Terra, in particolare da U, Th e  $^{40}\text{K}$ . Essi decadono rilasciando antineutrini e calore, con un rapporto ben fissato.

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

I geo-neutrini possono essere rivelati mediante la reazione  $\beta$ -inversa su protone libero:



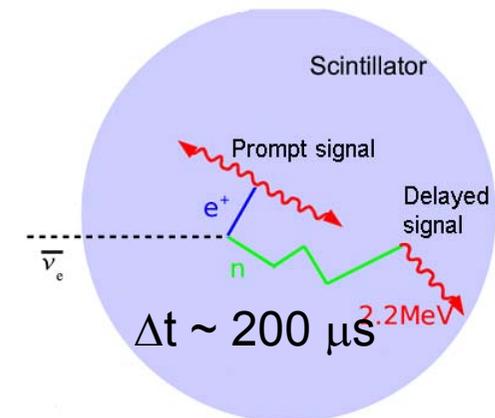
L'antineutrino si rivela attraverso una coppia di segnali:

- prompt: annichilazione  $e^+ + e^-$
- delayed: cattura neutronica dopo processo di termalizzazione

Il contributo radiogenico alla potenza terrestre è dato da:

$$H_{\text{Rad}} [\text{TW}] = 9.85 \times m(\text{U}) + 2.67 \times m(\text{Th}) + 3.33 \times 10^{-4} \times m(\text{K})$$

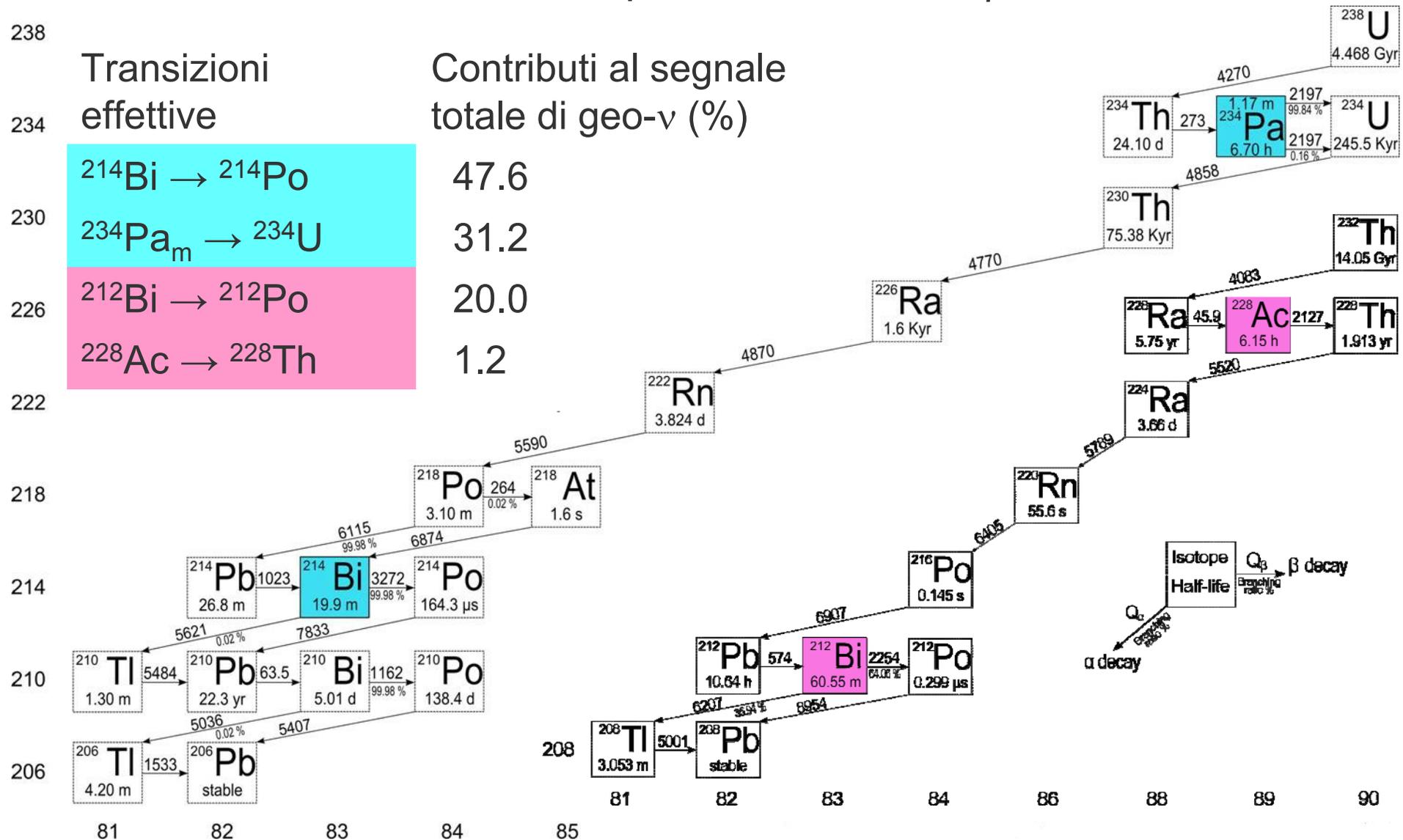
dove  $m(\text{X})$  è in un unità di  $10^{17}$  kg.



\* Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F.: Geo-neutrinos and Earth's interior, 2007

# I geo-neutrini “effettivi”\*

I geo-neutrini “effettivi” ( $E > 1.8$  MeV) sono prodotti solo nelle catene di decadimento di  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , in pochi decadimenti  $\beta$ .



\* Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F.: Geo-neutrinos and Earth's interior, 2007

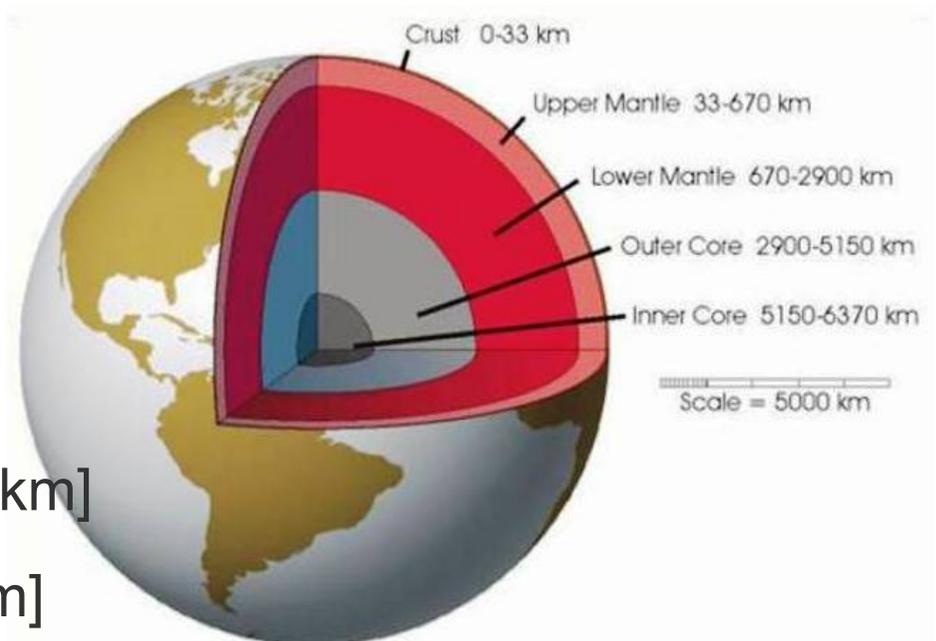
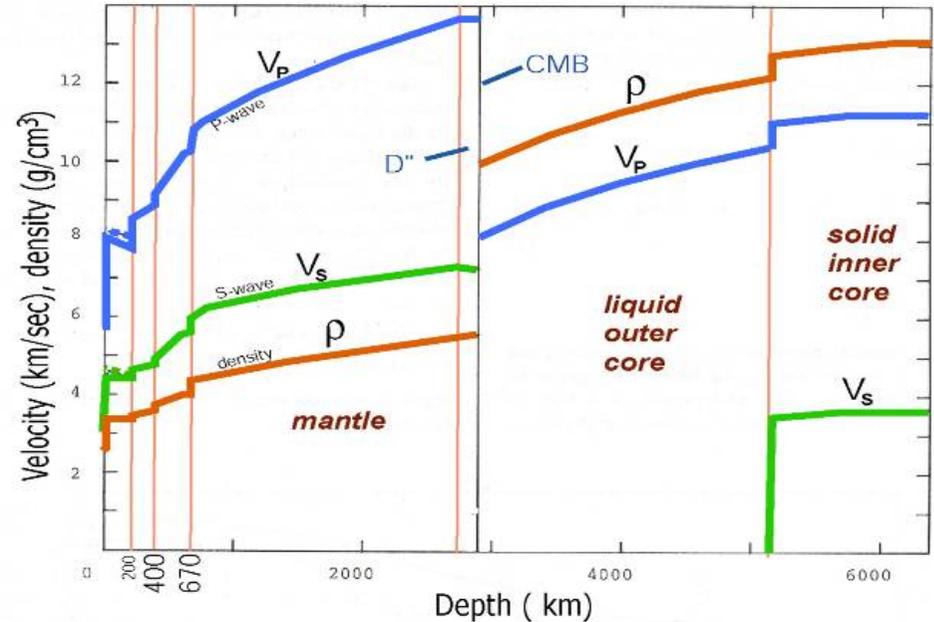
# Preliminary Reference Earth Model\*

Il PREM è il modello terrestre di riferimento che descrive il profilo di **densità** e delle velocità delle onde sismiche nella Terra ottenuto da:

- analisi delle onde sismiche generate dai terremoti da parte di network di stazioni sismiche
- misure in laboratorio delle velocità  $V_p$  e  $V_s$

Dal PREM si ottiene una struttura “a gusci” della Terra

- **Crosta** (solida) [ $\Delta_c=33$  km]
- **Mantello**(solido) [ $\Delta_M=2867$  km]
- Nucleo esterno (liquido) [ $\Delta_{NE}=2250$  km]
- Nucleo interno (solido) [ $\Delta_{NI}=1220$  km]



\* Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F.: Geo-neutrinos and Earth's interior, 2007

# Il Bulk Silicate Earth

Il BSE è un paradigma geochemico che descrive la composizione del mantello “primitivo”, dopo la formazione del nucleo terrestre e prima della differenziazione crosta-mantello, basato su argomentazioni **cosmochimiche** e su osservazioni **geochimiche**:

- i **meteoriti** di riferimento sono le Condriti Carbonacee:

$$\text{Th/U} = 3.9$$

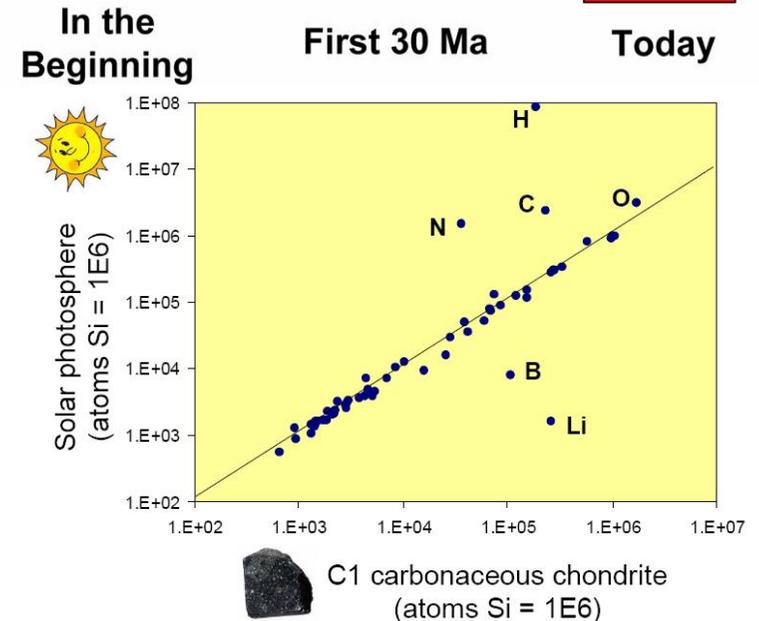
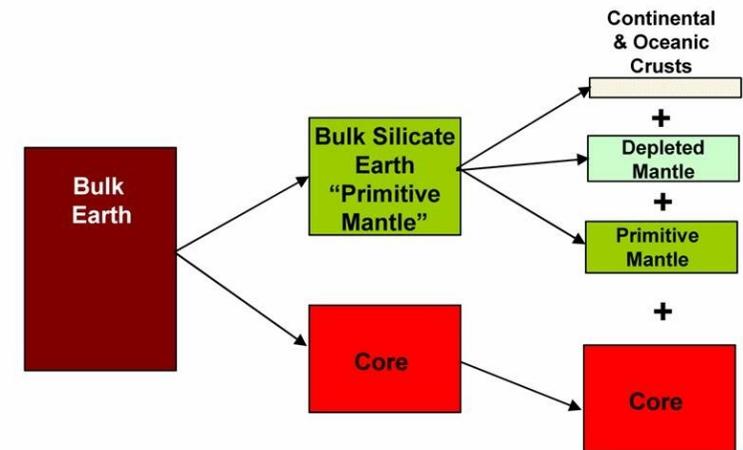
$$\text{K/U} = 1.1 \times 10^4$$



- confronto tra le composizioni dei meteoriti e le composizioni della fotosfera solare

- misure di U e Th in **campioni di crosta** superiore, inferiore e di **mantello** superiore.

$$m(\text{U}) = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{17} \text{ kg}$$



# L'energetica della Terra\*

La potenza complessiva emessa dalla Terra secondo i modelli più accreditati è:

$$H_{Terra} = 44 \pm 1 \text{ TW}$$

Se ci si basa solo sulle misure (prevalentemente continentali) si ottiene:

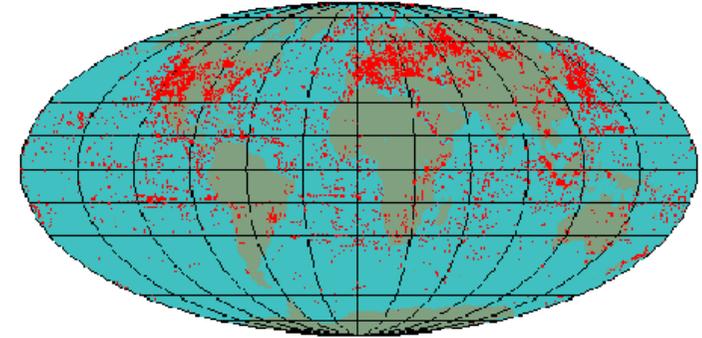
$$H_{Terra} = 30 \text{ TW}$$

Dal modello BSE:

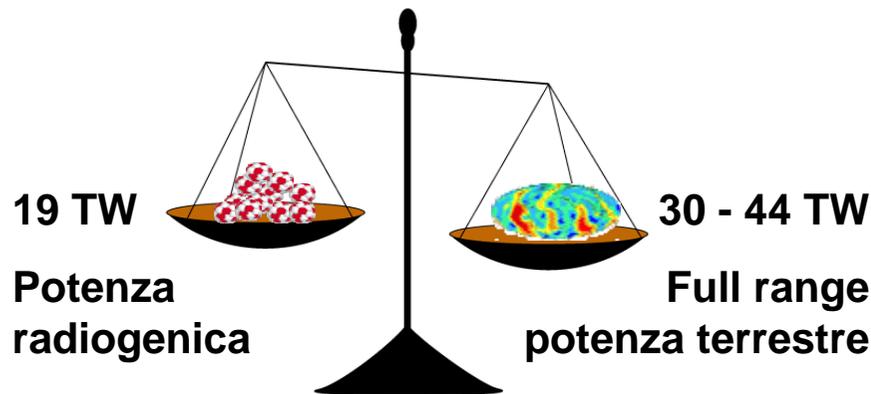
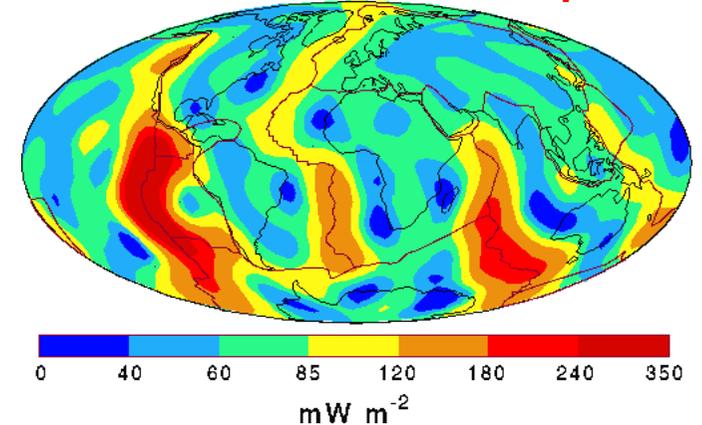
$$H_{Rad} \approx 19 \text{ TW}$$

- $\approx 9 \text{ TW}$  dalla radioattività naturale della crosta (continentale)
- $\approx 10 \text{ TW}$  dalla radioattività del mantello
- (  $0 \text{ TW}$  dal nucleo)

Heat flow sites



Global Heat Flow Map



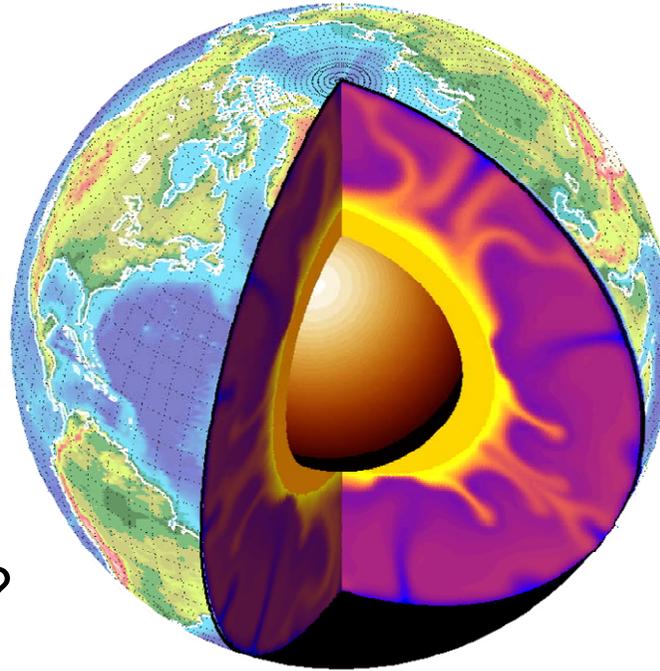
Altri contributi potenziali	TW
Calore dal nucleo	$\sim 9$
Contrazione termica	$\sim 2$
Energia gravitazionale	$\sim 2$
Attriti di marea	1-2
Raffreddamento secolare	9-14

\* Anderson, D.L., 2005. Energetics of the Earth and the missing heat source mystery. Technical Report.

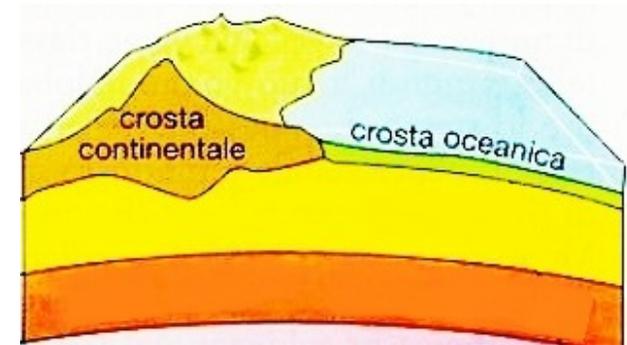
# Domande ancora aperte sul pianeta Terra\*

- Qual è il contributo radiogenico alla potenza terrestre?

- Il modello BSE è consistente con il flusso di geo-neutrini?

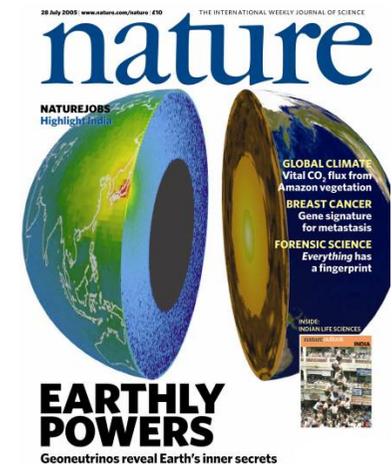


- Quanto U e Th c'è nella **crosta** e quanto nel **mantello**?



I geo-neutrini sono una **buona sonda per l'esplorazione** del pianeta Terra perché:

- interagiscono difficilmente con la materia
- viaggiano alla velocità della luce
- portano alla superficie della Terra informazioni sulla composizione chimica globale del pianeta

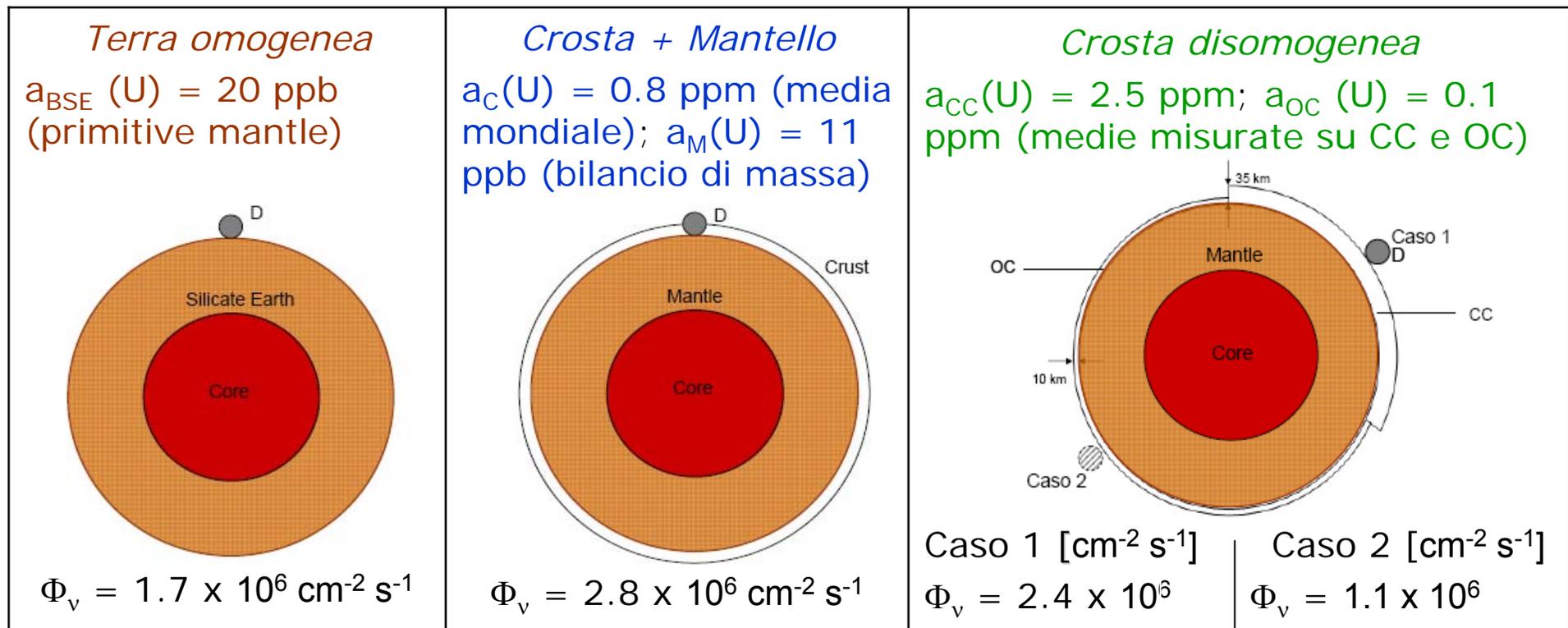


\* Araki et al., Nature, 2007

# Alcune stime analitiche del flusso di geo-neutrini

Partendo da un modello del pianeta Terra:

- a simmetria sferica e con struttura fisica basata sul PREM
- con contenuti geochimici basati sul modello globale (BSE)



- $\Phi$  dipende dalla distribuzione di massa di U e Th nella Terra
- Nel caso di crosta disomogenea il flusso dipende dalla posizione del sito
- Una caratterizzazione geochimica locale è fondamentale per la comprensione del segnale globale

# ***Il Reference Model\****

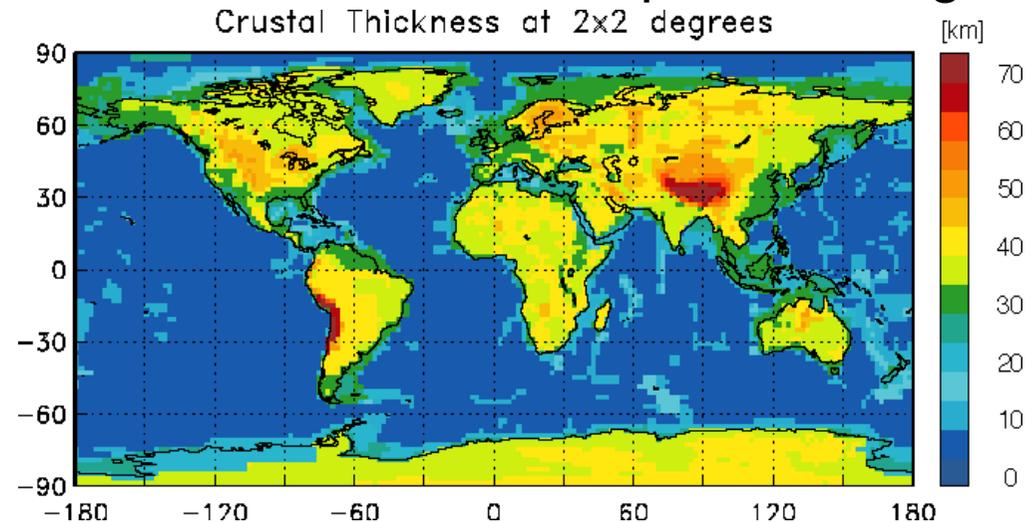
La **crosta** è suddivisa in 16200 tasselli di dimensioni 2° x 2°:

- per ognuno dei 16200 tasselli sono note la densità e lo spessore degli strati in cui è divisa:

- sedimenti,
- UC, MC e LC

- a(U) e a(Th) per ogni strato sono i valori medi riportati nel Geochemical Earth Reference Model (GERM) database

- l'incertezza è ottenuta dagli intervalli dei valori riportati nel GERM database



$$m_C(U) = (0.3 - 0.4) \times 10^{17} \text{ kg}$$

**Mantello** è suddiviso in due parti: UM e LM

- a(U) e a(Th) nell'UM ottenute da misure di campioni provenienti da grande profondità (~ 300 km)
- a(U) e a(Th) del LM sono ottenute dal bilancio di massa:

$$m_{LM}(X) = m_{BSE}(X) - m_{CC}(X) - m_{OC}(X) - m_{UM}(X)$$

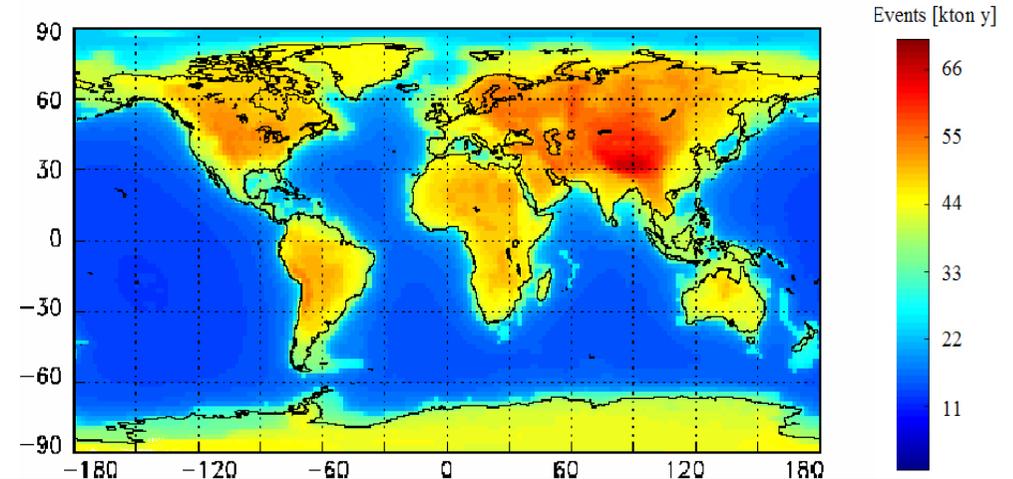
Assenza di U e Th nel **nucleo**

\* Mantovani, F., Carmignani, L., Fiorentini, G., Lissia, M., 2004. Phys. Rev. D 69, 013001

# Il segnale atteso secondo il Reference Model

Il segnale  $S$  atteso si misura in Terrestrial Neutrino Unit [TNU] = 1 evento per  $10^{32}$  protoni liberi in 1 anno:

- $S = S_C + S_M$
- $R = S$  da reattore nucleare
- $\Delta S_0 = \text{errore}$



Località*	$S_C$ (TNU)	$S_M$ (TNU)	$S$ (TNU)	$\Delta S_0$ (TNU)	$R$ (TNU)
Pyhasalmi	42.5	9.0	51.5	8.9	27.2
Homestake	42.3	9.0	51.3	7.8	9.4
Baksan	41.8	9.0	50.8	7.9	11.8
Sudbury	41.8	9.0	50.8	10	53.7
Gran Sasso	31.7	9.0	40.7	8.7	35.1
Kamioka	25.5	9.0	34.5	16	230
Curacao	23.5	9.0	32.5	6.0	3.3
Hawaii	3.5	9.0	12.5	3.7	1.4

- **Molti siti** sono ottimi candidati per misurare l'U ed il Th nella crosta
- Le **Hawaii** sono il sito privilegiato per misurare l'U ed il Th nel mantello
- Per **Kamioka**  $R \gg S$

\* Le località studiate si riferiscono a siti in cui sono operativi o candidati geo-neutrinos detectors.

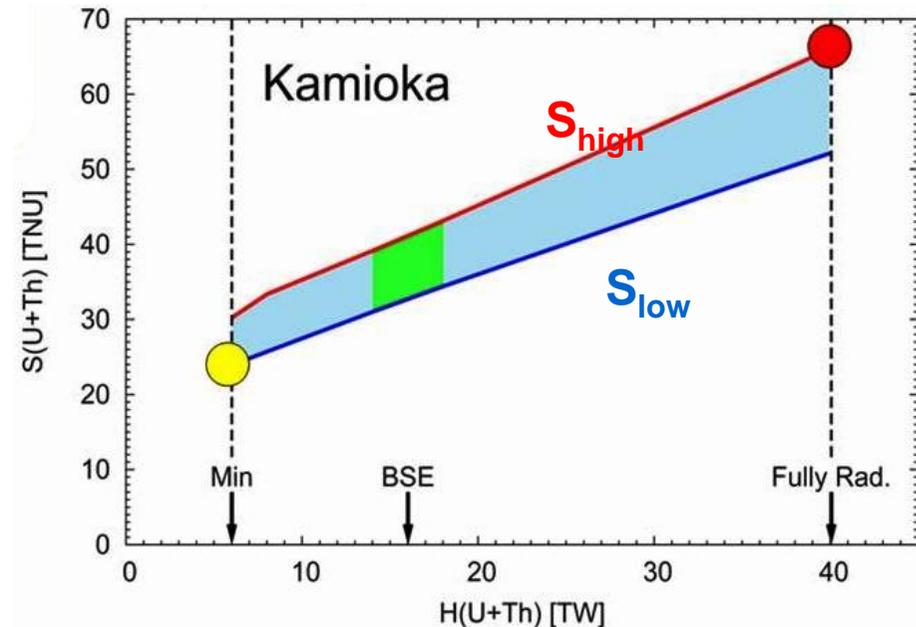
# Potenza radiogenica terrestre\*

■ Regione permessa dal modello BSE:  $S(U+Th) = (31 - 43)$  TNU

● La minima quantità di U e Th misurata nella crosta implica:  $S_{\min}(U+Th) = 24$  TNU

■ Regione contenente tutti i modelli consistenti con i dati geochimici e geofisici:  $S_{\text{high}}$  e  $S_{\text{low}}$  dipendono dalle distribuzioni geometriche di  $m_M(U)$  ed  $m_M(Th)$

● Il massimo segnale concesso dall'energetica della Terra è:  $S_{\max}(U+Th) = 62$  TNU



Il grafico permette di comprendere le implicazioni geologiche del segnale di geo- $\nu$ :

- la pendenza dipende dalla distribuzione di massa nel mantello
- l'intercetta dipende dal contenuto di radioattività nella crosta intorno al detector
- la distanza tra le rette dipende dall'incertezza della massa di U e Th nella crosta

\* Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F.: Geo-neutrinos and Earth's interior, 2007

# I due rivelatori di geo-neutrini attualmente operativi

## K a m L A N D (Giappone)

## B o r e x i n o (Italia)



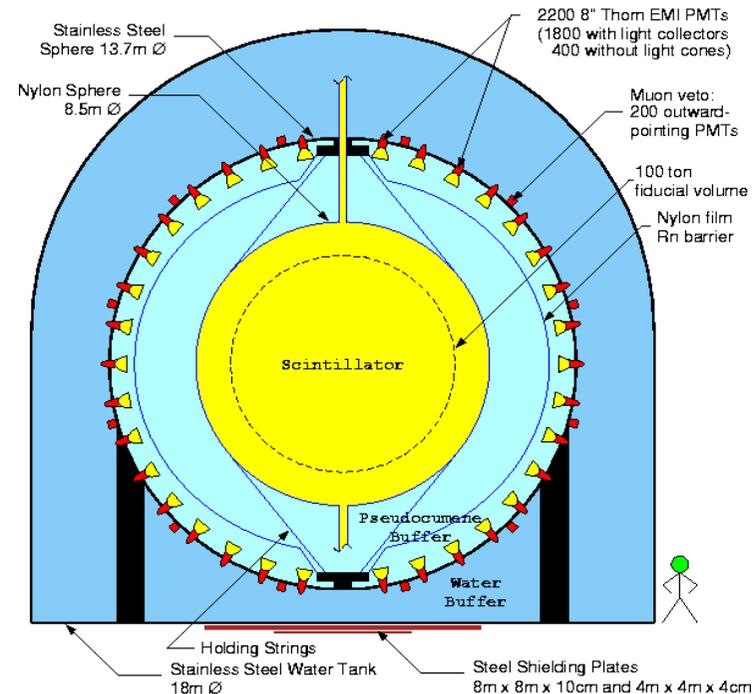
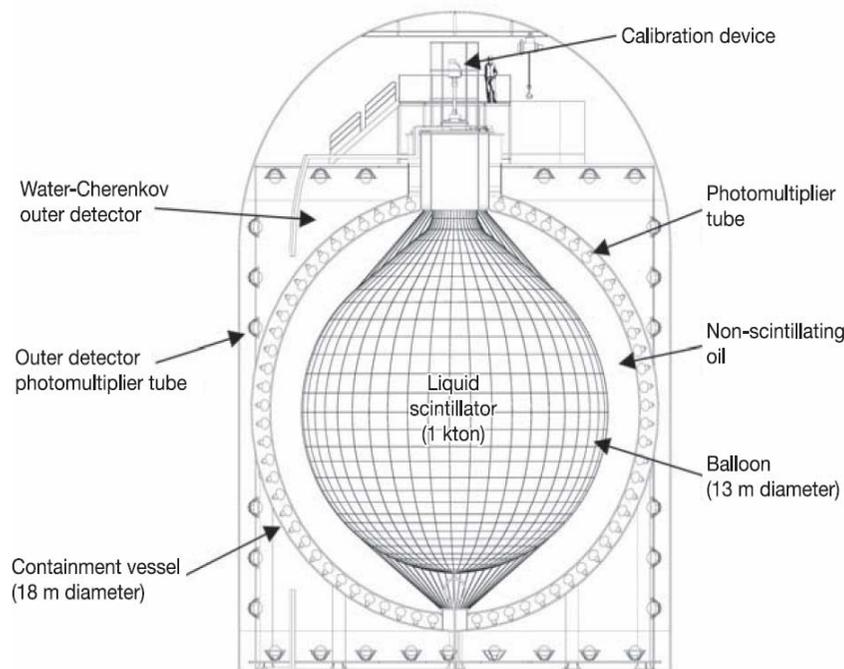
**1 kton liquido scintillante**

2002-2010



**300 ton LS**

2007-2010



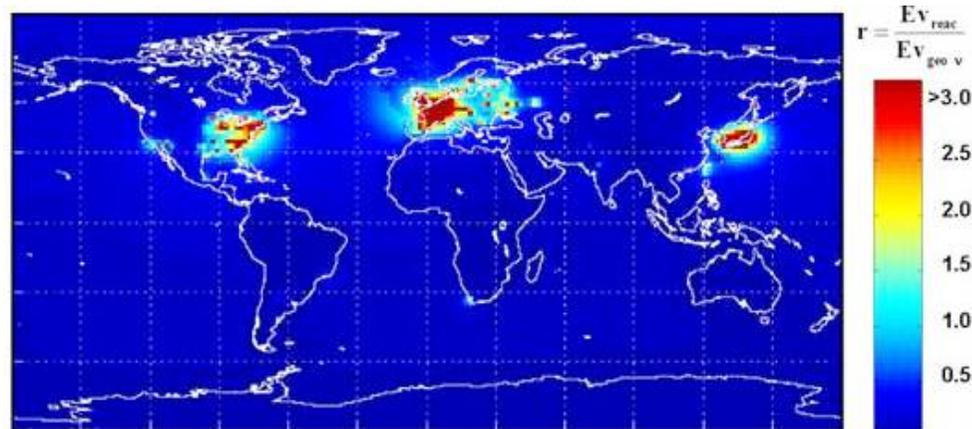
# Principali segnali di background nei detectors

Antineutrini nella finestra energetica dei geo-neutrini (1.8 – 3.6 MeV):

- Anti- $\nu$  da reattori nucleari

$$r = \frac{\text{Eventi}_{\text{reattori}}}{\text{Eventi}_{\text{geo-}\nu}}$$

Località	$r$
Kamioka	6.7
Sudbury	1.1
Gran Sasso	0.9
Pyhasalmi	0.5
Baksan	0.2
Homestake	0.2
Hawaii	0.1
Curacao	0.1



La mappa è stata ottenuta utilizzando il database IAEA (International Atomic Energy Agency) (2000) e considerando tutti i reattori operativi alla massima potenza

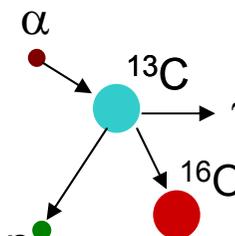
- Reazione  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  produce i cosiddetti fake-antineutrino

Una contaminazione di  $^{222}\text{Rn}$  produce  $^{210}\text{Po} \rightarrow \alpha + ^{206}\text{Pb}$  [ $E_\alpha = 5.3 \text{ MeV}$ ]



- S prompt =  $\gamma$  da [ $^{13}\text{C} + \alpha$ ]

- S delayed =  $\gamma$  da cattura neutrone (dopo termalizzazione)  $n$



- Altri background (coincidenze random, raggi cosmici,...)

# Risultati della misura di KamLAND (2005)\*

In 749 giorni di misura nella finestra energetica dei geo-neutrini sono stati accumulati  $152 \pm 12.5$  conteggi:

- eventi da reattore:

$$R = 80.4 \pm 7.2$$

- eventi da  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ :

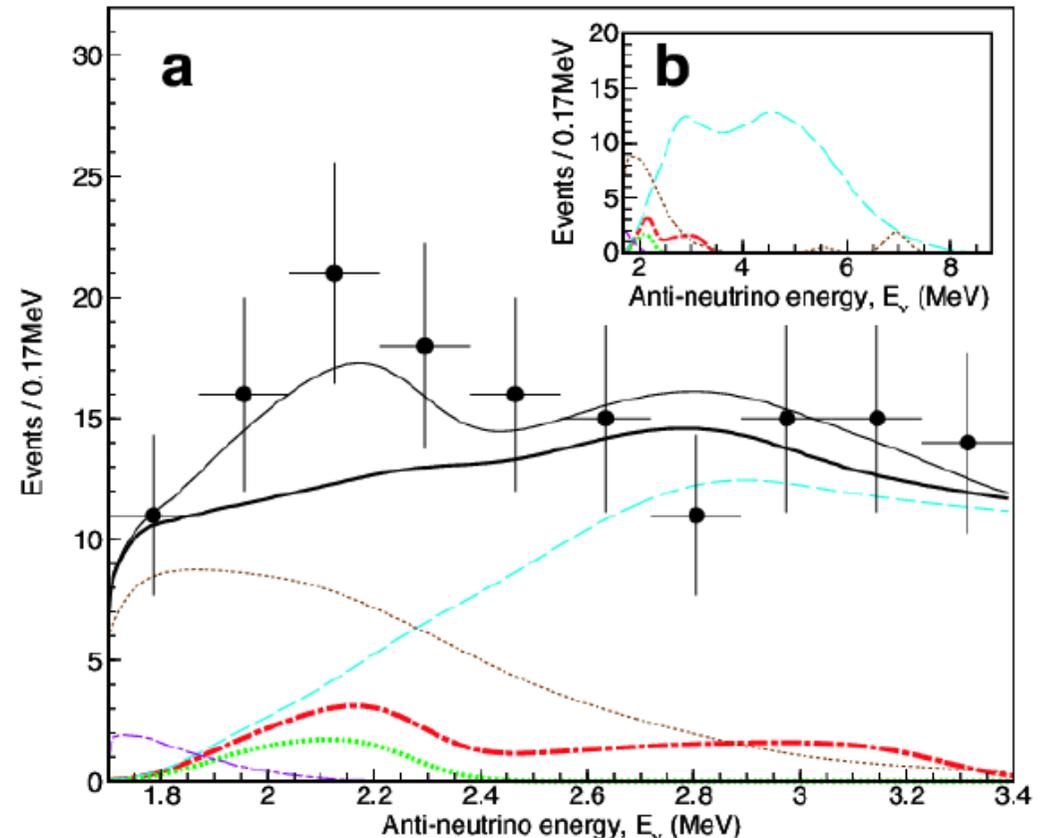
$$F = 42 \pm 11$$

- eventi da altri background:

$$B = 4.6 \pm 0.2$$

- eventi di geo-neutrino:

$$N(U + Th) = 25^{+19}_{-18}$$



Prima evidenza dell'esistenza dei geo-neutrini  $\sim 1.4 \sigma$

\* Araki et al., Nature, 2007

# Implicazioni delle misure di KamLAND\*

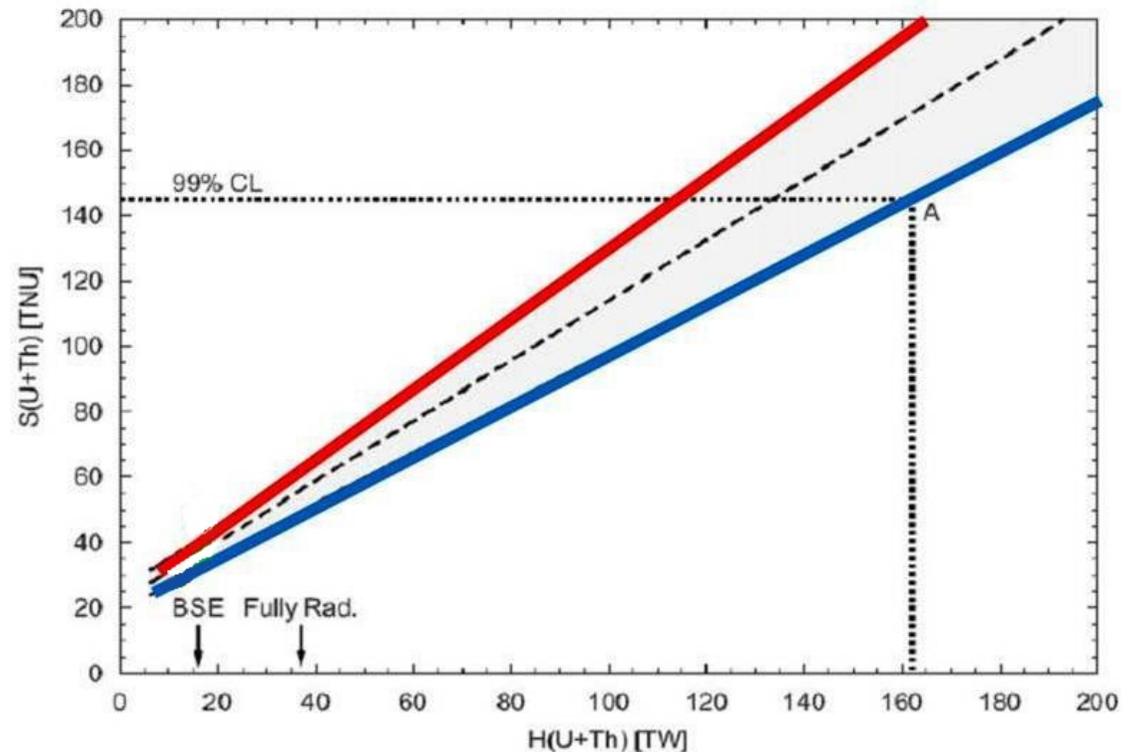
$$N(U + Th) = 25^{+19}_{-18}$$



$$S(U + Th) = 57^{+33}_{-31} \text{ TNU}$$



$$H(U + Th) = 38^{+35}_{-33} \text{ TW}$$



- La tecnologia per la rivelazione di geo- $\nu$  è disponibile
- Le prime misure pubblicate da KamLAND non sono in grado di confermare alcun modello del pianeta Terra
- Il limite superiore di potenza radiogenica è fissato a:  
 $H_{\text{Rad}}(U+Th) \sim 133 \text{ TW}$  (al 99% confidence level)

# Conclusioni e *prospettive*

- La **struttura geofisica** della Terra è **ben nota**, grazie principalmente alle indagini geofisiche basate sulle misure di onde sismiche [PREM]
- La **composizione chimica globale** del pianeta Terra è basata su argomentazioni cosmochimiche e su **poche misure** ristrette alla parte più superficiale del pianeta [BSE]
- Il **bilancio energetico** del pianeta Terra **non** è ancora stato completamente compreso.
- Studiando il segnale di **geo-neutrini** è possibile ricavare informazioni sul **contenuto di radioattività** della Terra e sulla **distribuzione** di U e Th nella crosta e nel mantello terrestre.
- **Modelli** di flusso di antineutrini sono **stati elaborati** basandosi sulle migliori informazioni geofisiche e geochimiche disponibili
- Le prime misure [KamLAND - 2005] confermano che la **tecnologia è ormai matura** per indagare la Terra attraverso i geo- $\nu$ .
- Le successive misure di **KamLAND e Borexino** forniranno importanti constraints al contributo radiogenico al calore terrestre e alla validazione del modello BSE