

# État des lieux et perspectives dans la détection des géoneutrinos

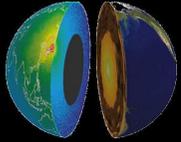


Thierry Lasserre (CEA/Saclay & APC)



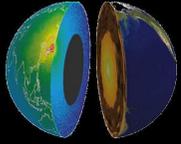
11/06/2007

Fondé sur une collaboration avec Cribier, Fiorentini, Carmignani, Lissia, Mantovani, Ricci, Schoenert



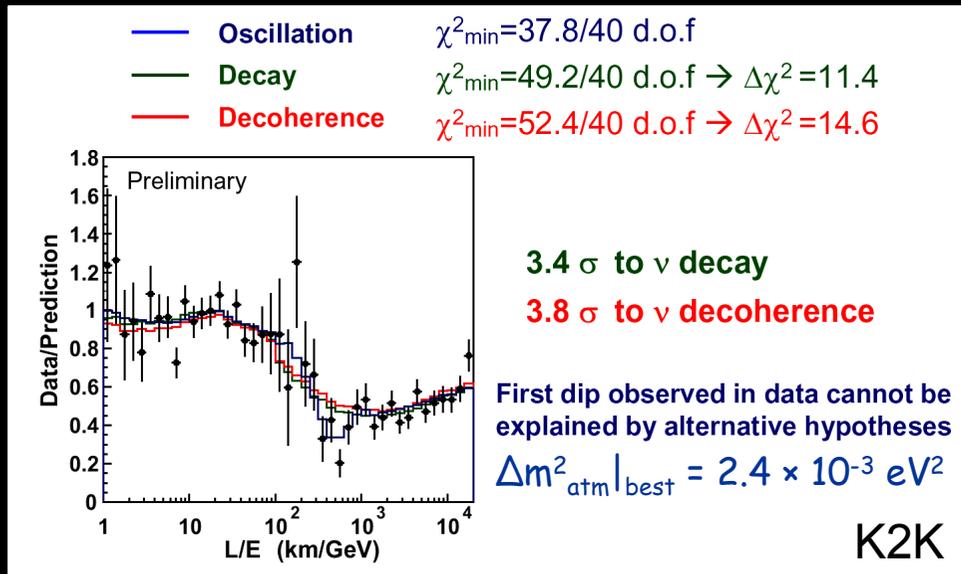
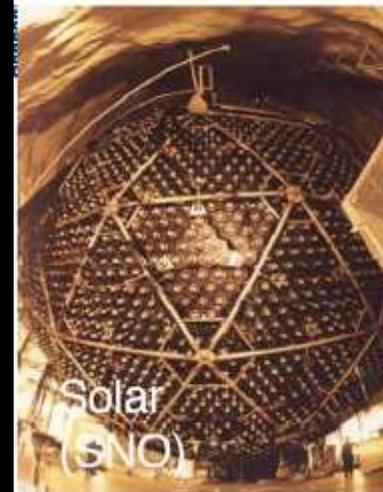
# Evolution dans la compréhension des $\nu$

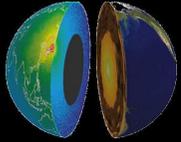
- La compréhension des neutrinos a énormément progressée ces dernières années;
- Oscillations: reste à mesurer complètement ( $\theta_{13}$ ) et précisément les paramètres de la matrice de mélange PMNS ( $\theta_{23}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\Delta m^2$ 's);
- Dorénavant nous pouvons progresser dans des domaines connexes (astrophysique, cosmologie, géophysique, non prolifération, etc.) en utilisant les neutrinos comme sonde inégalée de la matière.



# Résultats récents en physique des $\nu$

- Les neutrinos ont des *masses*
- *Conversion de saveur*  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$
- Fortes présomptions favorisant le mécanisme d'oscillation des neutrinos



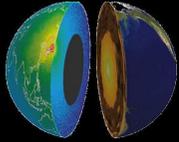


# Paramétrisation des oscillations

- Deux différences de masse:  $\Delta m^2_{21}$  (solaire) &  $\Delta m^2_{32}$  (atmosphérique)
- Matrice PMNS:
  - 3 angles de mélange:  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
  - 1 phase de violation CP:  $\delta$  (Dirac)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{atm}}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\theta_{13}, \delta} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{sol}}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- En plus, si neutrinos de Majorana  $\rightarrow$  2 phases (Majorana) de violation de CP



# Le secteur des neutrino

$$[\Delta m_{21}^2 - \theta_{12}]$$

$$[\Delta m_{32}^2 - \theta_{23}]$$

$$\text{signe}(\Delta m_{32}^2) - \theta_{13} - \delta$$

$\nu$  solaires  
+  
KamLAND  
+  
 $\nu$  réacteurs ?

$\nu$  Atmosphériques (SK)  
+  
K2K  
+  
MINOS – T2K

$\nu$  super-faisceaux (T2K)  
+  
 $\nu$  Réacteurs  
(Double Chooz &  
Daya Bay)

MSW-LMA

$$\Delta m_{12}^2 \sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$
$$\sin^2(2\theta_{12}) \sim 0.8$$

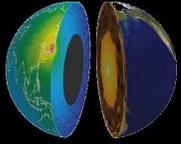
$$|\Delta m_{32}^2| \sim 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{32}) \sim 1.0$$

-  $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.20$  (CHOOZ)  $\rightarrow \theta_{13} ?$

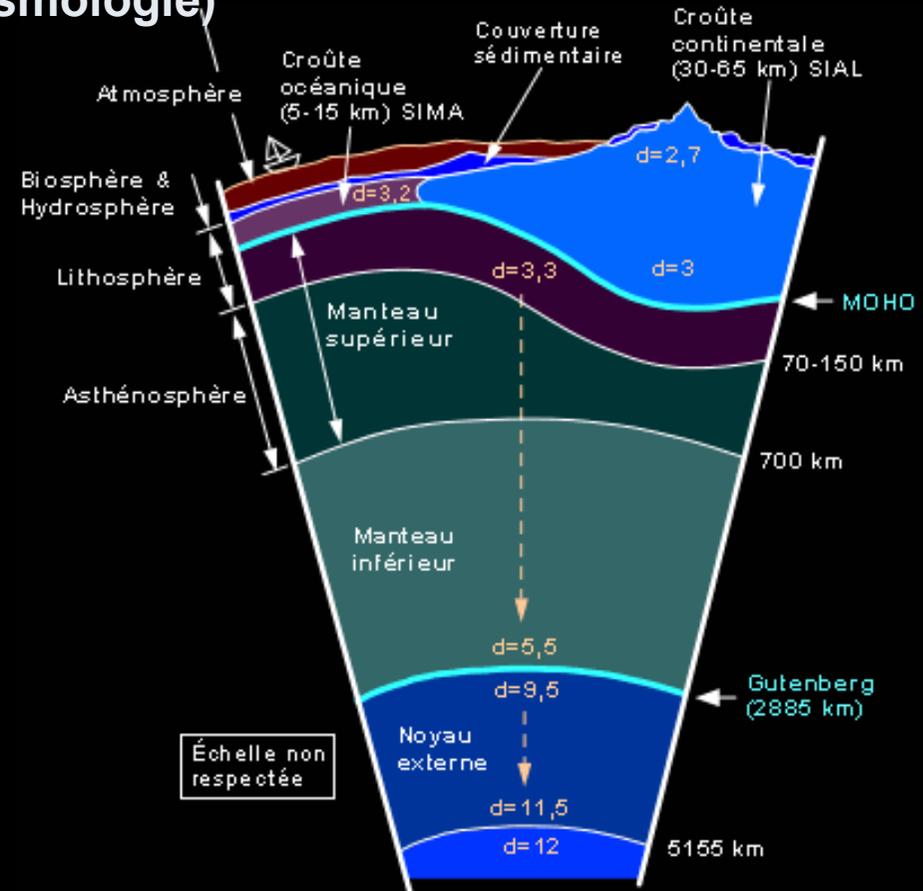
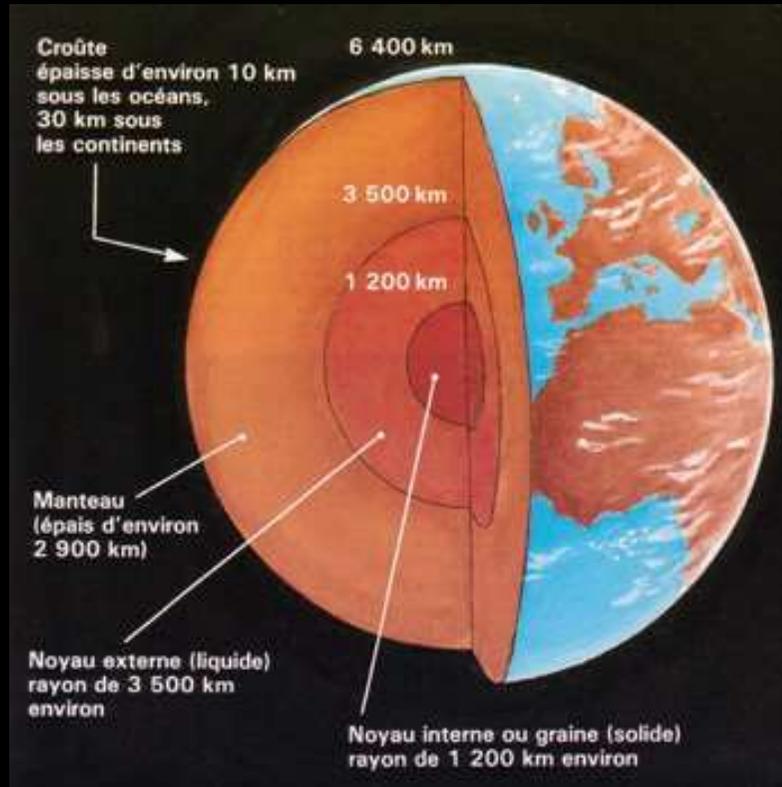
- Hiérarchie  $\rightarrow \text{sign}(\Delta m_{32}^2) ?$

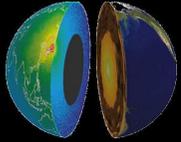
- Violation CP  $\rightarrow \delta ?$



# Structure de la Terre en très bref ...

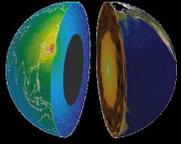
- **Croûte** : 0 – ~10 km (océanique) – ~50 km (continentale)
  - Analyse géochimique (forage jusqu'à 12 km)
- **Manteau** : 150 km – (sup) 650 km (inf) – 2890 km (sismologie)
- **Noyau** : 5150 km – 6370 km (sismologie)





# État des lieux

- Les profondeurs de la Terre sont **inaccessibles**. Composition géochimique estimée par les abondances des météorites et du Soleil.
- Données sismiques (vitesse du son) + bilan de masse → profil de densité et structure en couche de la Terre, mais pas d'information sur la répartition des éléments chimiques
- La **chaleur interne de la Terre** induit les mouvements tectoniques et le champ magnétique terrestre. Mais les mécanismes **ne sont pas quantitativement compris**.
- Le flux de chaleur à travers la surface terrestre est contraint entre **30-45 TW (erreur systématique ...)**.
- Différentes sources de chaleur peuvent contribuer à la chaleur interne terrestre. Quelle est la part de la radioactivité (**U/Th/K/...**) ?



# Flux de chaleur terrestre

▪ Flux de chaleur moyen mesuré à la surface de la Terre :  $\Phi_{\text{Terre}} \sim 80 \text{ mW/m}^2$

▪ A comparer avec le flux reçu du Soleil :  
 $\Phi_{\text{Soleil}} = 1.4 \text{ kW/m}^2$

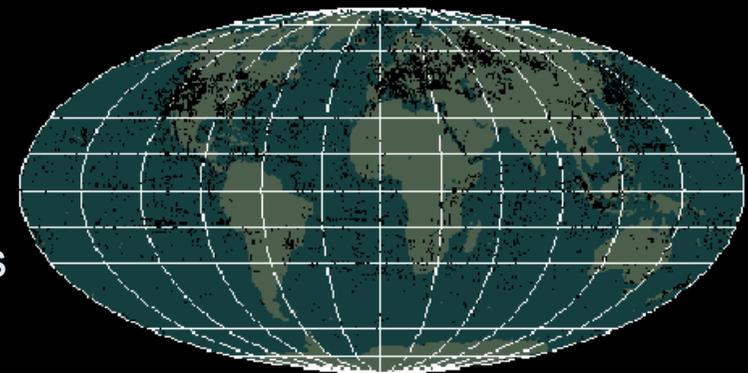
▪ Mesure de Température (T) à  $\neq$  profondeur (h  $\gg$  1km) et dérivation du flux de chaleur d'après dT/dr et la conductivité k:

$$\Phi = k \frac{dT}{dr}$$

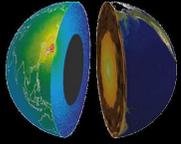
- Mesures essentiellement dans l'hémisphère nord
- Mesures dans les océans incertaines à cause des échanges de chaleur entre l'eau et les sédiments
- Non transposables à la Terre dans son ensemble  
→ «erreur» de Kelvin pour datation de la Terre



Heat Flow Sites



*Reviews of Geophysics* 31(3), 267-280, 1993



# Mesure du flux de chaleur terrestre

- Carte du flux de chaleur global

- Flux de Chaleur :  $\Phi_{\text{Terre}} \sim 4 \cdot 10^{13} \text{ W}$   
 $= 40 \text{ TW}$

- Equivalent à 10,000 réacteurs nucléaires ...

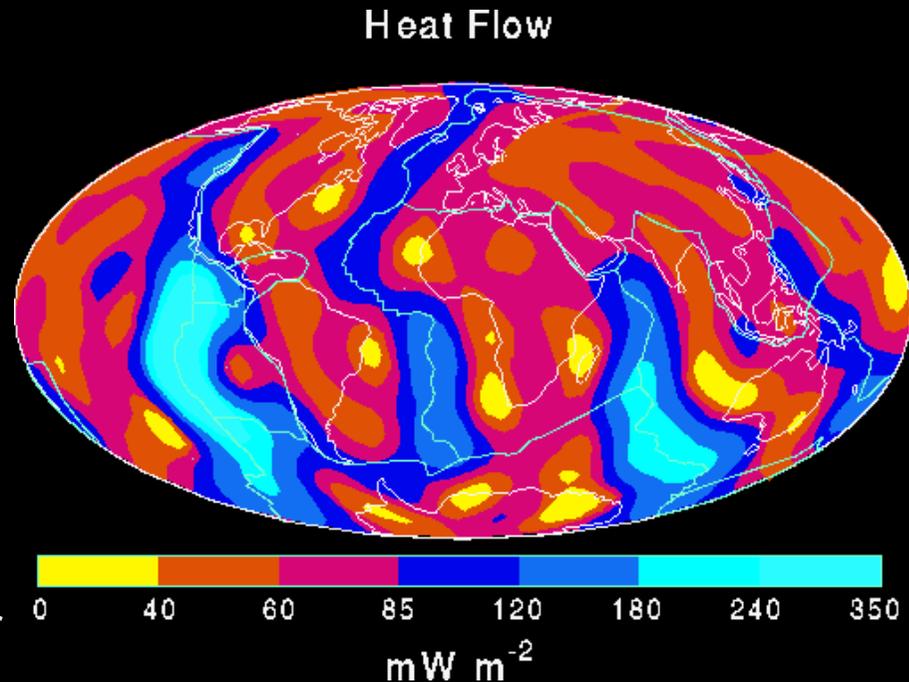
- Questions fondamentales :

- Quelles sont les sources de chaleur interne de la Terre?
- Où sont elles localisées?
- Quand fonctionnent-elles?

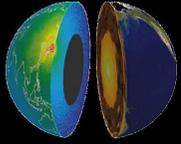
- Remarque: il existe deux valeurs de la chaleur interne ...

- $44 \pm 1 \text{ TW}$  (H.N. Pollack et al. 93)

- $31 \pm 1 \text{ TW}$  (Revision des données de Pollack 93 par Hofmeister & Criss 04)



24,771 mesures dans 20,201 terrains océaniques et continentaux couvrant 63% du Globe, et complétés par des estimations aux endroits sans mesures (hémisphère sud).



# Origine du flux de chaleur terrestre

- Contrairement au Soleil, le bilan énergétique est non trivial car plusieurs sources pourraient contribuer de façon significative
- La Luminosité actuelle  $L$  doit être soutenue par une source de chaleur  $Q$  durant un temps  $\tau = Q/L$  :

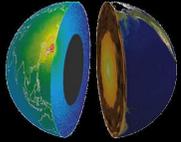
I "chimique"  $Q = (0.1 \text{ eV}) N_p = 10^{31} \text{ J} \rightarrow \tau \sim 10^{9-10} \text{ ans}$

II "gravitation"  $Q = GM^2/R = 4 \cdot 10^{32} \text{ J} \rightarrow \tau \sim 4 \cdot 10^{11} \text{ ans}$

III "nucléaire"  $Q = (1\text{MeV}) N_{\text{rad}} = 5 \cdot 10^{32} \text{ J} \rightarrow \tau \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ ans}$

→ Ces trois sources de chaleur sont donc potentiellement capable de soutenir le flux de chaleur observé sur des échelles géologiques ...

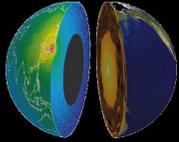
Terre:  $M=6 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$ ,  $R=6 \cdot 10^6 \text{ m}$ ,  $N_p \sim M/m_p=10^{51}$ ,  $L=4 \cdot 10^{13} \text{ W}$   
Nombre de noyaux radioactifs estimé à  $N_{\text{rad}} \sim 3 \cdot 10^{-7} N_p$



# Radioactivité & chaleur interne terrestre

- On considère la chaîne :  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + \dots + \Delta E$ 
  - Energie échangée  $\Delta E \sim 50 \text{ MeV}$
  - Temps de vie de la chaîne  $\tau \sim 5 \cdot 10^9 \text{ ans}$
  - Masse uranium  $m_u \sim 200 m_p$
- Géologie terrestre :  $M_{\text{uranium}} \sim \gamma M_{\text{Terre}} = 10^{-7} M_{\text{Terre}}$
- Energie produite par unité de masse d'U et de temps  $\delta E$ :  
 $\delta E = \Delta E / m_u \tau \sim 1 \text{ erg/g/s}$  (1 erg =  $10^{-7} \text{ J}$ )
- Énergie libérée par seconde par la Terre :
  - $Q \sim (\gamma M_{\text{Terre}} \Delta E) / (m_u \tau)$
  - $Q \sim 33 \text{ TW}$

**→ La radioactivité semble contribuer significativement à la chaleur interne terrestre**



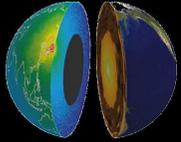
# Les radionucléides terrestres

TABLE I

Radiogenic heat and geoneutrino luminosity.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  represent the whole decay chains,  $^{40}\text{K}$  to  $^{187}\text{Re}$  are beta-decaying or electron-capture (EC) isotopes,  $^{123}\text{Te}$  is EC only, and  $^{152}\text{Gd}$  to  $^{186}\text{Os}$  are alpha-decaying isotopes.  $M_{\text{Earth}} = 5.97 \times 10^{24}$  kg,  $M_{\text{BSE}} = 4.05 \times 10^{24}$  kg, and  $M_{\text{Core}} = 1.93 \times 10^{24}$  kg is used

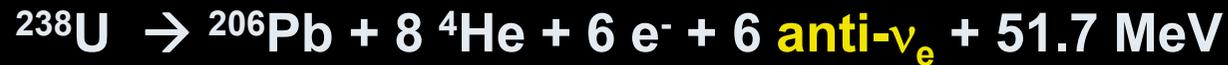
Isotope	Isotope abundance (%)	$H/M_{\text{Isotope}}$ ( $\mu\text{W}/\text{kg}$ )	$L_{\bar{\nu}}/M_{\text{Isotope}} \times 10^7$ ( $1 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )	BSE (Core) Model prediction		
				$a_{\text{element}}$ (ppm)	Total $H$ (TW)	Total $L_{\bar{\nu}} \times 10^{24}$ ( $1 \text{ s}^{-1}$ )
$^{238}\text{U}$	99.28	95.2	7.46	0.02	7.7	6.0
$^{232}\text{Th}$	100	26.3	1.62	0.08	8.5	5.2
$^{235}\text{U}$	0.72	564	3.20	0.02	0.33	0.19
$^{40}\text{K}$	0.0117	28.2	2.31	240	3.2	2.6
$^{76}\text{Lu}$	2.59	$2.5 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-1}$	0.068	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-2}$
$^{15}\text{In}$	95.7	$6.4 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-5}$	0.01	$2.5 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-5}$
$^{13}\text{Cd}$	12.22	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$	0.04 (0.15)	$3.6 \times 10^{-9}$ ( $6.5 \times 10^{-9}$ )	$2.5 \times 10^{-7}$ ( $4.5 \times 10^{-7}$ )
$^{87}\text{Rb}$	27.835 $Q_{\beta} = 283 \text{ KeV}$	$4.2 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-1}$	0.60	$2.8 \times 10^{-2}$	2.2
$^{38}\text{La}$	0.0902	$1.8 \times 10^{-1}$	$3.1 \times 10^{-2}$	0.65	$4.3 \times 10^{-4}$	$7.4 \times 10^{-4}$
$^{87}\text{Re}$	62.6	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-1}$	0.0003 (0.23)	$1.0 \times 10^{-7}$ ( $3.6 \times 10^{-5}$ )	$1.2 \times 10^{-3}$ ( $4.5 \times 10^{-1}$ )
$^{23}\text{Te}$	0.908	0	0	0.012 (0.85)	0 (0)	0 (0)
$^{52}\text{Gd}$	0.20	$2.8 \times 10^{-4}$	0	0.54	$1.2 \times 10^{-6}$	0
$^{48}\text{Sm}$	11.3	$4.1 \times 10^{-6}$	0	0.41	$7.6 \times 10^{-7}$	0
$^{44}\text{Nd}$	23.8	$1.2 \times 10^{-5}$	0	1.25	$1.5 \times 10^{-5}$	0
$^{47}\text{Sm}$	15.0 $\alpha$ decay	$3.1 \times 10^{-1}$	0	0.41	$7.8 \times 10^{-2}$	0
$^{74}\text{Hf}$	0.162	$1.5 \times 10^{-5}$	0	0.28	$2.8 \times 10^{-8}$	0
$^{90}\text{Pt}$	0.01	$5.6 \times 10^{-2}$	0	0.007 (5.7)	$1.6 \times 10^{-7}$ ( $6.1 \times 10^{-5}$ )	0 (0)
$^{86}\text{Os}$	1.58	$1.6 \times 10^{-5}$	0	0.003 (2.8)	$3.1 \times 10^{-9}$ ( $1.4 \times 10^{-6}$ )	0 (0)

EXPERIMENTAL STUDY OF GEONEUTRINOS WITH KAMLAND



# Neutrino géophysiques où géoneutrinos

- **Uranium 238 :**



$$\delta E (^{238}\text{U}) = 0.95\ \text{erg/g/s} \quad N(\text{U})/N(\text{Si}) = 9\ 10^{-9}$$

- **Thorium 232 :**



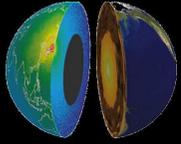
$$\delta E (^{232}\text{Th}) = 0.27\ \text{erg/g/s} \quad N(\text{Th})/N(\text{Si}) = 3.3\ 10^{-8}$$

- **Potassium 40 : abondance isotopique 0.0117%**



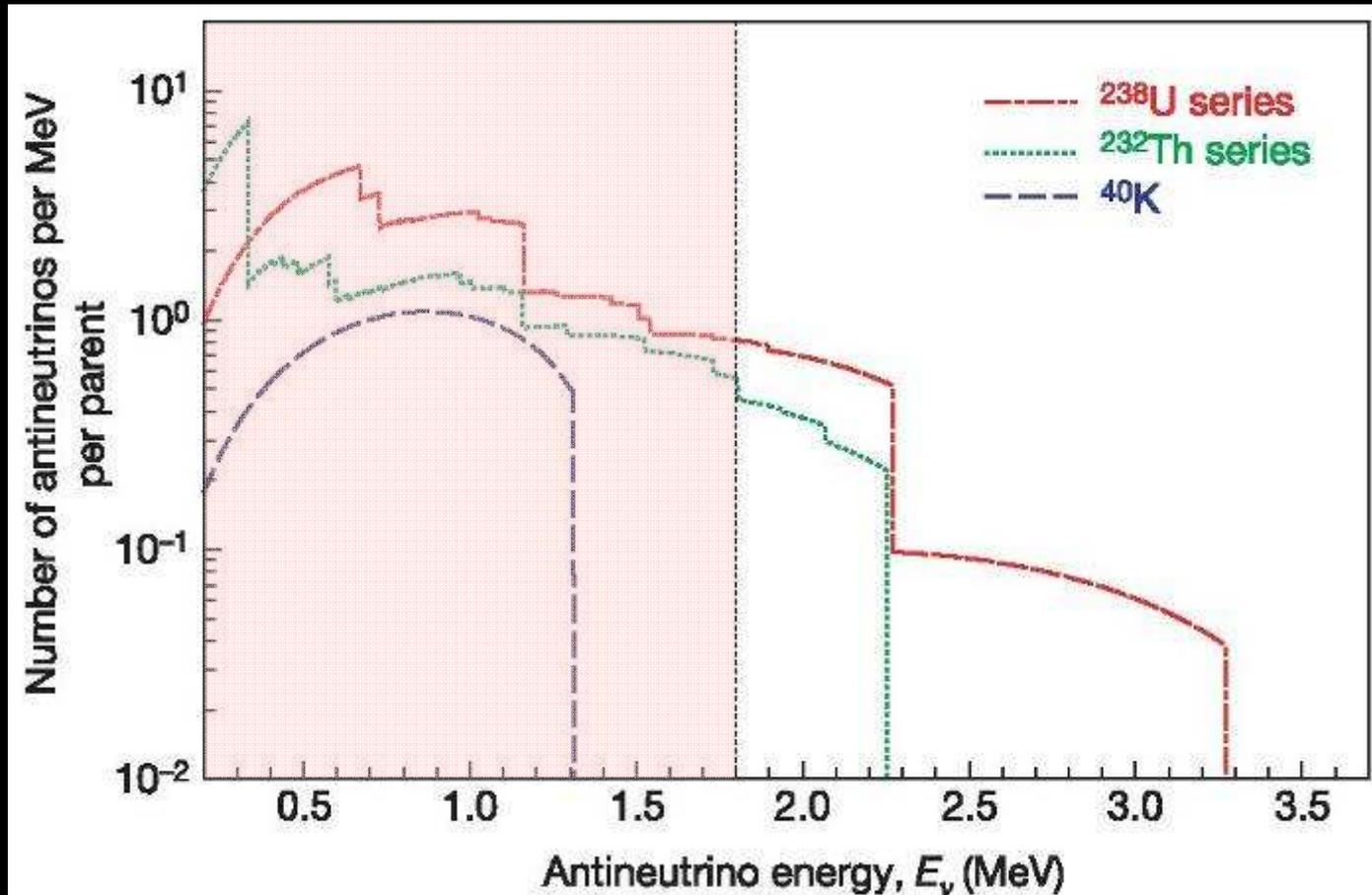
$$\delta E (\text{K}) = 3.6\ 10^{-5}\ \text{erg/g/s} \quad N(\text{K})/N(\text{Si}) = 3.7\ 10^{-3}$$

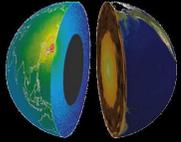
*Abondance N/N(Si) dans le système solaire*



# Spectre en énergie des géo-anti- $\nu$

- Uranium :  $E_{\max} = 3.26 \text{ MeV}$
- Thorium :  $E_{\max} = 2.25 \text{ MeV}$
- Potassium :  $E_{\max} = 1.31 \text{ MeV}$





# Modèle I : Terre chondrite carbonée

▪ **Hypothèse : la Terre primitive avait une composition assimilée aux plus vieux objets du système solaire, tracés par les météorites chondrites carbonées.**

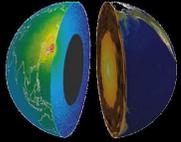
→ Les rapports  $N(U)/N(Si)$ ,  $N(Th)/N(Si)$  &  $N(K)/N(Si)$  sont tirés des analyses des météorites chondrites carbonées.

▪ **Le silicium est estimé contribué pour 15% de la masse de la Terre.**

$M(U) = 7 \cdot 10^{19} \text{ g}$	$\rightarrow$	$L(U) = 6.7 \text{ TW}$	$\leftarrow 2^{\text{e,exe}q_0}$
$M(Th) = 2.5 \cdot 10^{20} \text{ g}$	$\rightarrow$	$L(Th) = 6.8 \text{ TW}$	$\leftarrow 2^{\text{e,exe}q_0}$
$M(K) = 4.5 \cdot 10^{24} \text{ g}$	$\rightarrow$	$L(K) = 16.8 \text{ TW}$	$\leftarrow 1^{\text{er}}$

---

$$L_{\text{total}} = 30.3 \text{ TW}$$



# Flux de neutrinos attendus

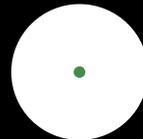
- **Nombre de neutrino géophysiques:  $L_\nu = L N_\nu / \Delta E$** 
  - L est la production de chaleur interne;
  - $\Delta E$  énergie dégagée dans la chaîne de désintégration;
  - $N_\nu$  le nombre de neutrinos émis dans la chaîne;

- **Neutrinos émis par “Terre chondrite carbonée”**

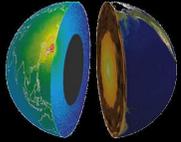
- neutrino	$L_\nu(K)$	$= 1.5 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1}$	$\leftarrow 2^e$
- anti- neutrino	$L_\nu(K)$	$= 1.5 \cdot 10^{25} \text{ s}^{-1}$	$\leftarrow 1^{er}$
- anti- neutrino	$L_\nu(U)$	$= 3.9 \cdot 10^{23} \text{ s}^{-1}$	$\leftarrow 4^e$
- anti- neutrino	$L_\nu(Th)$	$= 3.3 \cdot 10^{23} \text{ s}^{-1}$	$\leftarrow 3^e$

- **Flux attendus pour une “Terre chondrite carbonée”**

-  $\phi_\nu = \beta L_\nu / 4\pi R^2$ , avec  $\beta = 1$                        $3/2$                        $3.5$



-  $\phi_\nu \sim 4 \beta 10^6 \nu/\text{cm}^2/\text{s}$  (comparable au flux de  $\nu$  solaires du  $^8\text{B}$ )



# La croûte terrestre

- La croûte et le manteau supérieur sont directement accessibles par sondage géochimique.

- D'après les géochimistes : U, Th sont **lithophiles**

- Accumulation dans la croûte terrestre & enrichissement en U et Th par rapport aux chondrites (non affinité avec manteau terrestre).

- Les 10-50 Km de croûte peuvent contribuer pour une fraction importante de l'U et Th de la "Terre chondrite carbonée".

- $U_{\text{croûte}} \sim 1/2 U_{\text{"Terre chondrite carbonée"}}$

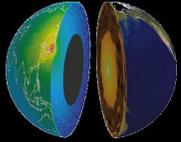
- $Th_{\text{croûte}} \sim 1/2 Th_{\text{"Terre chondrite carbonée"}}$

- Cependant la croûte n'est pas enrichie en K !

- $K_{\text{croûte}} \sim 1/10 K_{\text{"Terre chondrite carbonée"}}$

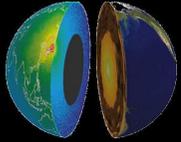
- Où est passé le potassium ?

- On estime la chaleur produite par la radioactivité de la croûte terrestre à **10 TW**.



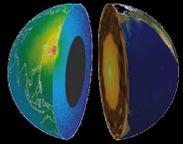
# Le manteau terrestre

- Les tentatives de déduire la quantité de radioactivité produite à partir d'échantillon du manteau sont assez incertaines !  
Les profondeurs de prélèvement restent faibles, et la variabilité des échantillon importante.
- Le manteau est appauvri en éléments radioactifs par rapport à la croûte. Néanmoins, sa masse beaucoup plus importante lui confère une production de chaleur de l'ordre de **10 TW**.
- Deux théories : manteau structuré en deux couches où homogène
- Le potassium se fait aussi rare dans le manteau que dans la croûte :
  - $K/U_{\text{croûte+manteau}} \sim 1/4 K/U_{\text{“Terre chondrite carbonée”}}$
  - Où est passé le potassium, source principale de chaleur ?
    - Echappement lors de la formation de la Terre ?
    - Du K dans le noyau ?



# Cas du potassium (K)

- Les mesures de la croûte montrent une déplétion d'un **facteur 7** en K par rapport aux chondrites carbonées
- K est assez lourd pour ne pas s'être échappé de la Terre lors de son évolution
- Mais comportement du K lors de l'accrétion de planétésimaux ?
- A haute pression K se comporte comme un métal
  - Diffusion à travers le globe ?
  - **Présence de K dans le noyau (V.R. Murthy, Nature 423, 2003) ?**
  - Source du champ magnétique terrestre ?
- **Débat ouvert → intérêt primordial de la mesure des géo- $\nu$  du K !!!**



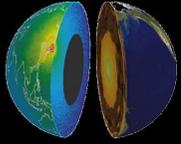
## Modèle II : Terre entièrement silicatée (BSE)

- Les météorites **chondrites carbonée** sont considérées comme représentatives de la composition du système solaire primitif
  - Estimation de la composition chimique de la Terre à partir de modèle de formation des planètes (pertes & accrétion de matière)
- La composition **d'U/Th/K est mesurée dans la croûte** (océanique et continentale) et le manteau supérieur
- Elaboration d'un modèle de Terre de référence en accord avec (presque) toutes les données recueillies → **Terre complètement silicatée (BSE)**, pour Bulk Silicated Earth) → Composition du manteau primitif, après la séparation du noyau mais avant la séparation différentiation de la croûte

McDonough, 2003

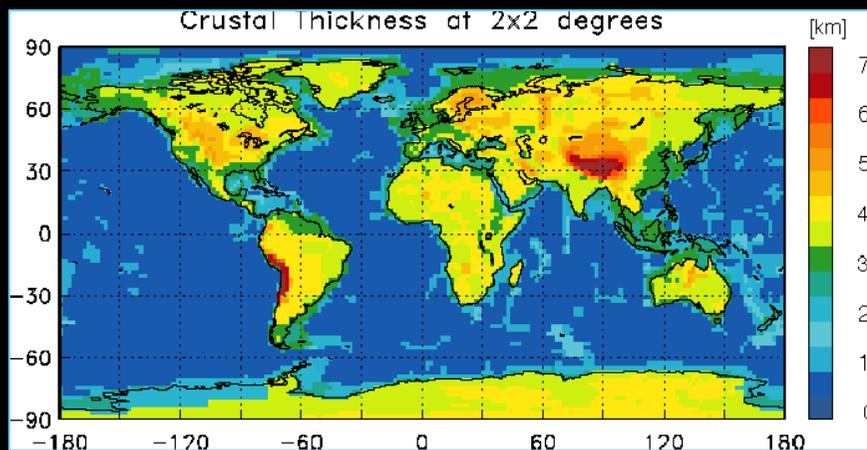
	M( $10^{17}$ kg)	H <sub>R</sub> (TW)	L <sub>v</sub> ( $10^{24}$ /s)
U	0.8	7.6	5.9
Th	3.1	8.5	5.0
<sup>40</sup> K	0.8	3.3	21.6

- Incertitudes sur les masses : 15 %
- Flux total radiogénique: **19 TW**
- Chaleur interne dominée par U/Th
- Luminosité  $\nu$  dominée par K

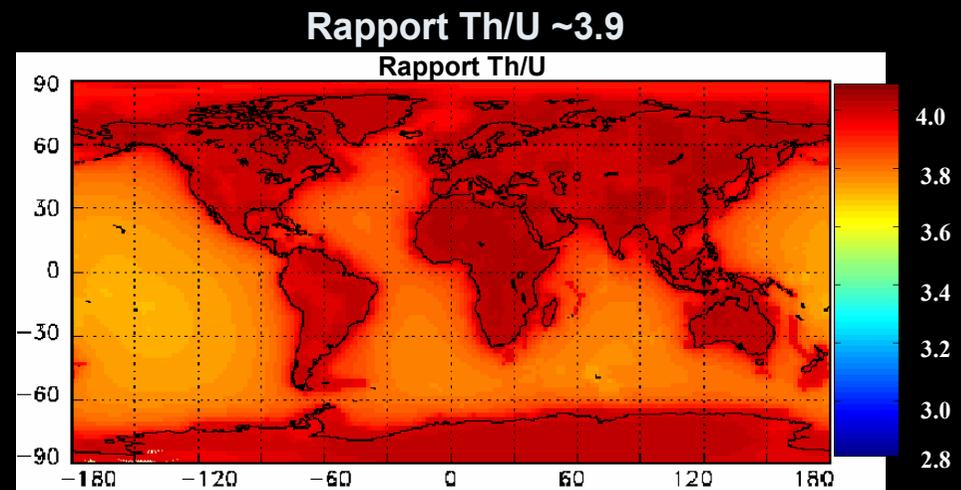


# Modélisation « $\nu$ » de la Terre BSE

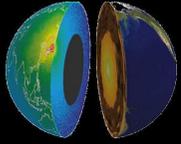
- **Cartographie de la croûte terrestre (2x2 degrés)**
  - Croûtes continentale et océanique
  - 3 couches verticales (moyennes des valeurs en U/Th/K par case)
  - Incertitudes à partir de la dispersion des mesures
- **Manteau supposé uniforme**
  - structure sans impact sur le flux de neutrinos
- **Pas de radioéléments dans le Noyau**
  - Cas du potassium à discuter



F. Montovani et al. Phys.Rev. D69 (2004) 013001

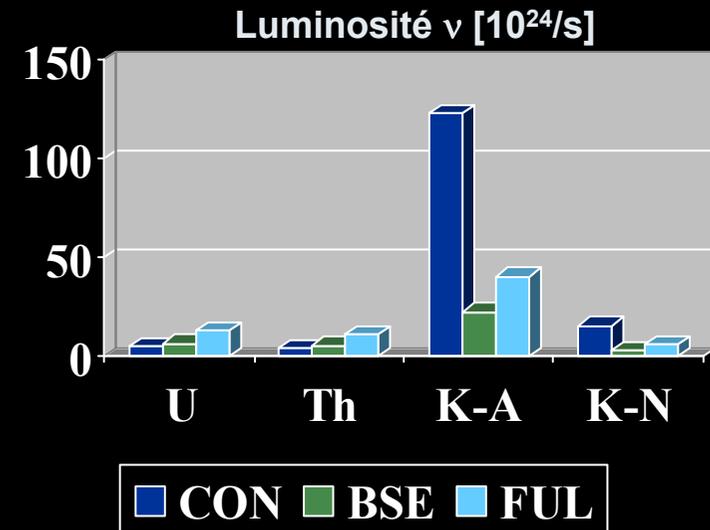
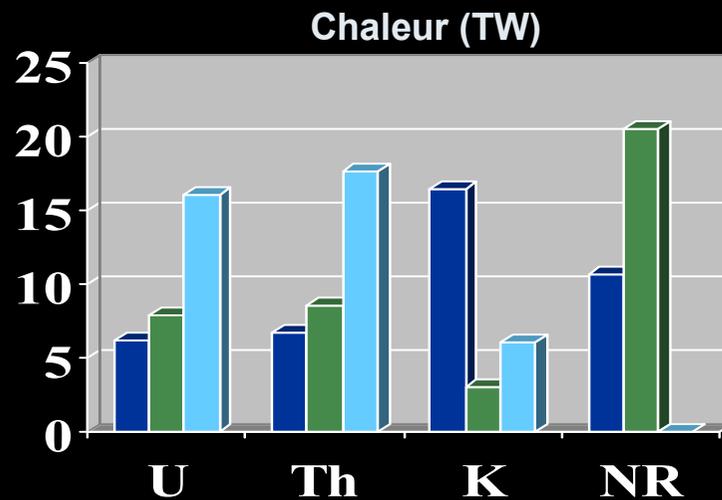


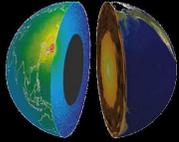
Th. Lasserre 02/04/2007



# Chaleur interne radioéénique

- 3 modèles pour cerner la réalité (domination anti- $\nu_e$  du  $^{40}\text{K}$ )
  - Terre “**chondrite carbonée**” → 75% de  $\Phi_{\text{Terre}} = 40 \text{ TW}$ 
    - $^{40}\text{K}/\text{U}=1$
  - Terre “**BSE**” → 50% de  $\Phi_{\text{Terre}} = 40 \text{ TW}$ 
    - $^{40}\text{K}/\text{U}=1$
  - Terre “**complètement radiogénique**” → 100% de  $\Phi_{\text{Terre}} = 40 \text{ TW}$ 
    - $\text{Th}/\text{U}=4, ^{40}\text{K}/\text{U}=1$





# Flux de géoneutrinos (BSE)

Flux attendu pour l'énergie  $E$  à la position  $r$

Masse d'isotope / unité de masse

Spectre en énergie des géo- $\nu$

Densité de la roche

$$\frac{d\Phi(E_\nu, \vec{r})}{dE_\nu} = A \cdot \frac{dn(E_\nu)}{dE_\nu} \int_{Earth} \frac{a(\vec{r}') \rho_{U/Th}(\vec{r}')}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'_{détecteur}|^2} P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) d^3\vec{r}'$$

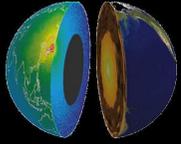
Taux de désintégration / unité de masse

Intégration sur le volume terrestre

Distance source-détecteur

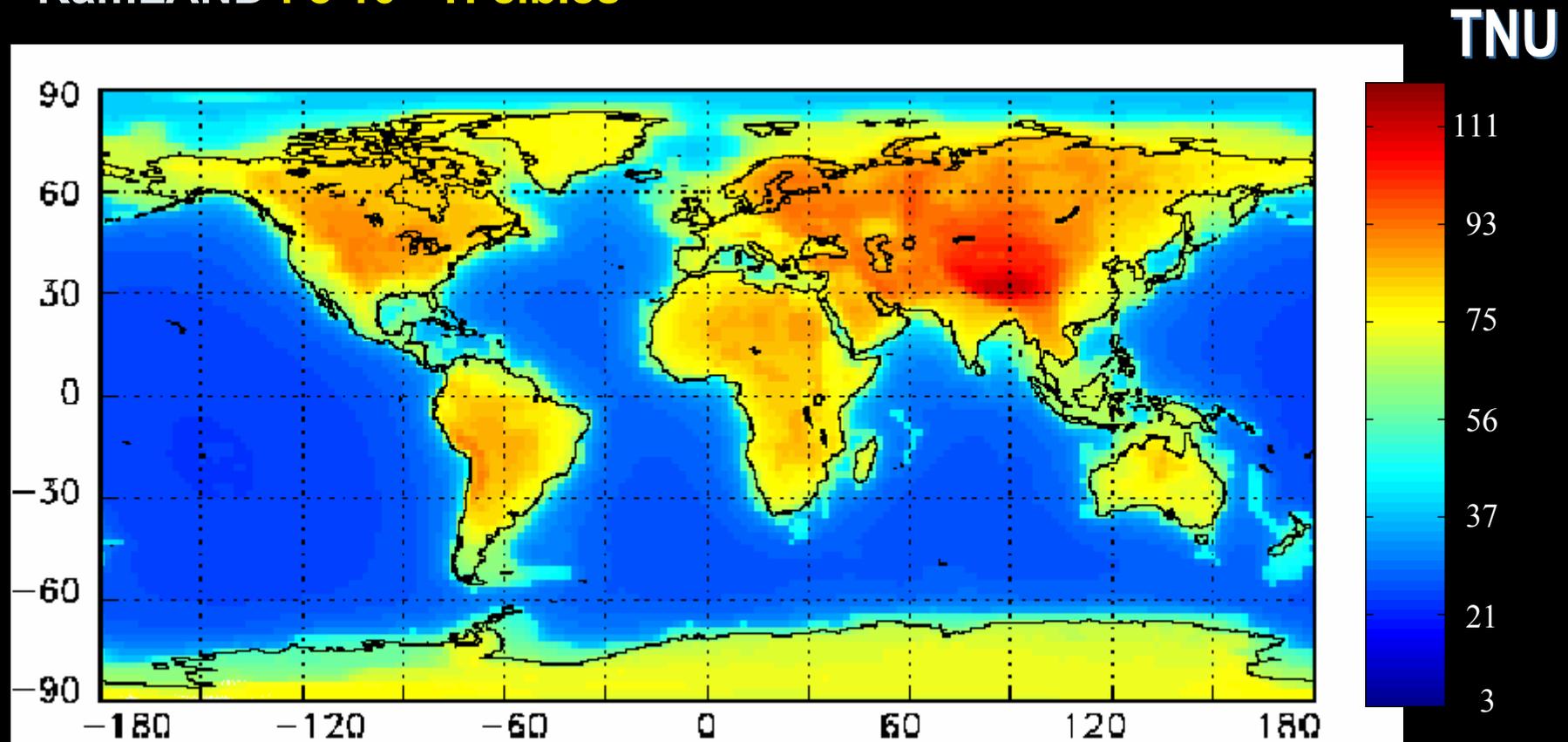
Probabilité de survie des anti- $\nu_e$

- Intégration sur  $E$  laborieuse si on inclut les oscillations sans approximation
- On néglige l'absorption des neutrinos dans la Terre

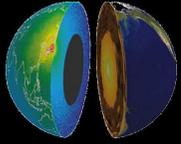


# Carte du flux de géoneutrinos (BSE)

- Prédiction du nombre de neutrinos d'U+Th
- **1 TNU = 1 évènement pour  $10^{32}$  protons libres de cible par an**
- **KamLAND :  $8 \cdot 10^{31}$  H cibles**



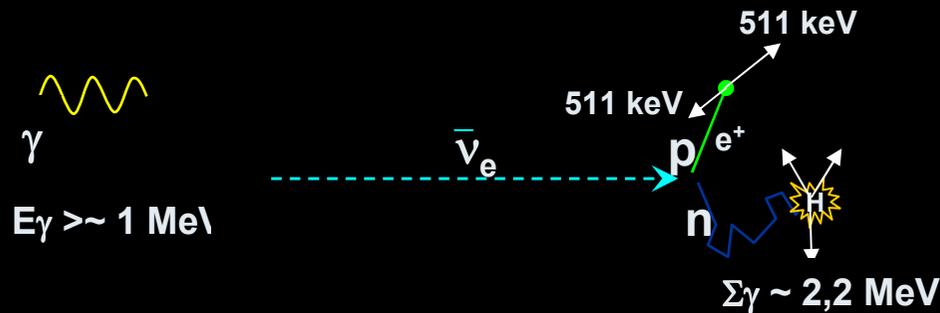
F. Montovani et al. Phys.Rev. D69 (2004) 013001



# Détection des géoneutrinos (U/Th)

Bruit de fond accidentel

Signal antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

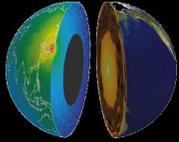


prompt  $e^+$  & capture  $n$  sur  $H$

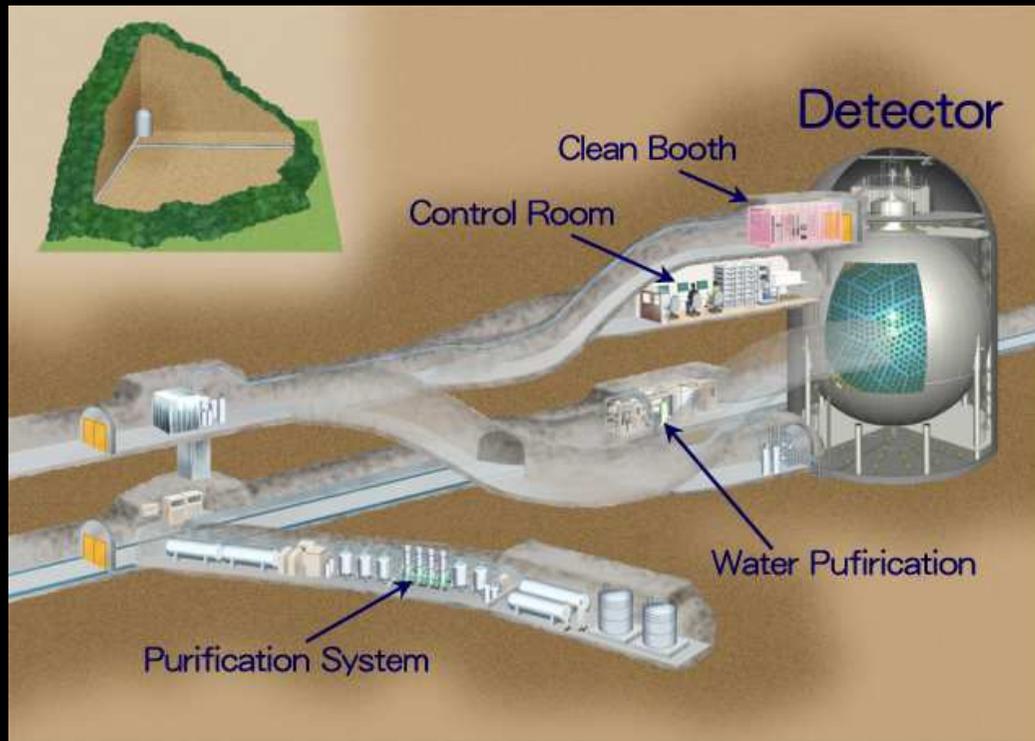
Bruit de fond corrélé

- Prompt  $e^+$ ,  $E_p=1-10 \text{ MeV}$ ,
  - $n$  capturé sur  $H$ ,  $E_R=2,2 \text{ MeV}$
- Corrélation temporelle:  $\tau \sim 30 \mu\text{sec}$
- Corrélation spatiale:  $< 1 \text{ m}$
- Seuil à  $1.8 \text{ MeV} \rightarrow$  uniquement utilisable pour les géo- $\nu$  de  $U$  &  $Th$

$\Sigma\gamma \sim 2,2 \text{ MeV}$

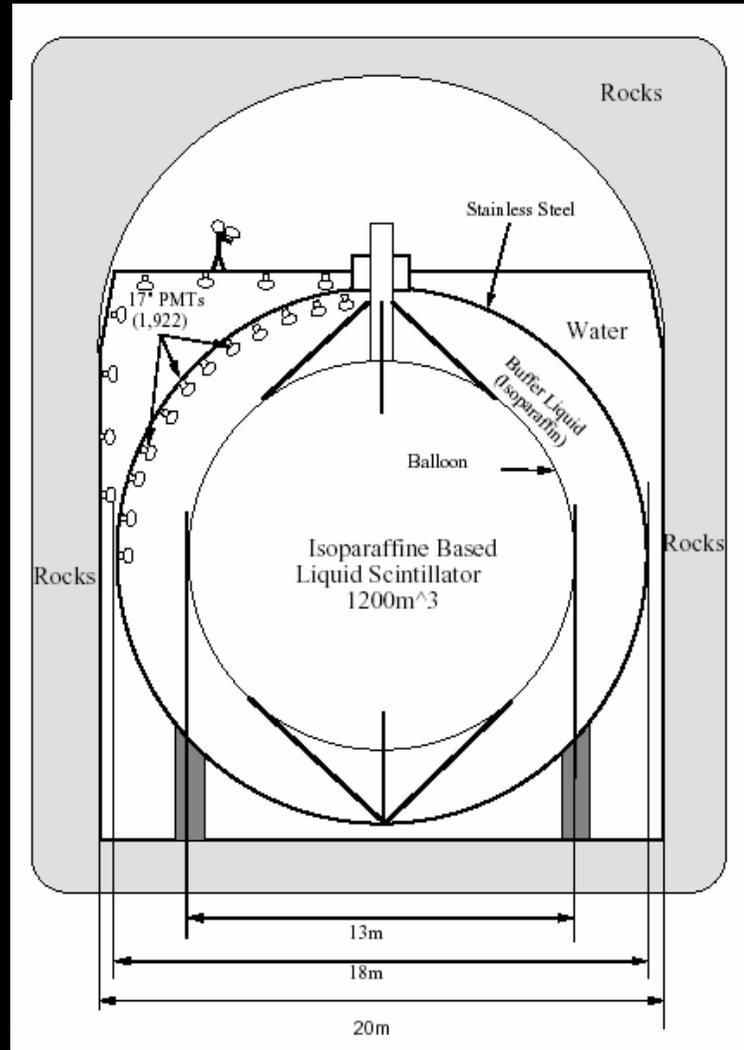
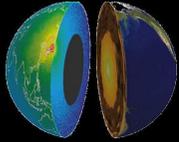


- Observatoire de  $\nu$  de basse énergie, mine de Kamioka, Japon (2700 mwe)
- 1000 tonnes de liquide scintillant, observés par 1845 PMT's



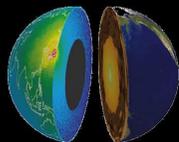
- Programme de physique:
  - 1) Test la solution LMA
  - 2) Neutrino solaire (raie du Béryllium)
  - 3) Géoneutrinos

- Identification de la solution Large Mixing Angle (LMA) du problème des neutrinos solaires

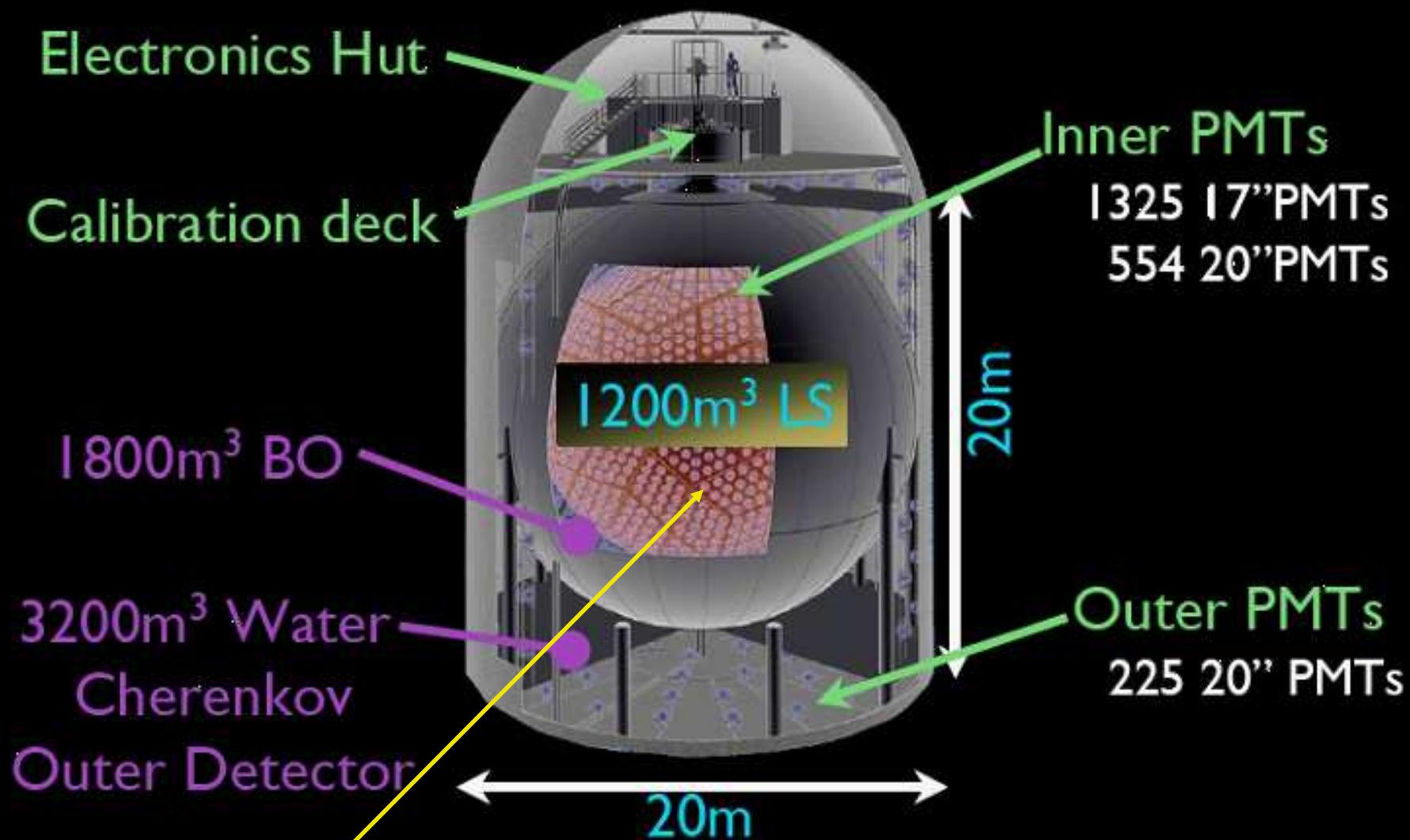


- LS : 80%: dodecane  
20%: pseudocumene  
1.5 g/l: PPO (fluor)
- Huile 50%: dodecane  
50%: isoparaffin
- Couverture des PMTs: 34%
- ~ 500 p.e. / MeV ~ 8000 photons/MeV  
 $\lambda_{420 \text{ nm}} \sim 10\text{m}$





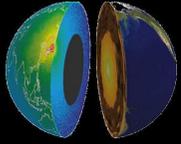
# KamLAND



**8  $10^{31}$  protons libres**

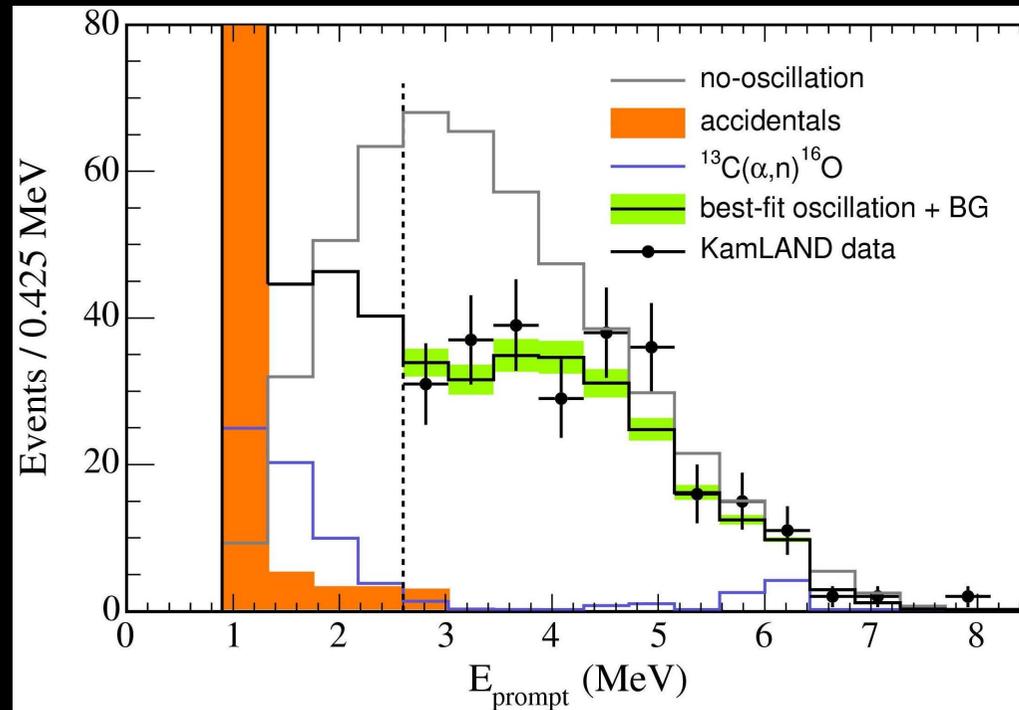
Th. Lasserre 02/04/2007

Slide by Kengo Nakamura



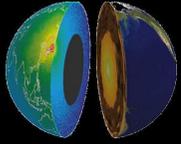
# Mesures des oscillations de $\nu$ (2004)

- Mesures  $\nu$  réacteurs (16 centrales nucléaires,  $\langle L \rangle \sim 180$  km)
- Sélection des événements  $E_{\text{vis}} > 2.6$  MeV ( $E_\nu > 3.4$  MeV) → Pas de géo- $\nu$
- 258 événements neutrinos réacteurs
- Attendus :  $356.2 \pm 23.7$  – Bruits de fond :  $7.5 \pm 1.3$
- Disparition de anti- $\nu_e$  confirmée à 99.995%
- Paramètres d'oscillation :  $\Delta m^2 = 7.9^{+0.6}_{-0.5} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$  &  $\sin^2(2\theta_{23}) = 0.82 \pm 0.07$



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

$$E_{\text{vis}} = E_\nu - E_{\text{seuil}} + 2m_e$$



# Correction due aux oscillations de géo- $\nu$

- $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta m^2_{21} L/4E)$
- Énergie des  $\nu \sim \text{MeV}$  & Distance caractéristique  $< 1000 \text{ km}$

→ Effets propagation des neutrinos dans la matière  
« électronique » négligeables

– correction  $\sim 1\%$

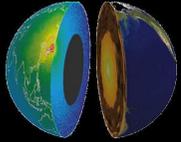
→ Simplification de la formule d'oscillation

i – Formalisme à 2 saveurs au lieu de trois (effet  $< 5\%$ )

ii – Oscillation moyennée :

$$- P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - 0.5 \sin^2(2\theta_{12}) \sim 0.59$$

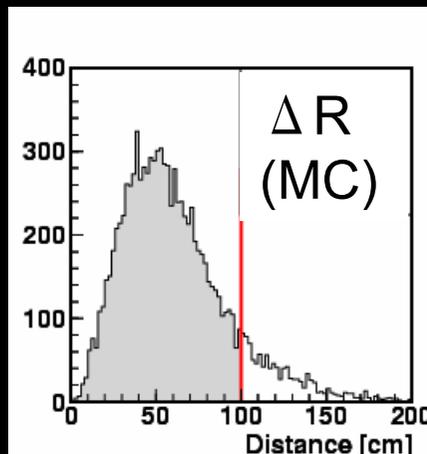
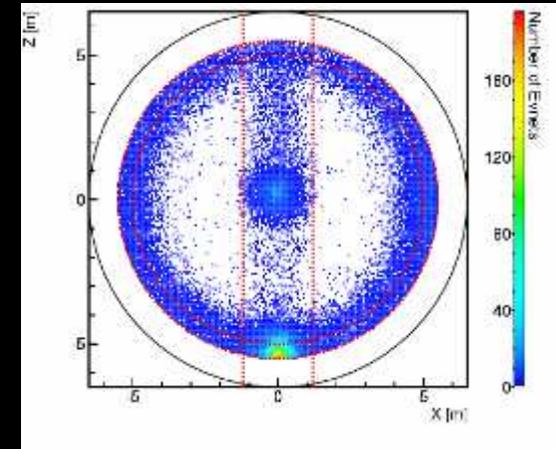
- Intégrale  $N_{\text{géo-}\nu}$  prédit modifiée de  $< 1\%$



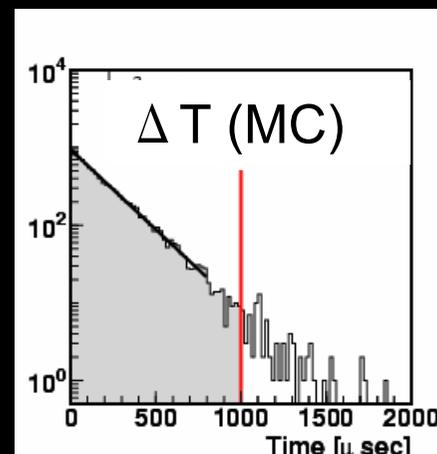
# Sélection des événements géo- $\nu$

- Volume fiduciel
  - Sélection d'une sphère  $R < 500$  cm
  - Tube vertical de 120 cm éliminé
- Muon Spallation Cut ( ${}^9\text{Li}$ )
  - Veto 2 sec du détecteur après gerbe de muons
- Coincidence: ( $e^+, n$ )
  - Distance:  $0 < \Delta R < 100$  cm
  - Temps:  $0.5 \mu\text{sec} < \Delta T < 1000 \mu\text{sec}$
  - Energy candidat neutron :  $1.8 \text{ MeV} < E < 2.6 \text{ MeV}$

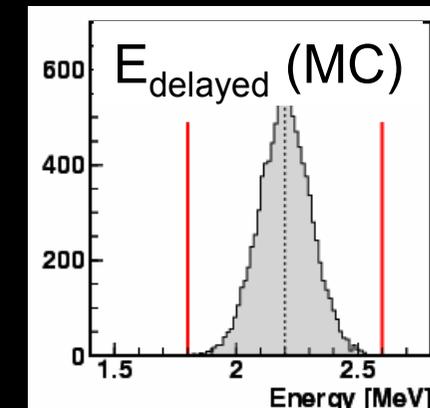
Vertex des fortuites



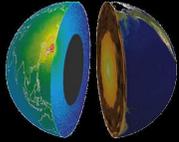
$\varepsilon = 77\%$



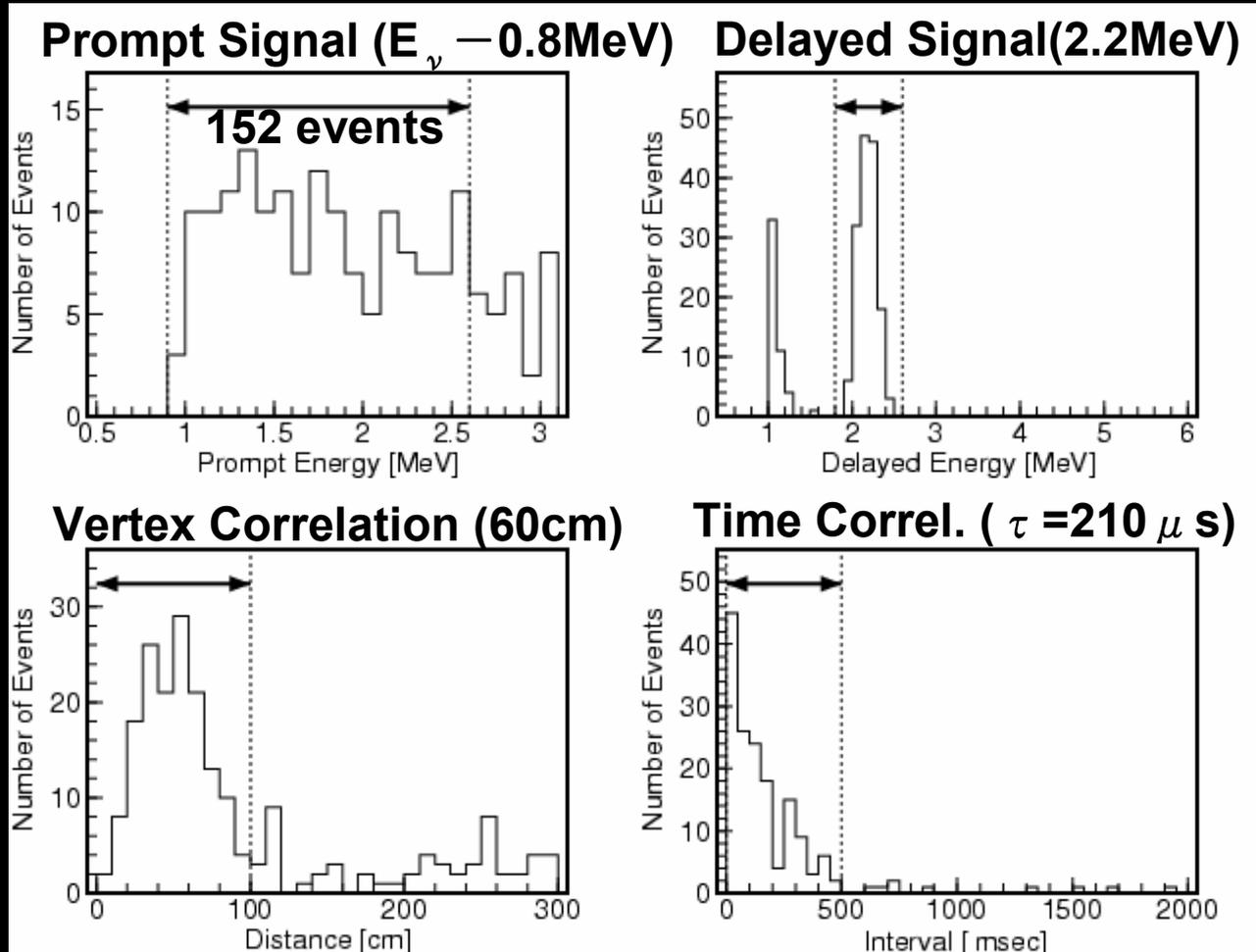
$\varepsilon = 90\%$



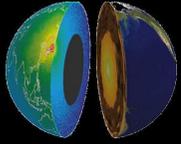
$\varepsilon = 99.7\%$



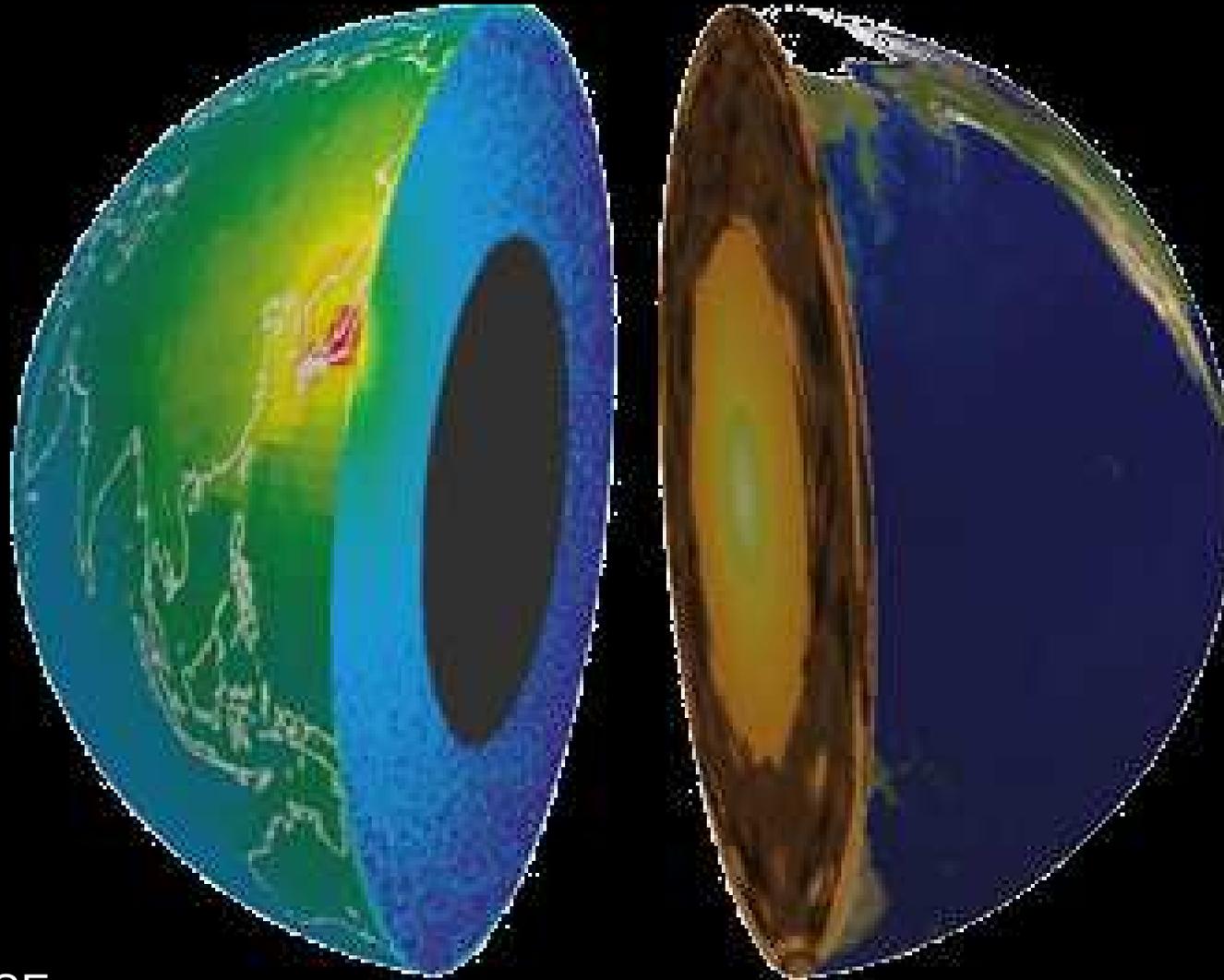
# Candidats géo- $\nu$



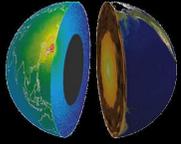
- Exposition: 749.14 days
- # de protons:  $3.459 \times 10^{31}$



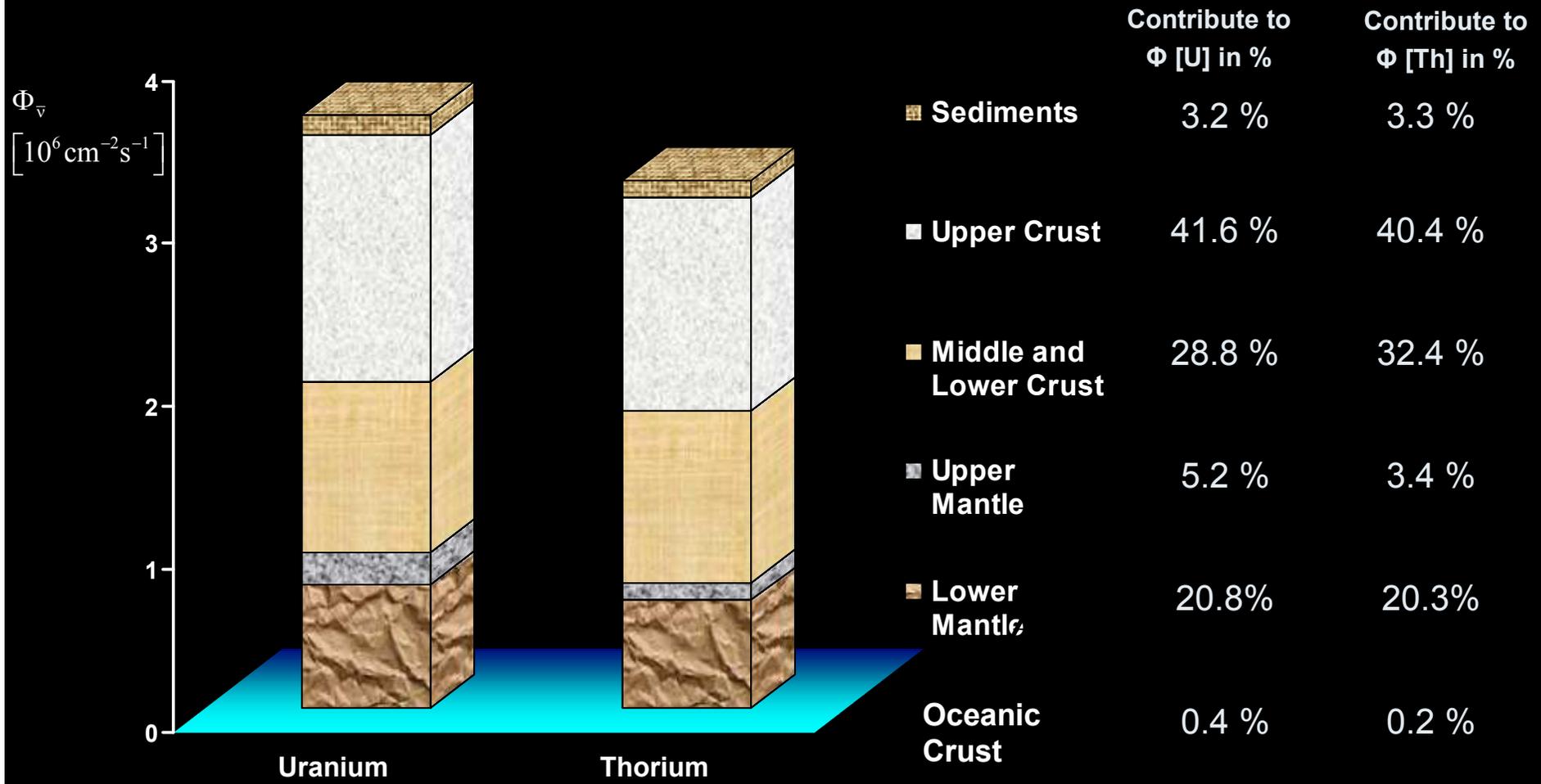
# Mappemonde géo- $\nu$



Modèle BSE

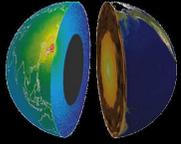


# Origine des géo- $\nu$ à KamLAND



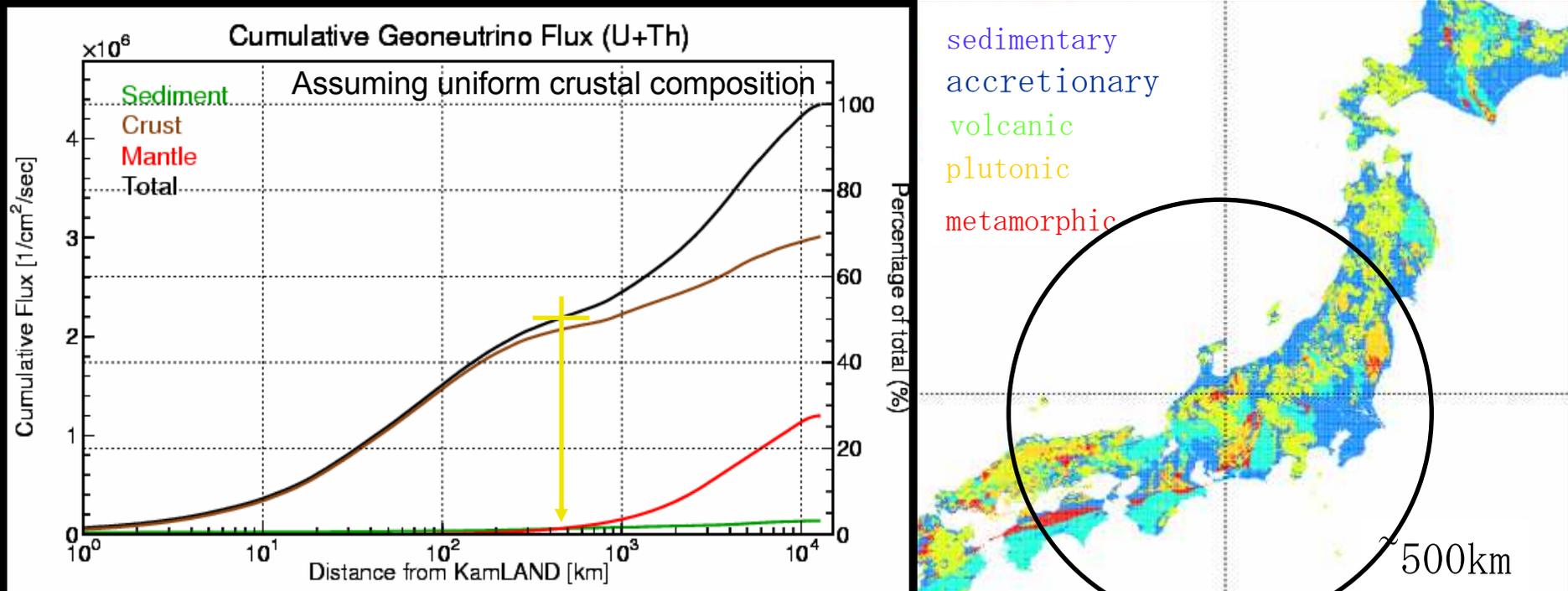
■ **~70% du signal provient de la croûte terrestre**

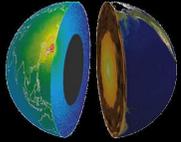
→ indispensable à modéliser correctement pour tirer des conclusions sur la géochimie du manteau terrestre



# Importance de la géologie locale

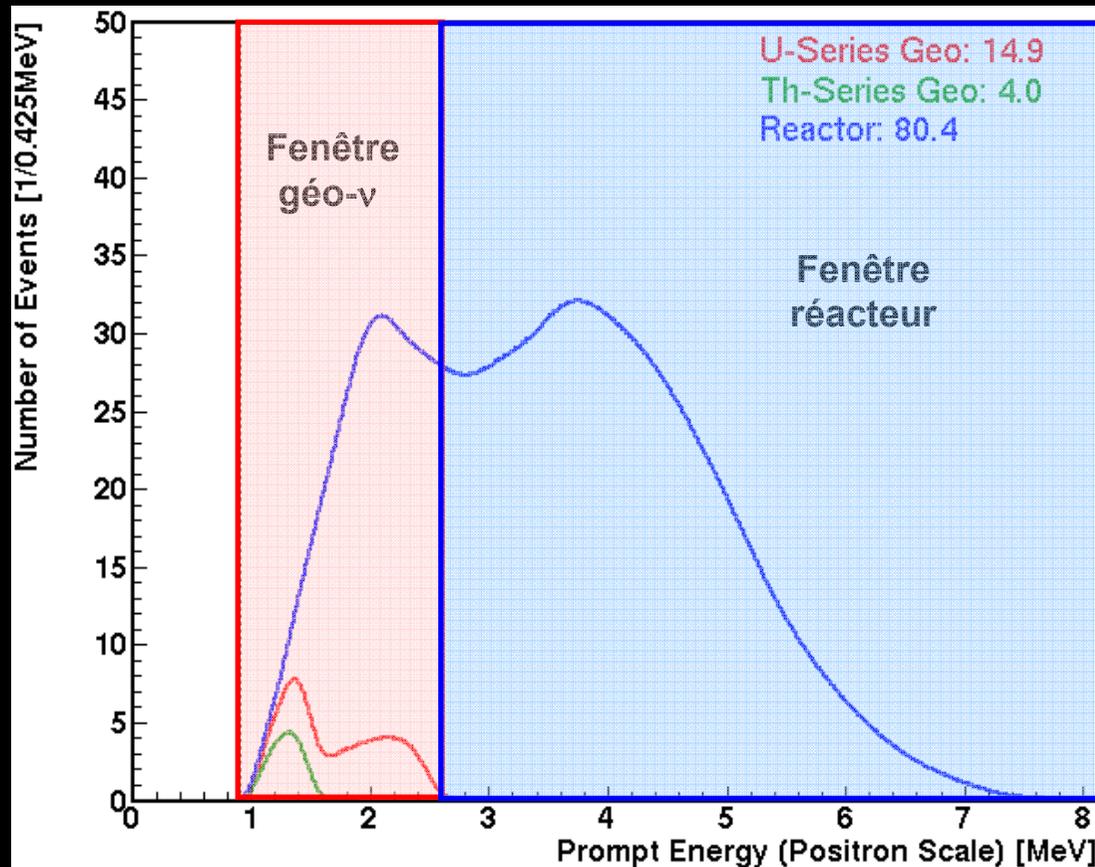
- **50% du flux attendu provient de moins de 500 km;**
  - **Et largement dominé par la contribution de la croûte.**
- **Modélisation de la géologie japonaise pour prédire le flux de géo-ν**
  - Position du Japon entre continent et océan, sur une zone de subduction;
  - Relevé géologique japonais de Togashi et.al. (2000);
  - Correction appliquée de l'ordre de 10% du signal total.





# Spectre de géo- $\nu$ attendu

- 408 tonnes  $\text{CH}_2$  (cible dans  $R < 5\text{m}$ ), 714 jours, efficacité 69%
- Paramètres d'oscillation des neutrinos d'après KamLAND 2002

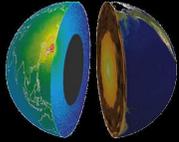


**Nombre d'evts attendus:**  
**Série U : 14.9**  
**Série Th : 4.0**  
**Réacteur ( $E < 3.4\text{MeV}$ ): 80.4**

Nature 436, 28 July 2005

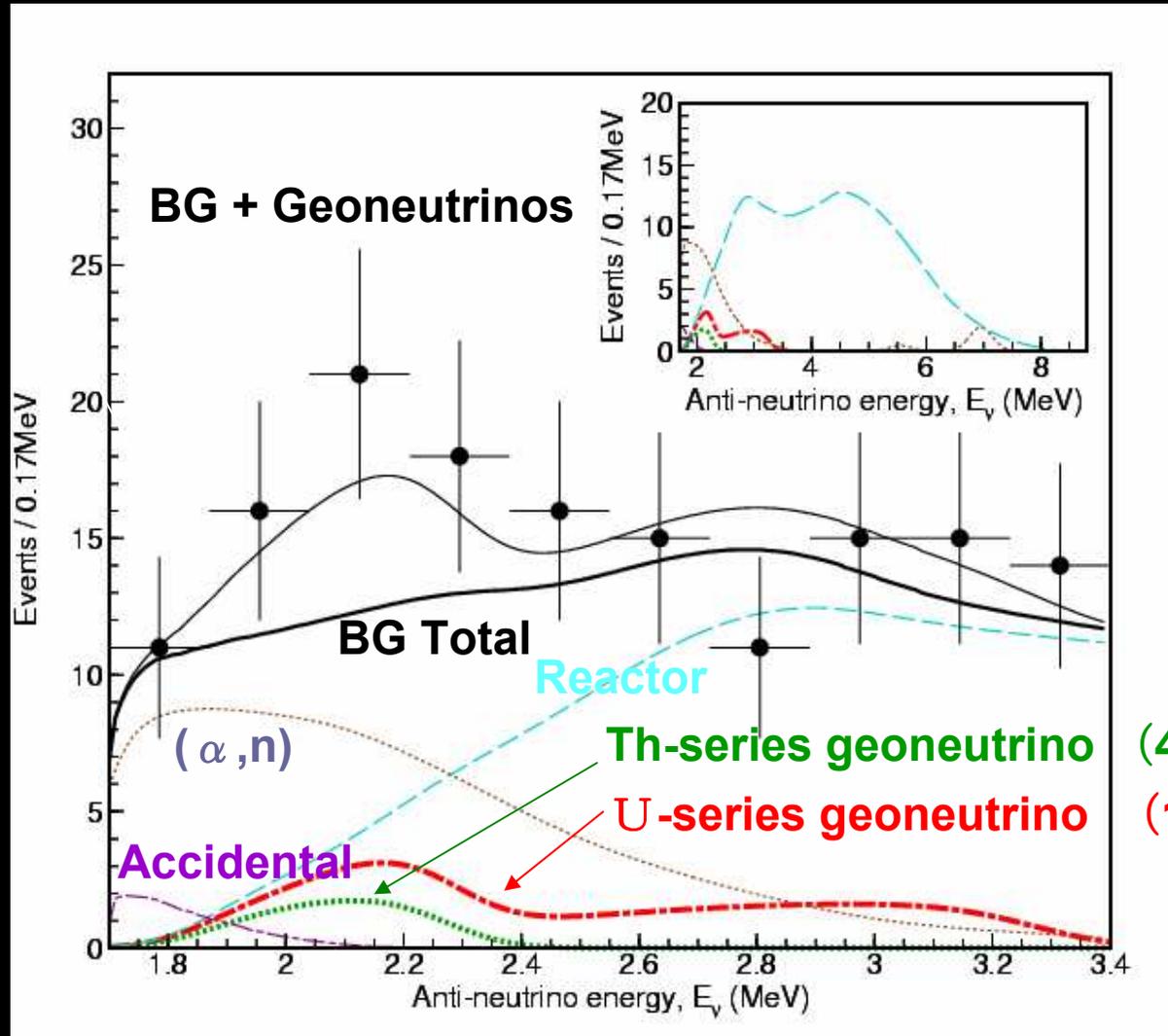
Th. Lasserre 02/04/2007

36

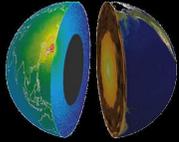


# Simulation & résultats

Nature 436, 28 July 2005



Prédiction :  
modèle BSE +  
informations  
géologie  
locale



# Bruits de fond

**BDF :  $127.4 \pm 13.3$  (syst.)**

- **Neutrinos**

- **Réacteurs :**  $80.4 \pm 7.2$
- **Combustible usagé :**  $1.9 \pm 0.2$

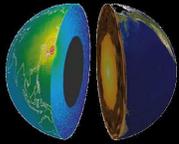
- **Cosmogéniques**

- **Neutrons rapides (extérieurs) :**  $< 0.1$
- **Spallation ( ${}^9\text{Li}$ ) :**  $0.30 \pm 0.047$

- **Impuretés radioactives**

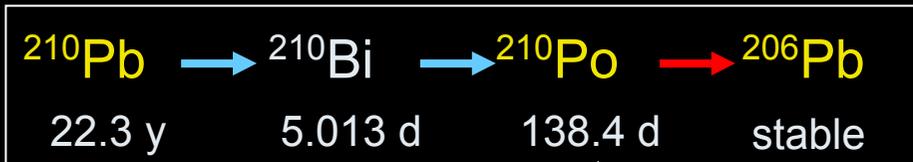
- **Fortuites**  $2.38 \pm 0.0077$
- **Fissions spontanées**  $< 0.1$
- **Réactions ( $\alpha, n$ )**  $42.4 \pm 11.1$
- **Réactions ( $\gamma, n$ )** négligeable

**152  
événements  
observés**



# Bruit de fond ( $\alpha, n$ )

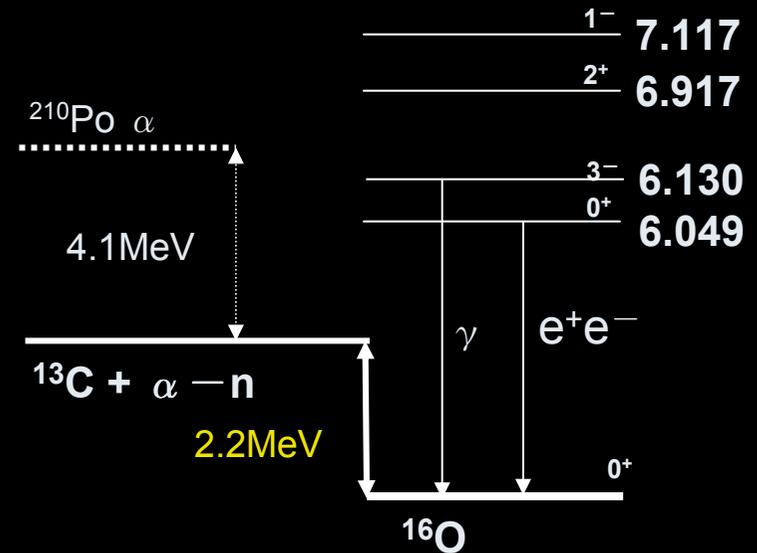
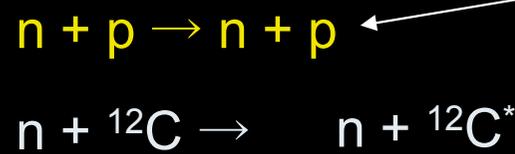
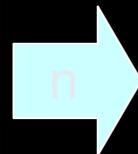
$\alpha$  produites par les contaminants du LS



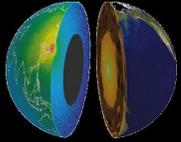
$\alpha$

$T_n = 7.3 \text{ MeV}$ , quenching 1/3

- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}$
- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}^*$
- $^{14}\text{N} (\alpha, n) ^{17}\text{F}$
- $^{15}\text{N} (\alpha, n) ^{18}\text{F}$
- $^{17}\text{O} (\alpha, n) ^{20}\text{Ne}$
- $^{18}\text{O} (\alpha, n) ^{21}\text{Ne}$

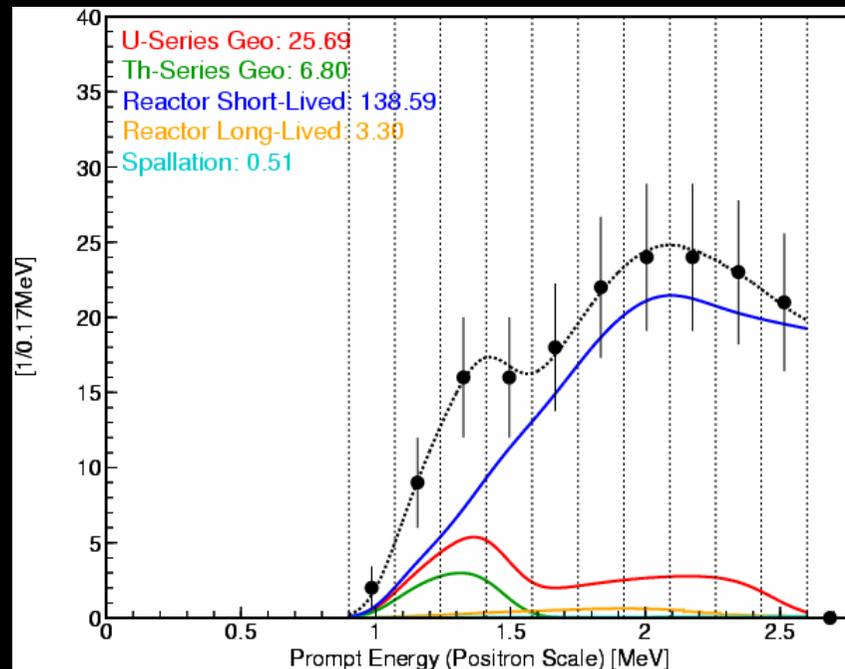


Signal prompt

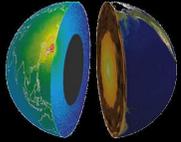


# Projection des résultats futurs ...

- **( $\alpha$ , n) dominant avec le bdf réacteurs**
- Amélioration prévues
  - réduction des impuretés radioactives par **purification** du LS
    - Facteur  $10^5$  pour la phase « KamLAND Solaire »
  - Amélioration connaissance section efficace des ( $\alpha$ , n)
  - Réduction des erreurs de prédiction du spectre/flux



- Hypothèses:
  - Exposition : 749 jours
  - Volume fiduciel de 5.5m
  - Efficacité de 90%
- Phase KamLAND « solaire »
- **Erreur réduite de 54% à 28%**
- Niveau de confiance: 99.96%
- Erreur dominée par la stat du bruit de fond réacteur



# Analyse: norme et forme

## ▪ Résultats expérimentaux

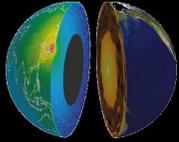
- Observé : 152
- Bruit de fond :  $127.4 \pm 13.3$  (syst.)
- Excès :  $24.6 \pm 17.9$
- Erreur systématique: 5.0% (volume fiduciel)

## ▪ Analyse en norme

- hypothèse « Zéro géo- $\nu$  » exclue à 91.4% C.L.
- Meilleur fit Ngéo- $\nu$  = 25 (19 d'après BSE)
- Limite supérieure à 99% C.L. : 72 evts.

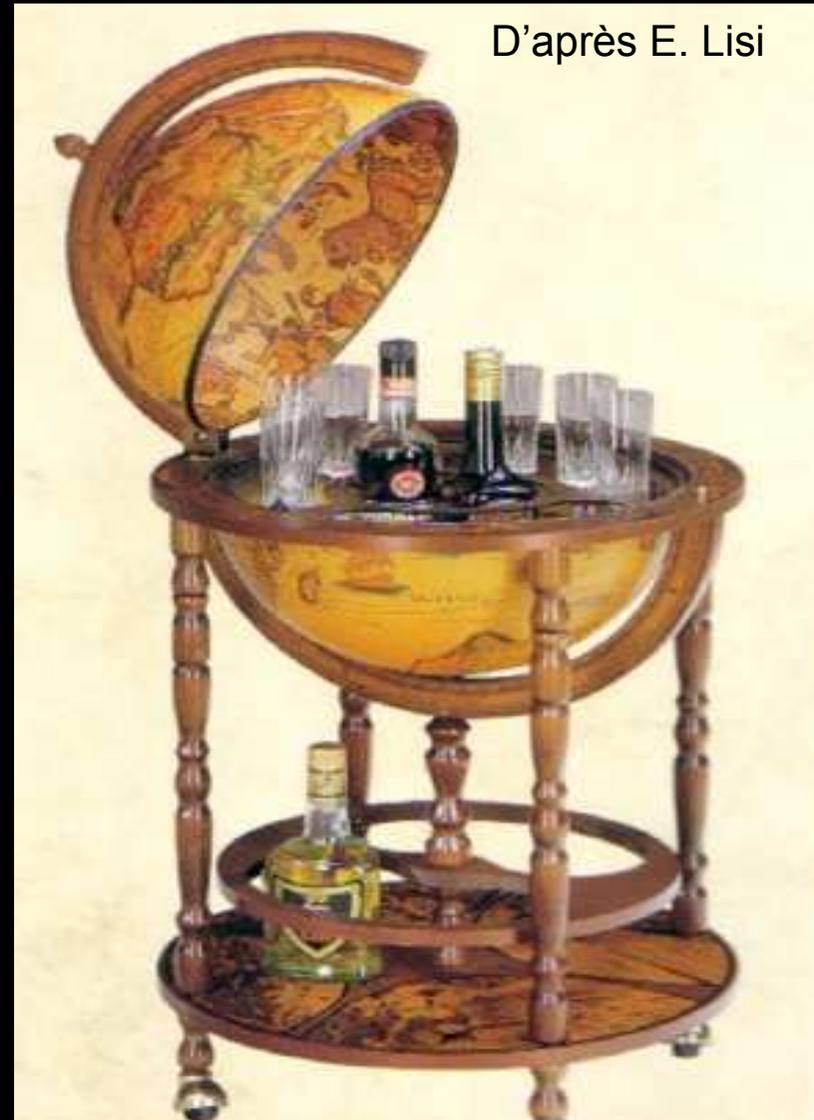
## ▪ Analyse en forme + norme

- Contrainte Th/U = 3.9
- **Hypothèse « Zéro géo- $\nu$  » exclue à 95.3% ( $1.99 \sigma$ )**
- intervalle à 90% C.L. : 4.5 to 54.2
- Limite supérieure à 99% C.L. : 70.7



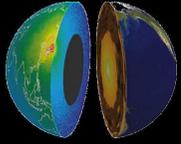
# Félicitations à KamLAND !!!

T. Araki *et al.*, *Nature*,  
436, 499, 2005.



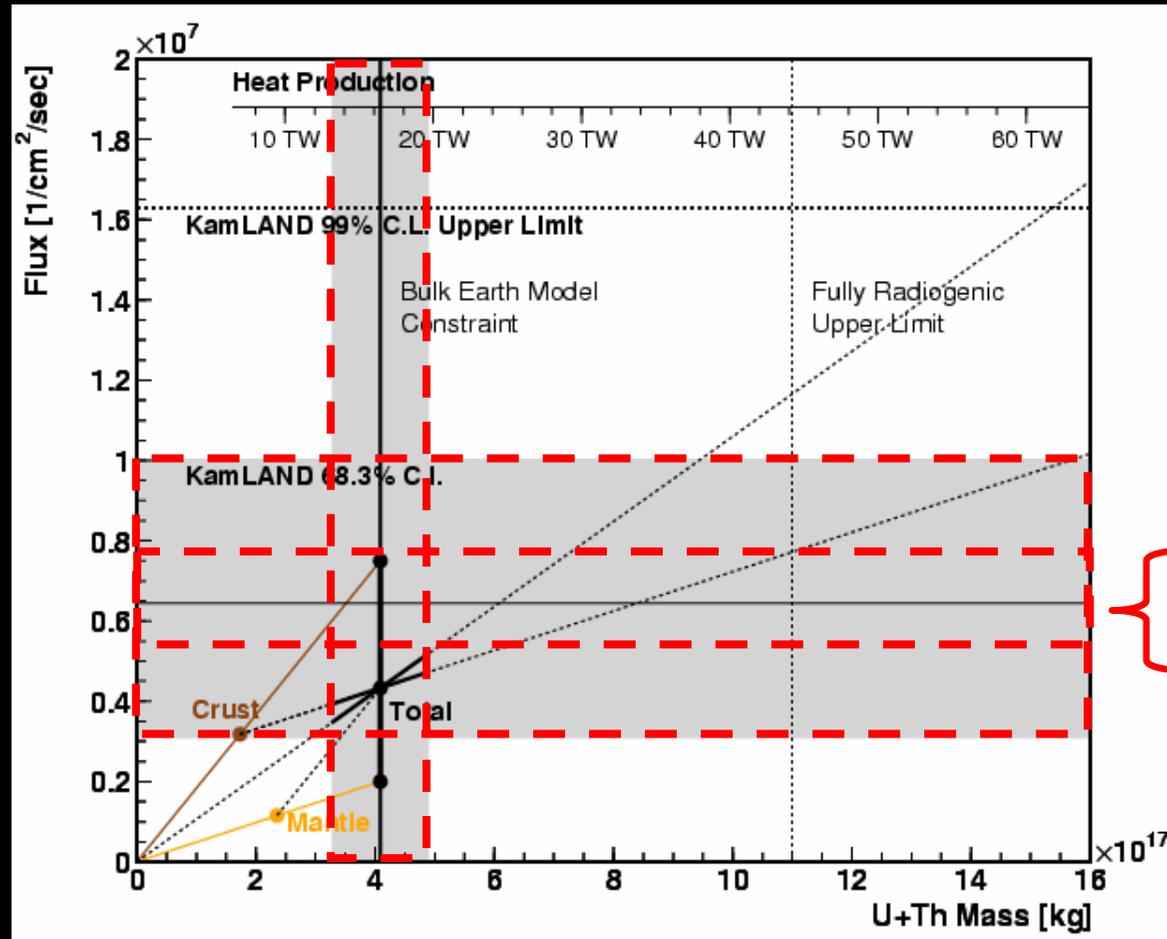
KamLAND  
collaboration, *Phys. Rev.  
Lett.*, 90, 021802, 2003.

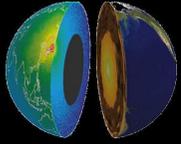
Th. Lasserre 02/04/2007



# Comparaison avec les modèles terrestres

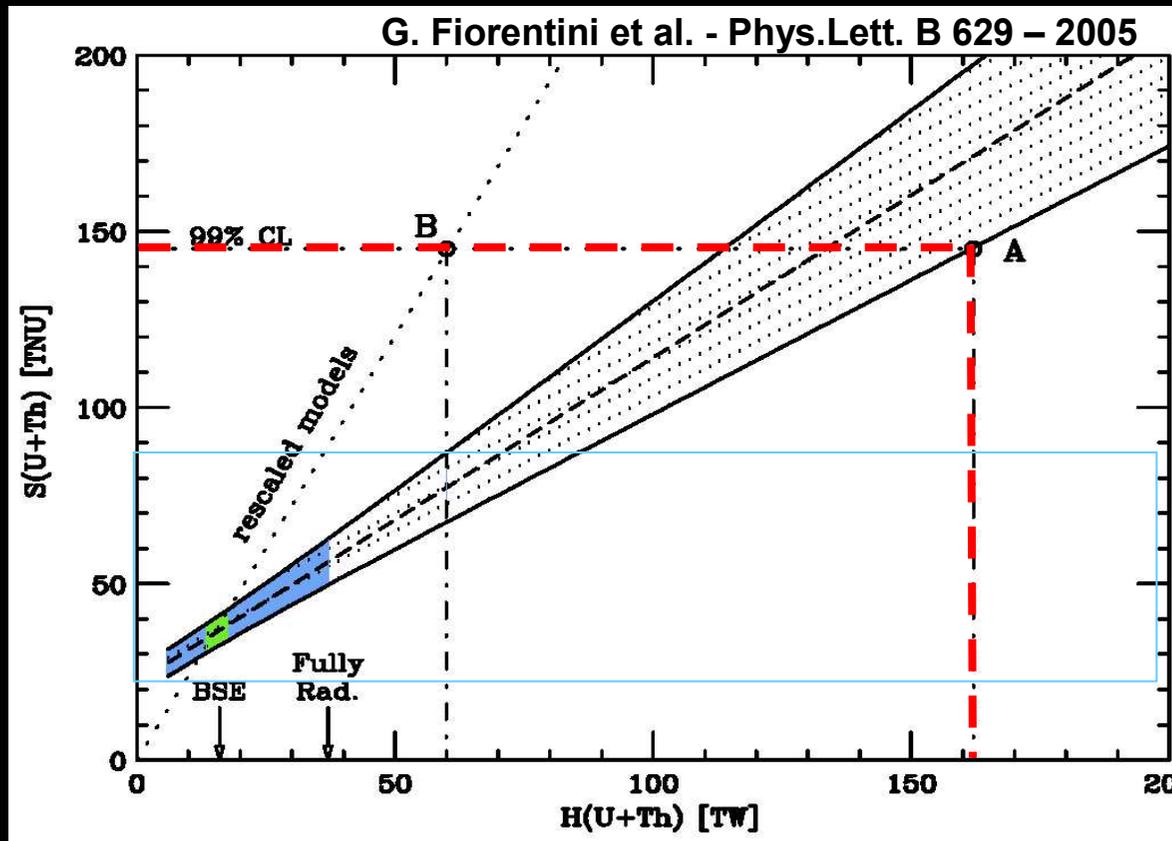
- Résultat de KamLAND compatible avec les modèles terrestres
- Mais limite supérieure à 99% C.L. au delà des contraintes terrestres





# Contraintes sur la source radiogénique

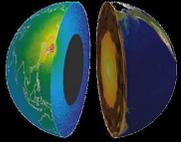
- **Signal KamLAND** :  $S(U + Th) = 57^{+33}_{-31}$  TNU
- **Flux de chaleur radiogénique associé** :  $H(U + Th) = 38^{+35}_{-33}$  TW



- **Compatible avec**
  - **Modèle BSE**
  - **Terre complètement radiogénique**

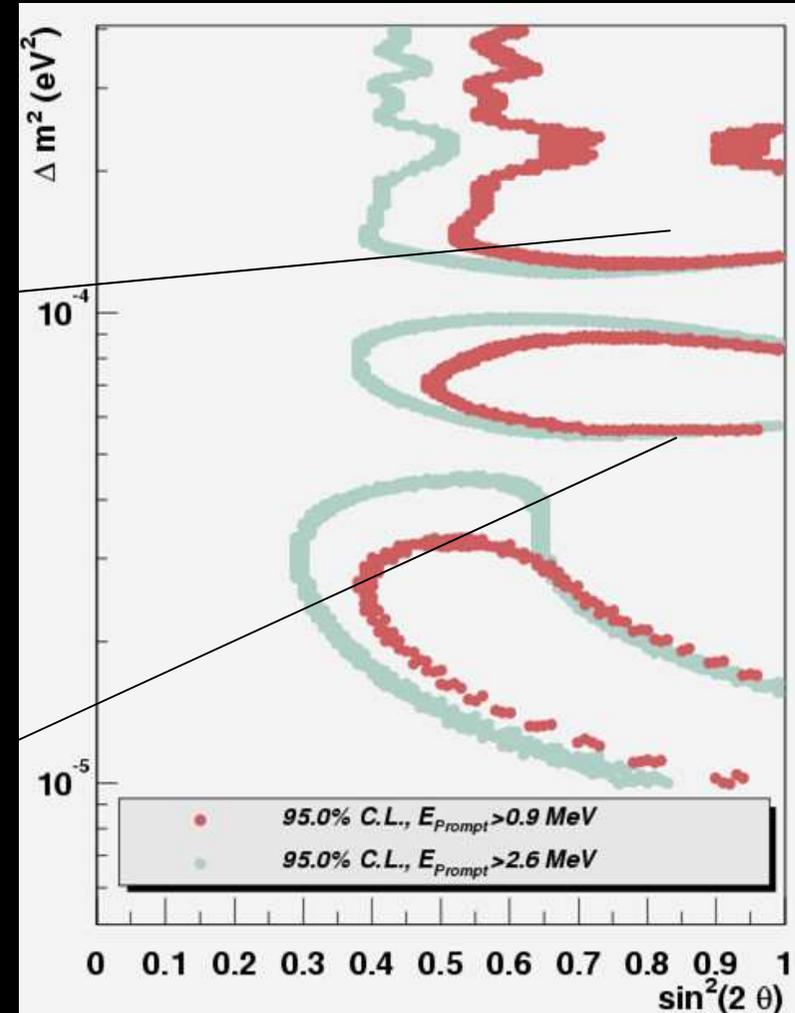
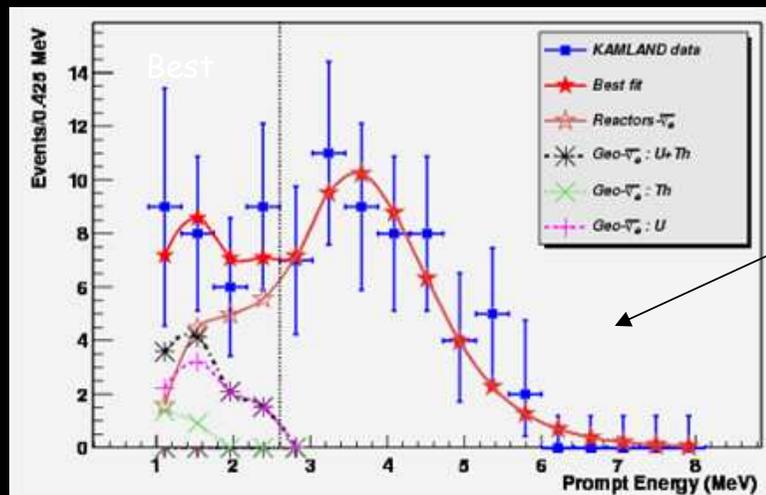
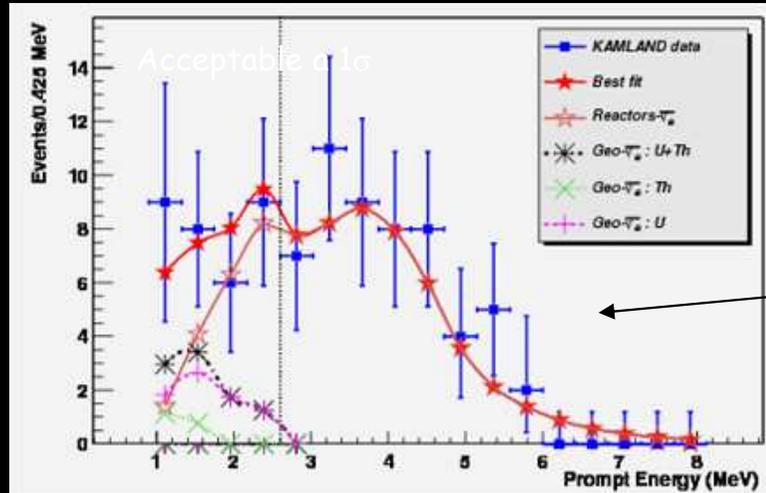
- **Limite supérieure**
  - **99% C.L.**

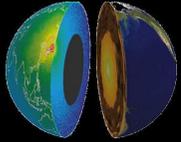
$$H(U + Th) < 160 \text{ TW}$$



# Contraintes les oscillations de neutrinos

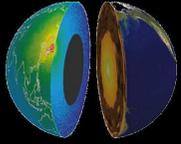
- Analyse de la totalité du spectre des 1<sup>er</sup> données de KamLAND en 2002  $E > 1$  MeV (au lieu de  $E > 2.6$  MeV) → confirmation des résultats



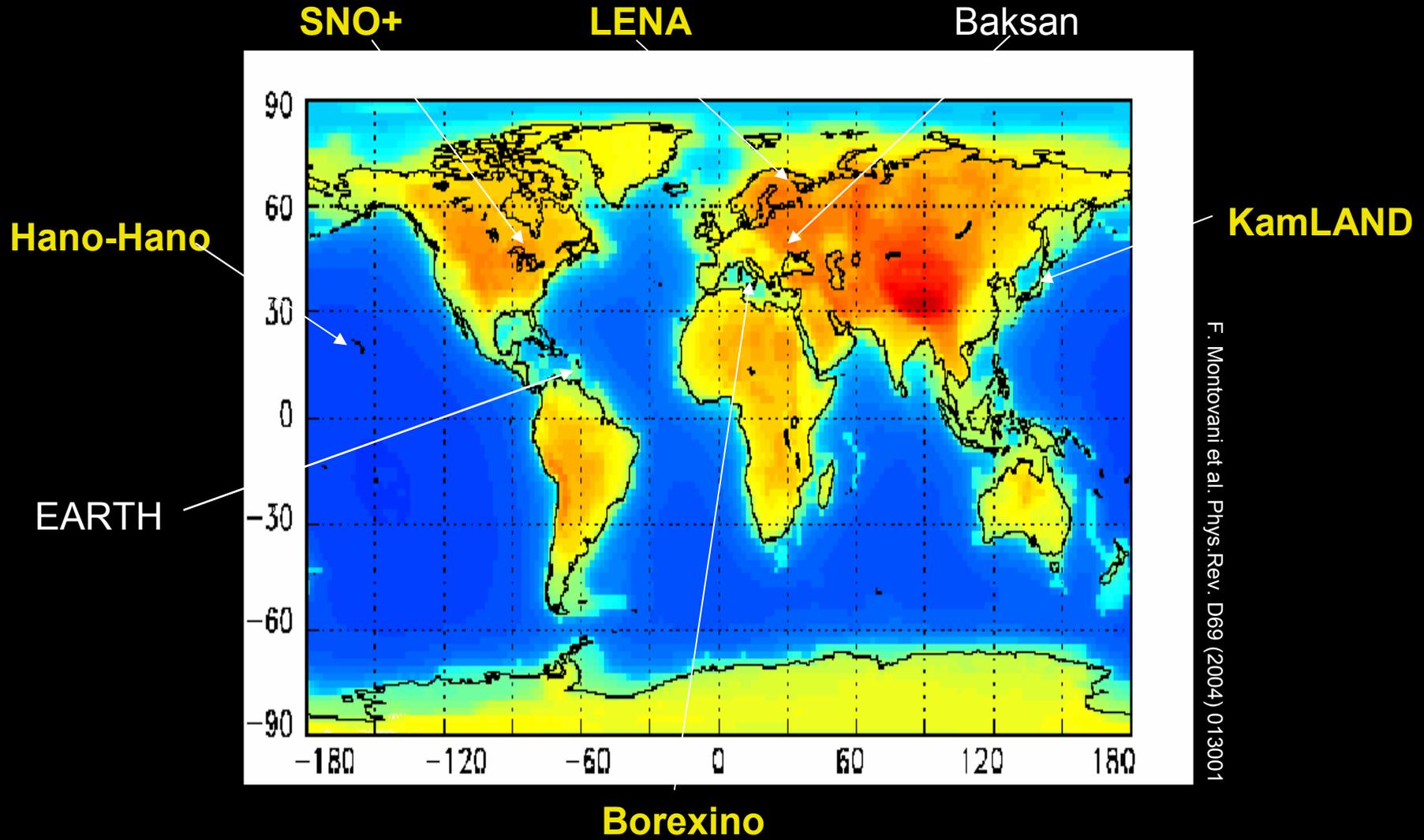


# Objectifs des prochaines expériences

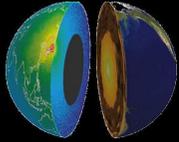
- Démontrer l'existence des géo- $\nu$  à  $3\text{-}\sigma$ 
  - **KamLAND, Borexino**
- Combien d'U/Th dans la croûte
  - **KamLAND, Borexino, SNO+, LENA**
- Combien d'U/Th dans le manteau
  - **Hano-Hano**
- Tester l'hypothèse du géo-réacteur
  - **Hano-Hano**
- Où est le potassium ? Détection des  $(\text{géo-}\nu)_K$ 
  - **?**
- ...



# Localisation des détecteurs



F. Montovani et al. Phys.Rev. D69 (2004) 013001

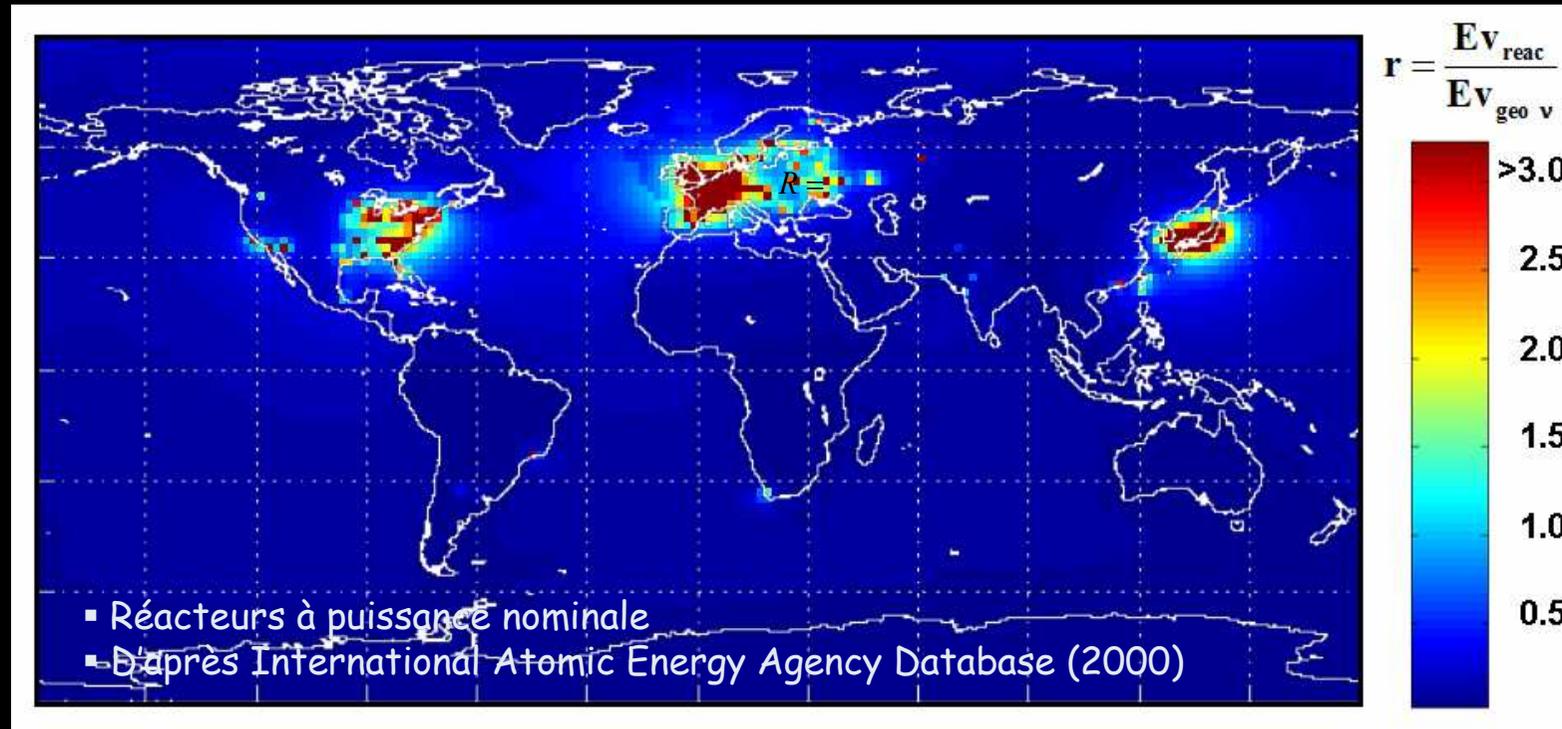


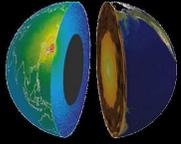
# Bruit de fond « réacteur »

	R
<b>KamLAND</b>	<b>6.7</b>
Sudbury	1.1
Borexino	0.9
LENA	0.5
Baksan	0.2
Homestake	0.2
<b>Hawaii</b>	<b>0.1</b>
Curacao	0.1

$$R (E < 3.4 \text{ MeV}) = \frac{\text{événements réacteurs}}{\text{événements géo-}\nu}$$

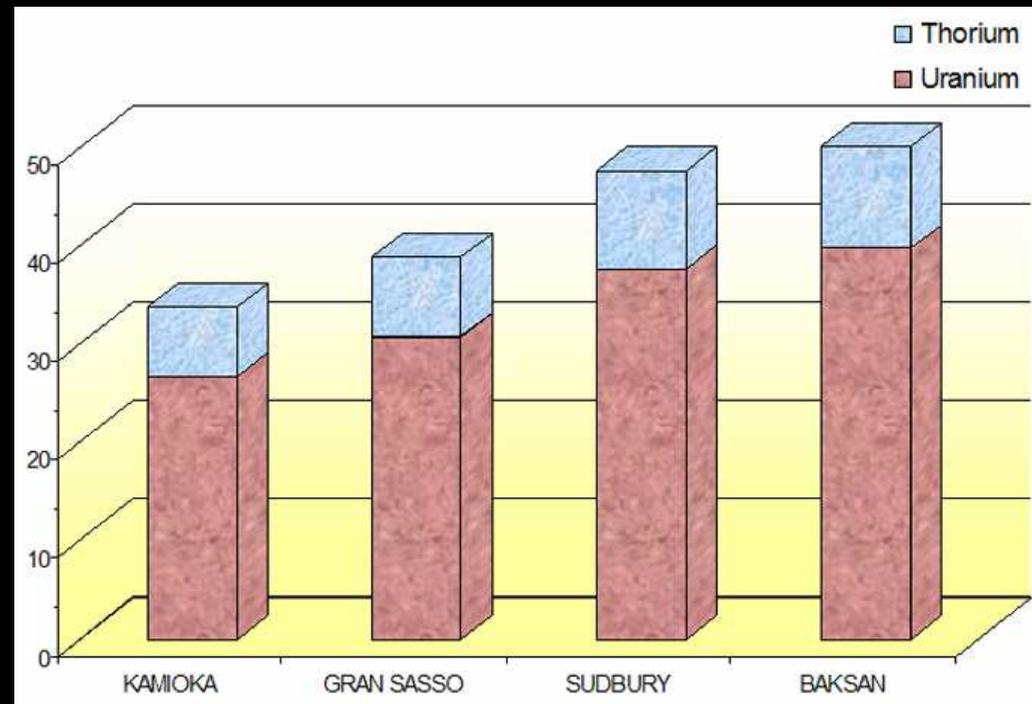
F. Mantovani *et al.*, Phys. Rev. D 69, 013001 (2004).



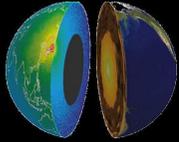


# Les prochaines expériences

- **KamLAND** : confirmation du signal géo- $\nu$  à  $3\text{-}\sigma$  (purification LS)
- **Borexino (Italie)** : masse + faible mais meilleur Signal/Bruit
- **SNO+ (Canada)** : 1 kt de LS  $\sim$ 2010  $\rightarrow$  nouvelle confirmation
- **Hano-Hano (Hawaii)** : 5 kt de LS  $\sim$ 2015 ?  $\rightarrow$  Manteau + géo-réacteur
- **LENA (Finlande)** : 50 kt LS  $\rightarrow$  énorme statistique & site ?

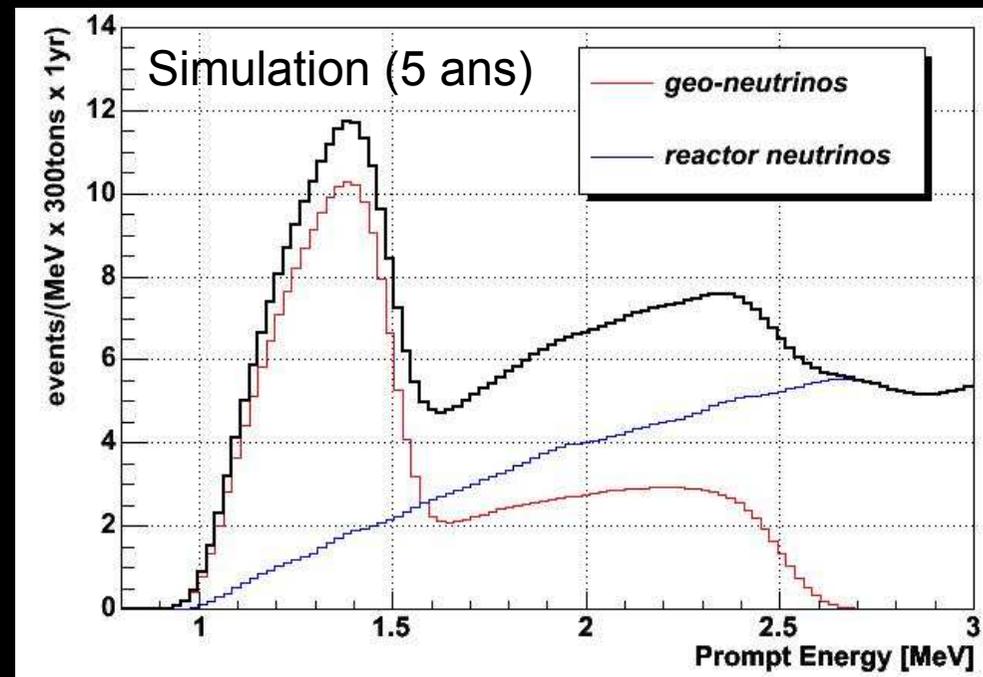
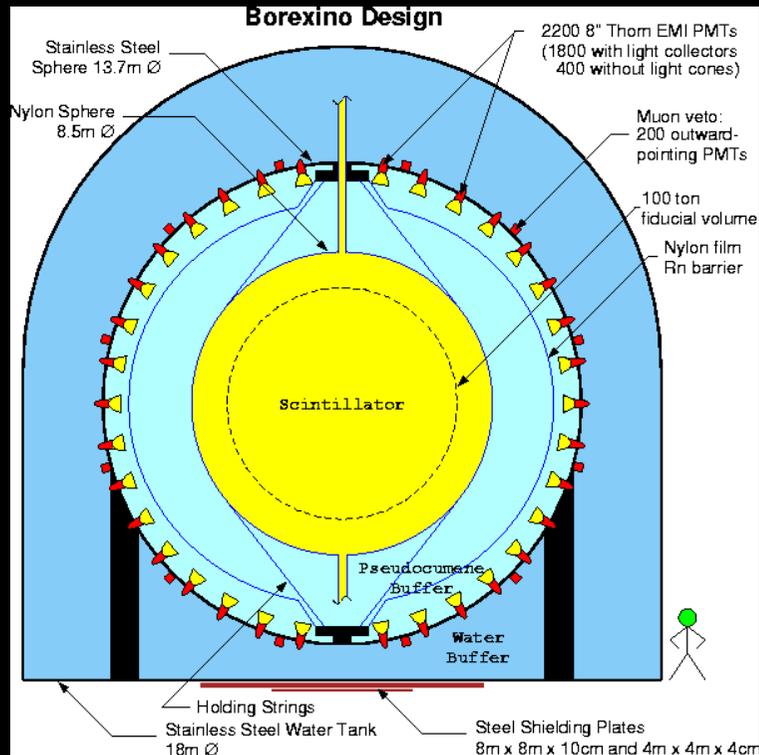


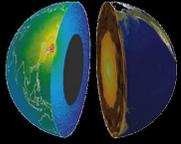
1 TNU = 1 evt / 10<sup>32</sup> H / an



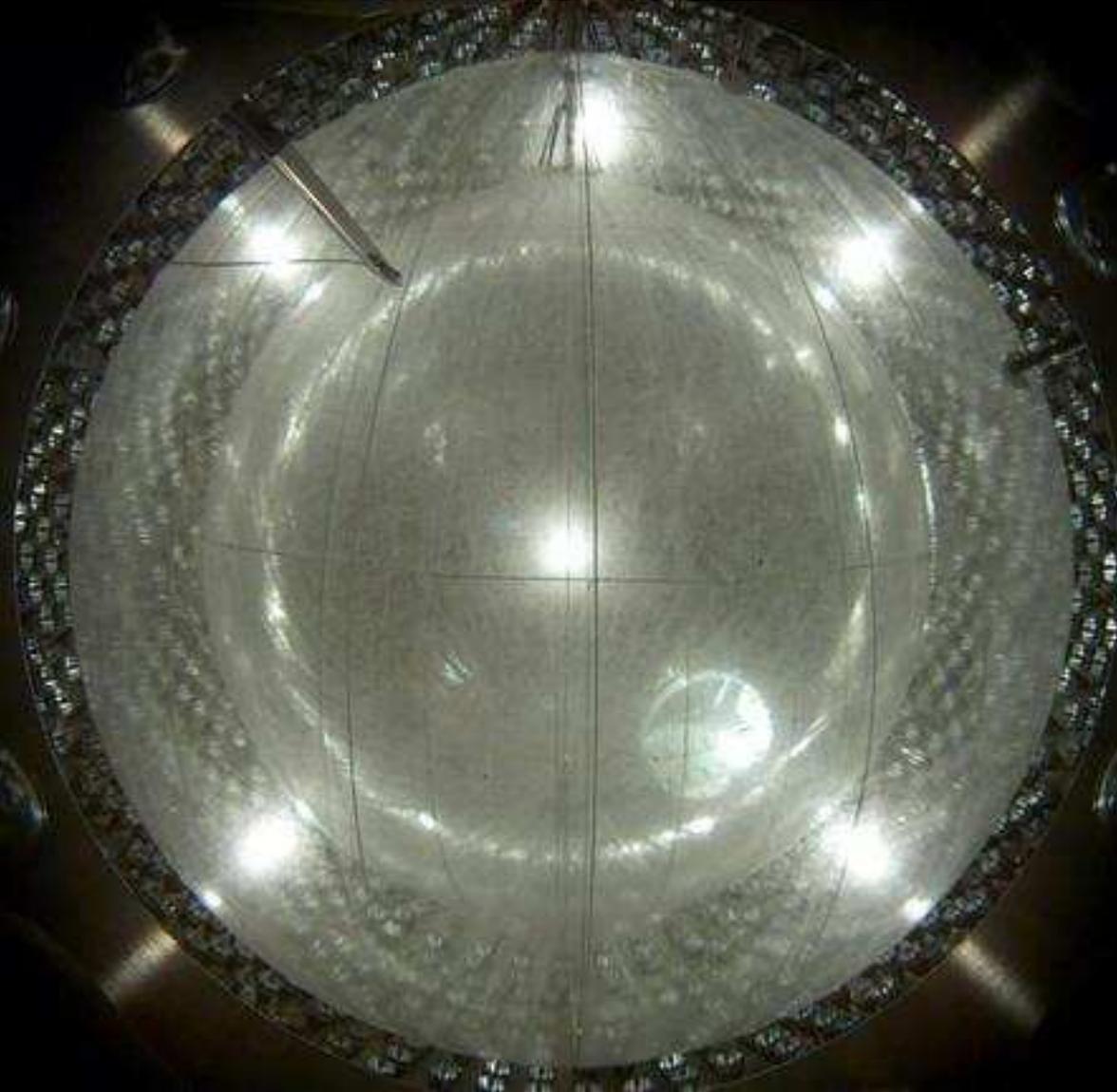
# Borexino

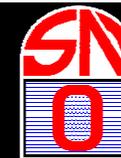
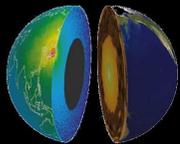
- Laboratoire du Gran Sasso ,
- Réacteurs en France, Suisse, Allemagne,  $\langle L \rangle \sim 800$  km
- 300 tonnes de pseudocumène pur, BDF ( $\alpha, n$ ) négligeables
- $\sim 30$  interactions/an (réacteurs)  $\sim 8$  interaction géo- $\nu$ /an  $\rightarrow R = 0.9$
- Remplissage terminé. En prise de données !!!





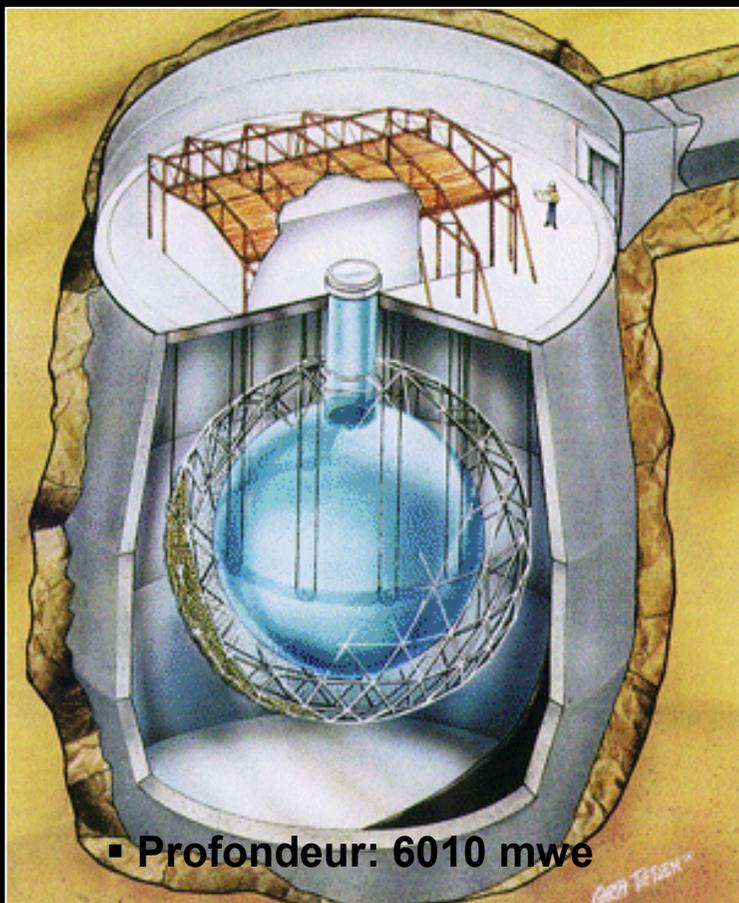
# Borexino: installation voile nylon (2004)



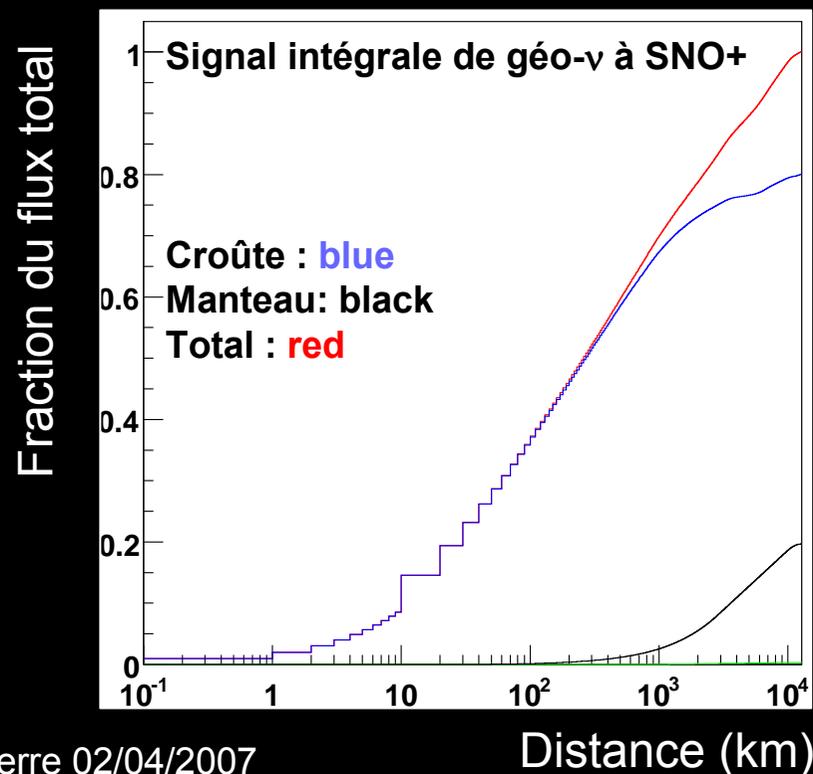


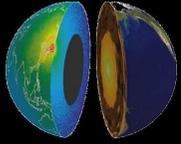
SNO +

- SNO : 1000 tonnes D<sub>2</sub>O
- Enceinte acrylique : 12 m de diamètre.  
Inox 18 m diamètre, 9500 PMTs

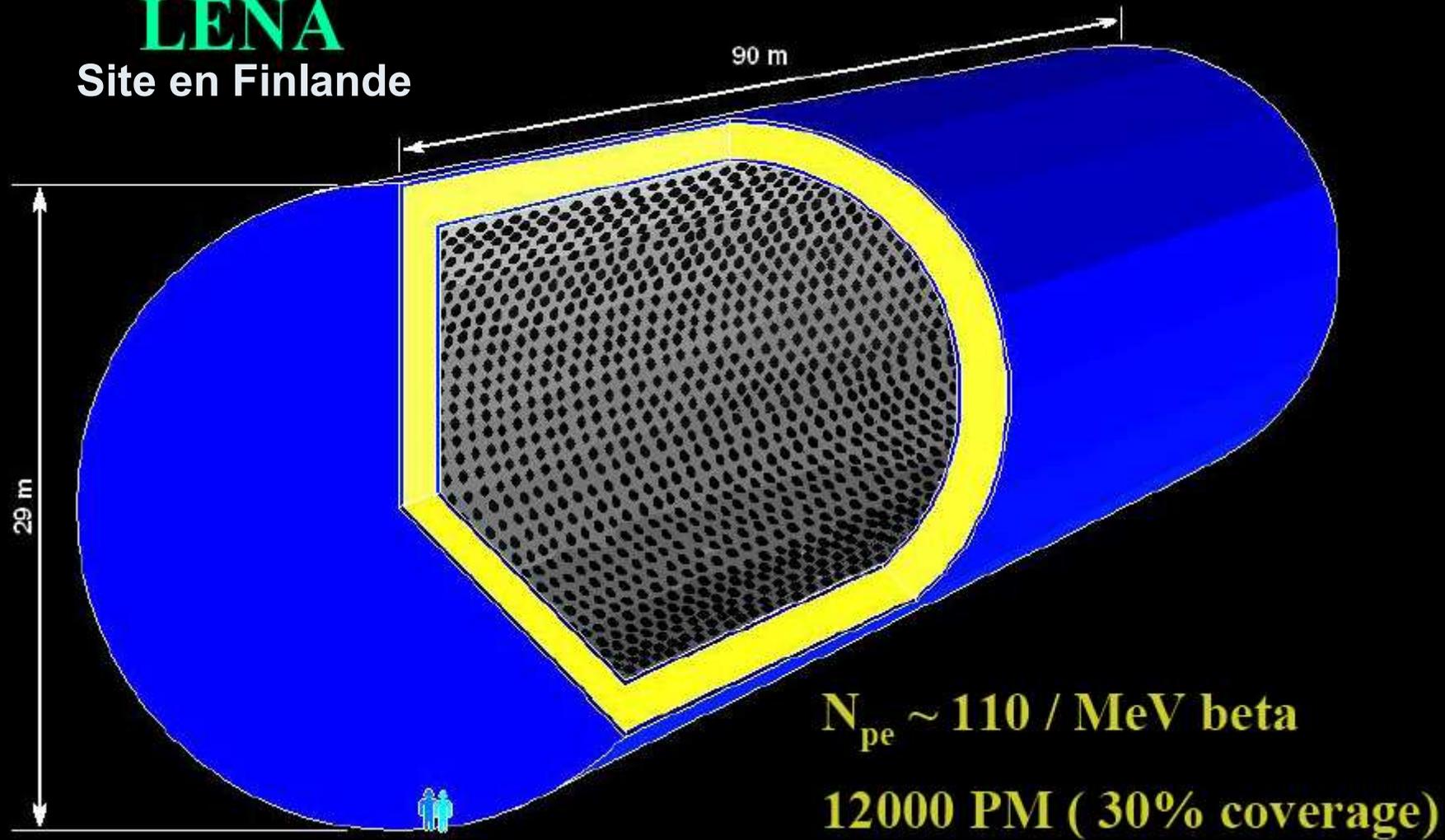


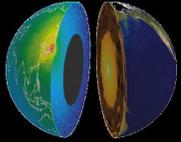
- Remplissage avec liquide scintillant
- 64 géo-ν/an (1000 tonnes CH<sub>2</sub>)
- 87 événements réacteurs
- Configuration géologique simple
  - croûte ancienne épaisse
- Rapport Th/U, contenu croûte ...





## LENA Site en Finlande



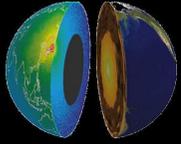


# Mesure futures: intérêt de chaque site

Prédiction BSE [TNU]	Signal (U+Th) de la croûte*	Signal (U+Th) du manteau*	Signal (U+Th) total	$r = \frac{\text{Events}_{\text{reactor}}}{\text{Events}_{\text{geo } \nu}}$	Expérience ou projet
<b>KamLAND</b>	<b>26.4</b>	<b>9.3</b>	<b>35.7</b>	<b>6.7</b>	
<b>Borexino</b>	<b>32.8</b>	<b>9.3</b>	<b>42.1</b>	<b>0.9</b>	
<b>Sudbury</b>	<b>43.3</b>	<b>9.3</b>	<b>52.6</b>	<b>1.1</b>	
<b>Hawaii</b>	<b>3.6</b>	<b>9.3</b>	<b>12.9</b>	<b>0.1</b>	
LENA	44.0	9.3	53.3	0.5	

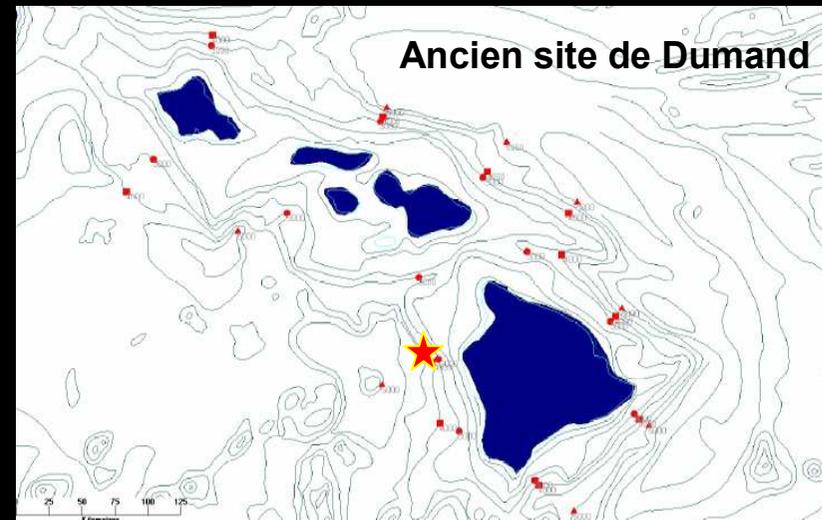
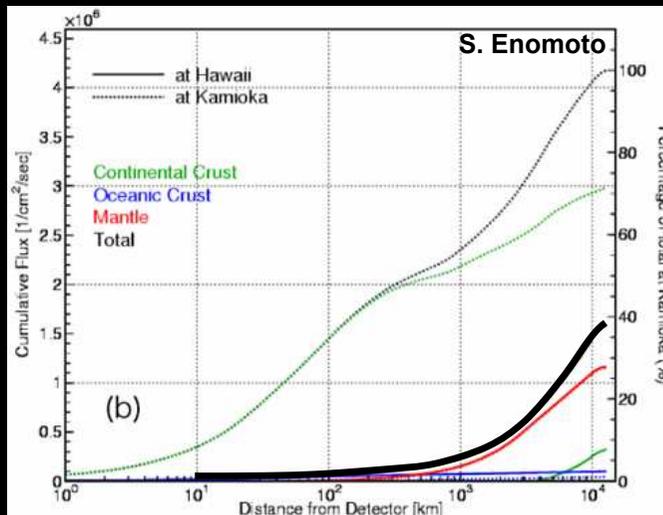
Prédiction BSE [TNU]	Signal (U+Th) de la croûte*	Signal (U+Th) du manteau*	Signal (U+Th) total	$r = \frac{\text{Events}_{\text{reactor}}}{\text{Events}_{\text{geo } \nu}}$	Site
Homestake	43.8	9.3	53.1	0.2	
Baksan	43.3	9.3	52.6	0.2	
Curacao	24.3	9.3	33.6	0.1	

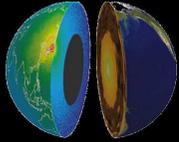
1 TNU = 1 évènement pour  $10^{32}$  protons libres de cible par an



# Hano-Hano : Hawaii Anti-Neutrino Observatory

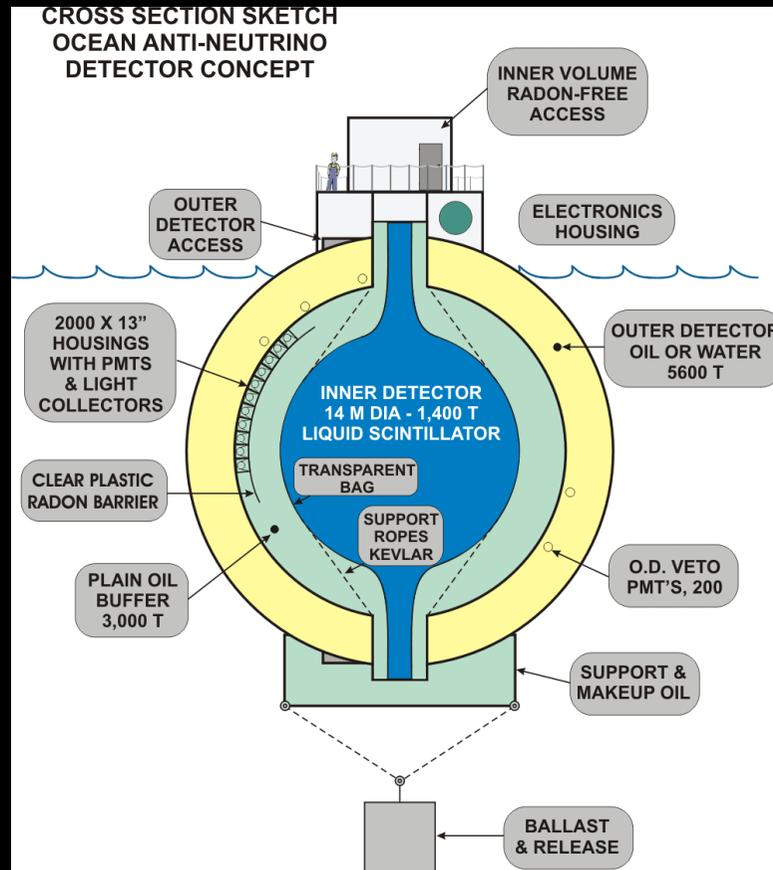
- Détecteur sous-marin (5-10 kt) au large d'Hawaii
- Objectifs :
  - **Mesure des géo- $\nu$  du manteau (U/Th @15%)**
  - **Recherche d'un signal de l'hypothétique « géo-réacteur »**
- Loin des côtes et des pays producteurs d'énergie nucléaire  
→ bruit de fond réacteur négligeable (**R~0.1**)
- Croûte océanique (fine !) → bruit de fond des géo- $\nu$  « croûte » réduit
- Au fond de l'océan pacifique (**4000 mwe**) → bruits de fond réduits





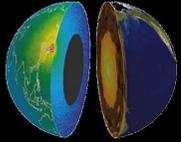
# Hano-Hano

- **Nombre d'évènements prédits :**
  - **Manteau : ~8 evts / 10 kt-an** ( $1.7 < E_\nu(\text{MeV}) < 3.4$ )
  - **Géo-réacteur 1 TW : ~4 evts per 1 kt-an** ( $3.4 < E_\nu(\text{MeV}) < 9.3$ )



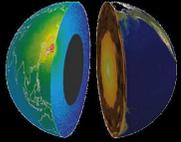
BDF	Evts (1/kt-an)
${}^9\text{Li}$ (2.15 km)	$6.3 \pm 1.2$
${}^9\text{Li}$ (3 km)	$1.6 \pm 0.3$
${}^9\text{Li}$ (4 km)	$0.4 \pm 0.1$
${}^{210}\text{Po}$	$0.7 \pm 0.5$
Fortuites	3.5
Réacteurs	1

R&D financée aux Etats-Unis



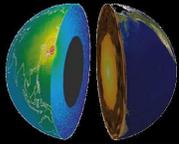
# Résumé des prochaines mesures

- **Borexino** : Bonne mesure de  $(U/Th)_{\text{croûte}}$ , faible R, mais M=300t
- **KamLAND** : fort R, mais expérience pionnière
- Homestake (USA) et Baksan (Russie) ont des bruits de fond « réacteurs » plus faibles
- Pour chacun de ces détecteurs:
  - **80% du signal vient de la croûte** → mesure de  $(U/Th)_{\text{croûte}}$
  - réduction des incertitudes par une cartographie minutieuse de la géologie des sites des expériences neutrinos
- **Hawaii** :
  - **Le plus faible R**
  - **70% du signal en provenance du manteau terrestre**
    - **unique opportunité de sonder la géochimie du manteau !**
  - Mais signal faible → il faut quelques kt de masse cible ...
  - Contraintes sur le **géo-réacteur** ?



# Le géo-réacteur: l'hypothèse

- Il y a 4.5 milliards d'années  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  était assez élevé pour initier et entretenir les réactions de fissions nucléaires
- Un **réacteur nucléaire au centre de la Terre** (n rapides,  $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ )?
  - Proposé par Herndon : J. M. Herndon, Proc. Nat. Acad. Sci. 93, 646 (1996); D. F. Hollenbach and J. M. Herndon, Proc. Nat. Acad. Sci. 98, 11085 (2001)
  - Puissance entre **3 et 10 TW** pendant 3 milliards d'années?
  - Source d'énergie du **champ magnétique terrestre ( $B_{\text{terrestre}}$ )**
  - Explication « naturelle » des **renversements de  $B_{\text{terrestre}}$**
  - Explication du **rapport « anormal »  $^3\text{He}/^4\text{He}$** 
    - Mesures : Hawaii, Islande par rapport à l'atmosphère
    - Mesures 40 fois supérieures aux prédictions BSE (localement) ?
- Théorie **marginale** chez les géophysiciens et les géochimistes !  
*Mais PAS d'argument indéniable pour tuer cette hypothèse*
- **Intérêt des géo- $\nu$  → unique moyen de détection**



# Le géo-réacteur : le modèle

**The Core Dispute** The prevailing theory among geophysicists is that a ball of iron and nickel at Earth's center slowly grows as it releases heat into a fluid core (top diagram). In Herndon's model (bottom diagram), a natural fission reactor composed of uranium and plutonium is surrounded by a nickel-silicon compound known as nickel silicide. Herndon's model also includes some variations in the elements at the core-lower mantle boundary.

**Traditional Model** **Fer**

**INNER CORE**—made of partially crystallized iron or nickel-iron metal

**FLUID CORE**—made of iron, nickel, and one or more light elements, such as sulfur, oxygen, or silicon

**LOWER MANTLE**—made of silicate perovskite, containing oxidized iron

**UPPER MANTLE (simplified)**—made of olivine peridotite

**Nuclear Earth Model** **NiSi<sub>x</sub>**

**INNER CORE**—made of fully crystallized nickel silicide

**FLUID CORE**—made of iron plus sulfur, possibly with some silicon

**LOWER MANTLE**—made of silicate perovskite without oxidized iron

**UPPER MANTLE (simplified)**—made of olivine peridotite

**SUB-SHELL**—made of decay products and fission products

**SUB-CORE**—made of uranium and plutonium

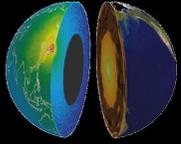
Graphic not to scale

## Modèle BSE :

- **Noyau : chondrites carbonnées;**
  - U & Th sous forme d'oxydes;
  - éléments litophyles ;
  - diffusion dans le manteau et la croûte ;
- Pas de U/Th dans le noyau.

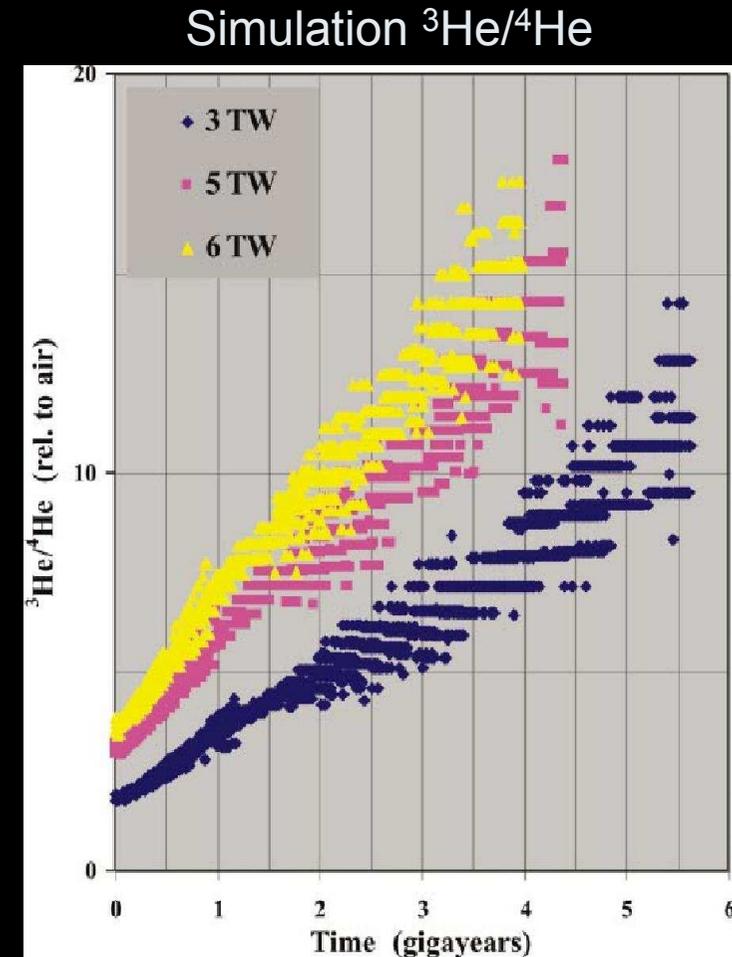
## Modèle de Herndon :

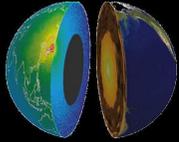
- **Noyau : chondrites enstatites (rares);**
  - U and Th dans des alliages avec Fe ou S ;
  - éléments sidérophiles ;
  - haute densité;
- Diffusion U/Th dans le noyau.



# Le géo-réacteur: fonctionnement

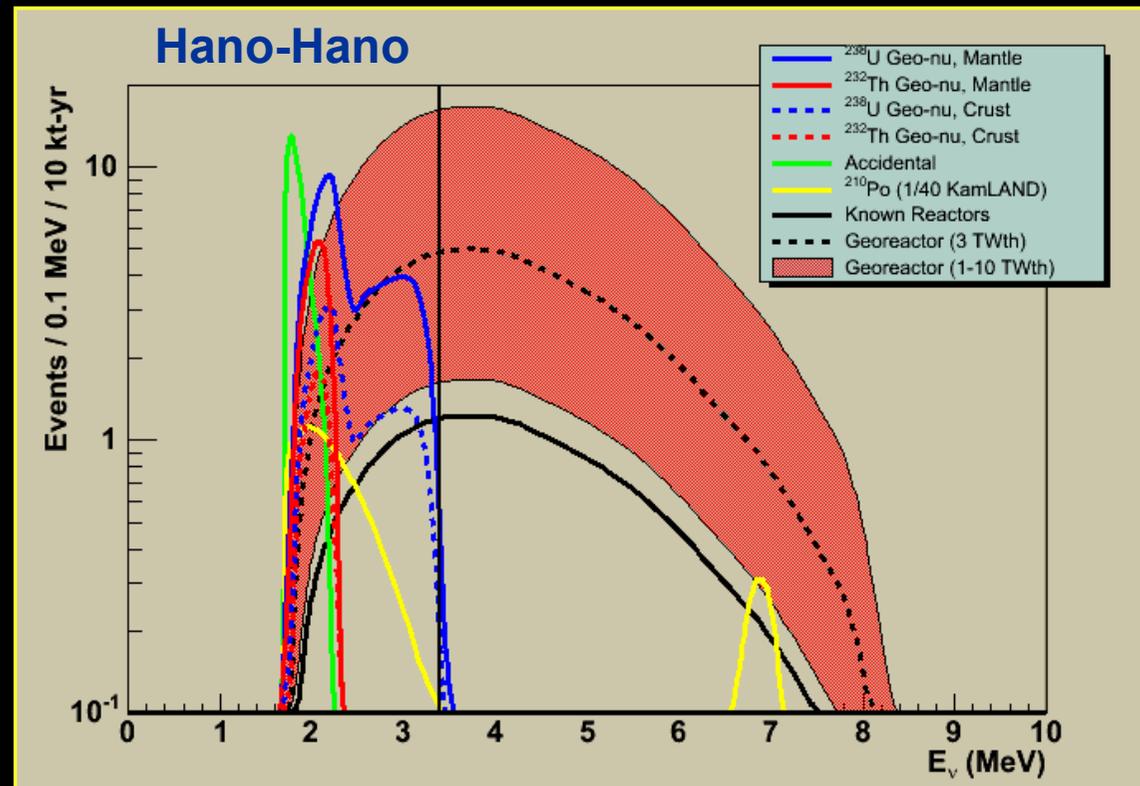
- **Simulation avec le code SCALE (Oak Ridge, Hollenback & Herndon) : démonstration de la possibilité du géo-réacteur**
  - -4.5 10<sup>9</sup> années : <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U assez grand
  - n rapides, Réacteur à <sup>238</sup>U/<sup>232</sup>Th
  - Empoisonnement par produit de fission + diffusion → géomagnétisme variable
  - Puissance 3-10 TW
- **Résultats pertinents sur la production de tritium**
  - <sup>3</sup>H produit par géo-réacteur
  - $\sigma(T,n)$  faible, forte mobilité
  - Désintégration en <sup>3</sup>He
  - Survie en region pauvre en neutrons
  - Rapports <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He en accords avec les mesures d'Hawaii et d'Islande

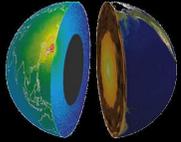




# Le géo-réacteur: signal $\nu$

- Signal géo-réacteur  $\rightarrow$  similaire aux neutrinos de réacteurs nucléaires
- Puissance & composition isotopique inconnues (1-10 TW)
- Fenêtre en énergie :  $E_\nu > 3.4 \text{ MeV}$
- Signal attendu pour 10 kt.an : 38 géo- $\nu$  / TW (bdf estimé à :  $30 \pm 2$ )
- Sensibilité limite  $P > 0.5 \text{ TW}$  @95% C.L



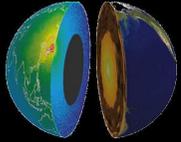


# Les géo-neutrinos du potassium

- Modèle BSE :  $^{40}\text{K}$  → 16% de la chaleur radiogénique
- Mais varie beaucoup avec les modèles
- 3<sup>ème</sup> radioisotope après  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$
- $^{40}\text{K}$  → flux de géo- $\nu$  le plus important !
- Questions ouvertes (géochimie) :
  - Présence de **K dans le noyau** (V. Rama Murthy) ?
  - Les mesures de la croûte montrent une **déplétion d'un facteur 7 en K** par rapport aux chondrites carbonées  
→ Où est le potassium ? Quelle quantité ?

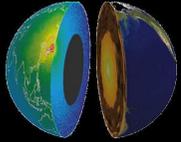
**Intêret fondamental de la mesure des géo- $\nu$  du  $^{40}\text{K}$**





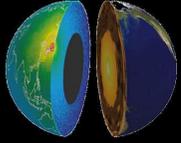
# Détection des $\nu$ du $^{40}\text{K}$

- Détection difficile !
- **anti- $\nu_e$** 
  - $(5-15) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  for the anti- $\nu_e$
  - **$E=1.311 \text{ MeV}$**  < seuil de la désintégration  $\beta$ -inverse ...
- $\nu_e$ 
  - $(5-15) \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  for the 44 keV  $\nu_e \rightarrow$  on oublie ...
  - $(2-6) \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  for the 1.5 MeV  $\nu_e \rightarrow$  **noyé dans le flux de  $\nu$  solaires pep** à 1.44 MeV :  $1.42 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Techniques de détection
  - Diffusion élastique  $\rightarrow$  difficile à cause du flux solaire
  - **Rechercher une réaction CC favorable ?**
  - Diffusion cohérente ?



# Les géo-neutrinos du potassium

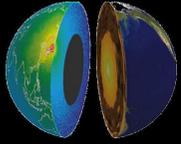
- **Réaction  $\beta$ -inverse avec  $Q_\beta < 1.311 - 2 m_e = 0.289 \text{ MeV}$**
- **Cas intéressant (M. Chen, 2005) :  $^{106}\text{Cd}$** 
  - Abondance isotopique 1.25% (un peu faible ...)
  - Transition permise  $0^+ \rightarrow 1^+$  vers  $^{106}\text{Ag}$  (fondamental)
  - $Q_\beta = 194 \text{ keV}$ 
    - émission d'un  $e^+$  (1.02-1.12 MeV) suivi par une capture électronique &  $\beta^+$  à  $t_{1/2}=24 \text{ min}$   
→ Émission d'un 2<sup>ème</sup>  $e^+$  (2 MeV dans 50% des cas)
- **Détection directe envisageable par la recherche d'un **double signal positron****
  - Masse d'isotope de  $^{106}\text{Cd}$  importante → enrichissement de cristaux scintillants de  $\text{CdWO}_4$
  - 1-10 événements / kt / an ...
  - Appauvrissement en  $^{113}\text{Cd}$  ( $\beta$ ) et  $^{116}\text{Cd}$  ( $\beta\beta$ )



# Conclusions

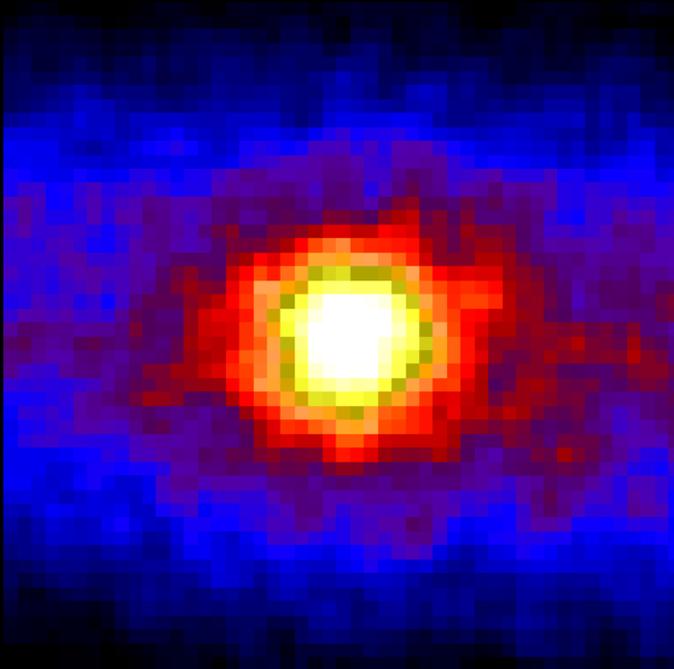
- **Il reste des points ouverts fondamentaux en géochimie**
  - **Modèles de formation de la Terre**
  - **Chaleur interne terrestre : origine ? Bilan quantitatif ?**
  - **Abondance U/Th dans le manteau / noyau ?**
  - **Abondance & localisation du K**
    - **K dans le cœur**
    - **Déplétion dans la croûte**
  - **Géo-réacteur: Champs magnétique terrestre,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ?**

**Un détecteur efficace et massif de géo-neutrinos loin des centrales nucléaires est en mesure d'adresser quantitativement ces questions**



# Soleil et Terre vues en neutrinos ...

Passé ...



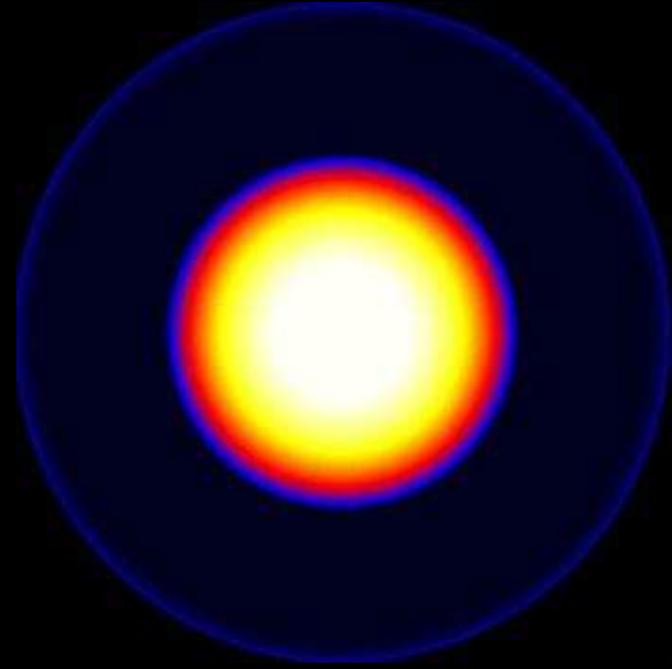
## SOLEIL

Superkamiokande,

1500 jours de pose

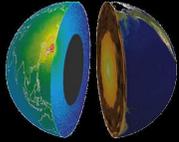
## Versus

Futur ?



## TERRE

K.A. Hochmuth



# Conférence AAP 2007

## Workshop Applied Antineutrino Physics 2007

December 13-14, 2007

APC Laboratory, Paris, France

<http://www.apc.univ-paris7.fr/>

Contacts: M. Cribier & Th. Lasserre



### Colloques précédents sur le même thème :

- AAP 2004: Neutrinos and arms control workshop, Honolulu, USA, 5-7 February 2004  
- <http://www.phys.hawaii.edu/~jgl/nacw/>
- AAP 2005: Neutrino Geophysics, Honolulu, USA, December 14-16, 2005  
- <http://www.phys.hawaii.edu/~sdye/hnsc.html>
- AAP 2006: Applied Antineutrino Physics Workshop, LLNL, USA, September 24-26, 2006  
- <http://www.llnl.gov/neutrinos/workshop/aap2006.html>