

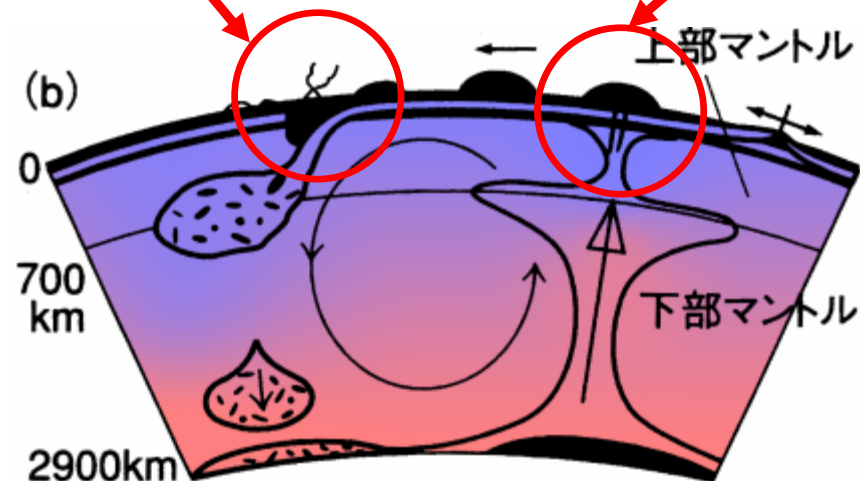
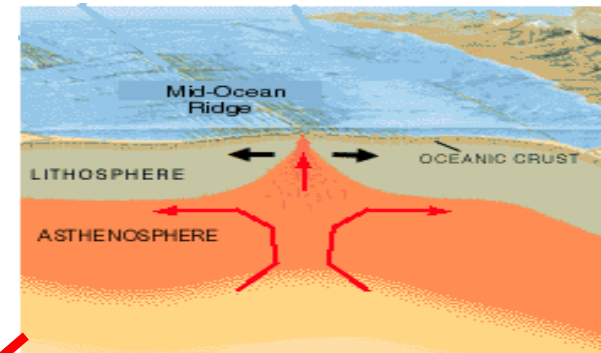
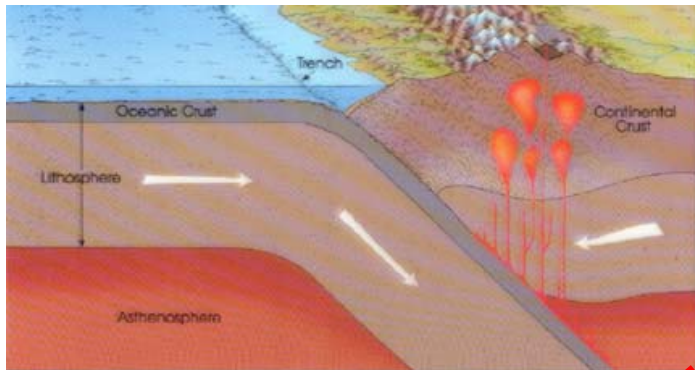
地球ニュートリノ観測の今後

1. ニュートリノで何が分かるか
2. 計画中の地球ニュートリノ実験
3. 将来の夢と課題
4. まとめ

東北大学ニュートリノ科学研究センター
榎本 三四郎

予備知識

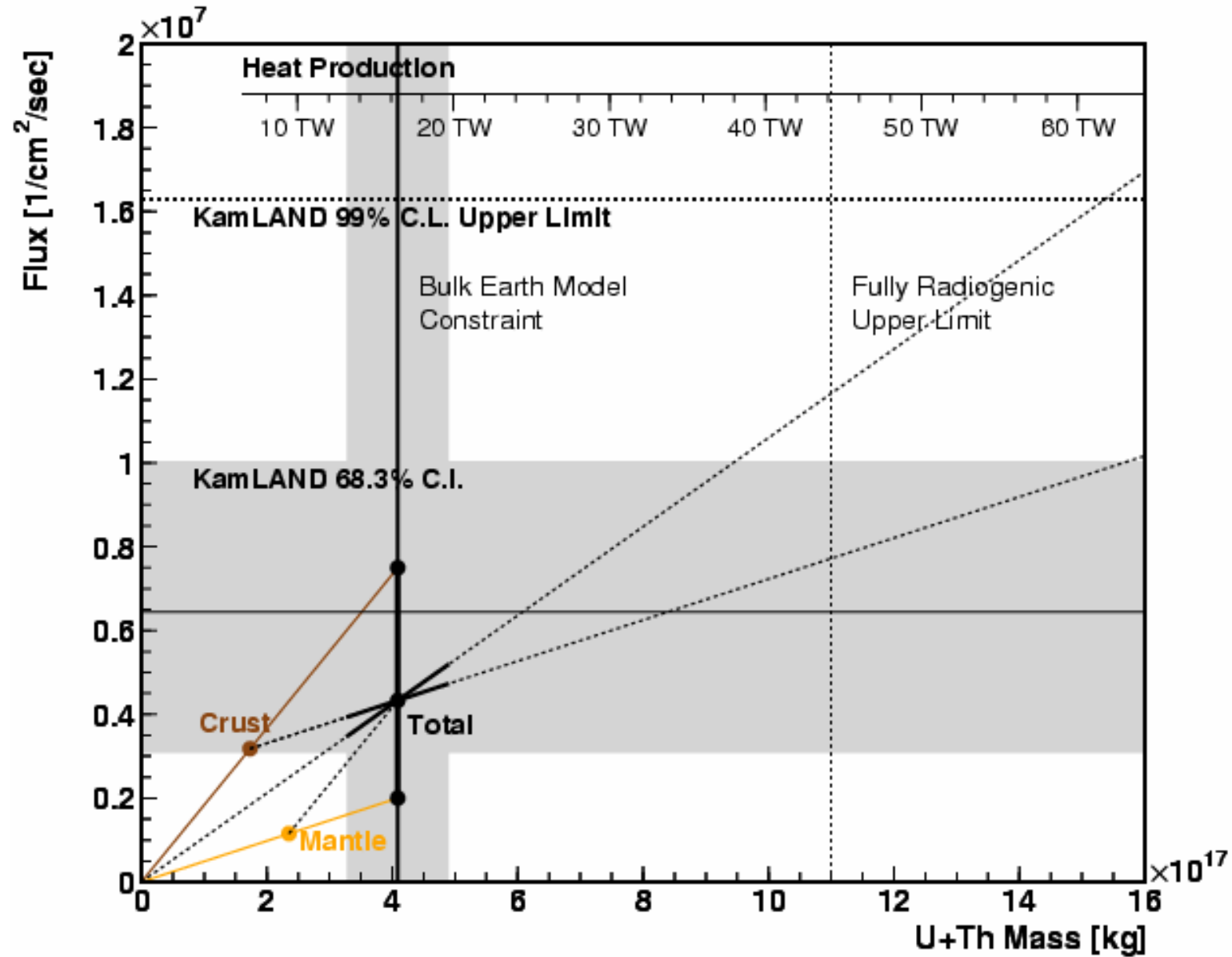
- UやThはイオン半径が大きく、高密度結晶にとりこまれにくい
- 海洋地殻は海嶺でマンツルの部分熔解で生成される
- 大陸地殻は海洋地殻の沈み込みによる部分熔解で成長する
- 大陸地殻には全地球の半分のUとThが含まれている
- コアにはUやThはたぶんほとんど含まれていない



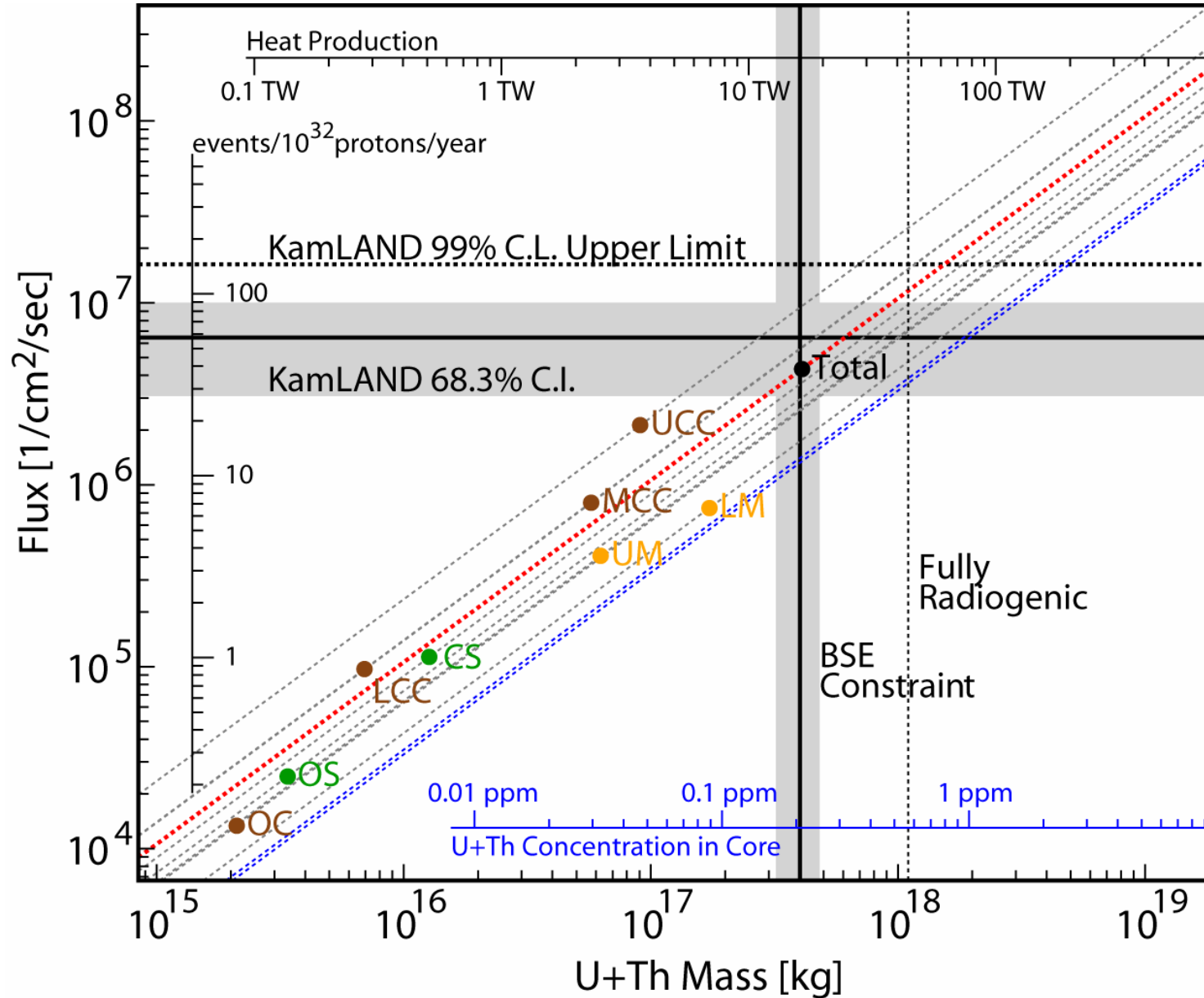
ニュートリノによる地球科学

- “ニュートリノは地球深部の情報を直接伝える”
 - ✓ BSE モデルに対する独立なテスト
 - ✓ 熱収支の決定, ダイナミクスの理解
 - ✓ マントルモデルの決定 (均質・分化, CMB, ...)
 - ✓ 地殻組成の理解
 - ✓ 深部化学組成, 地球トモグラフィ
 - ✓ ...
- ニュートリノだけを観測してれば全て分かるか？
- 何をすれば何が分かるか？

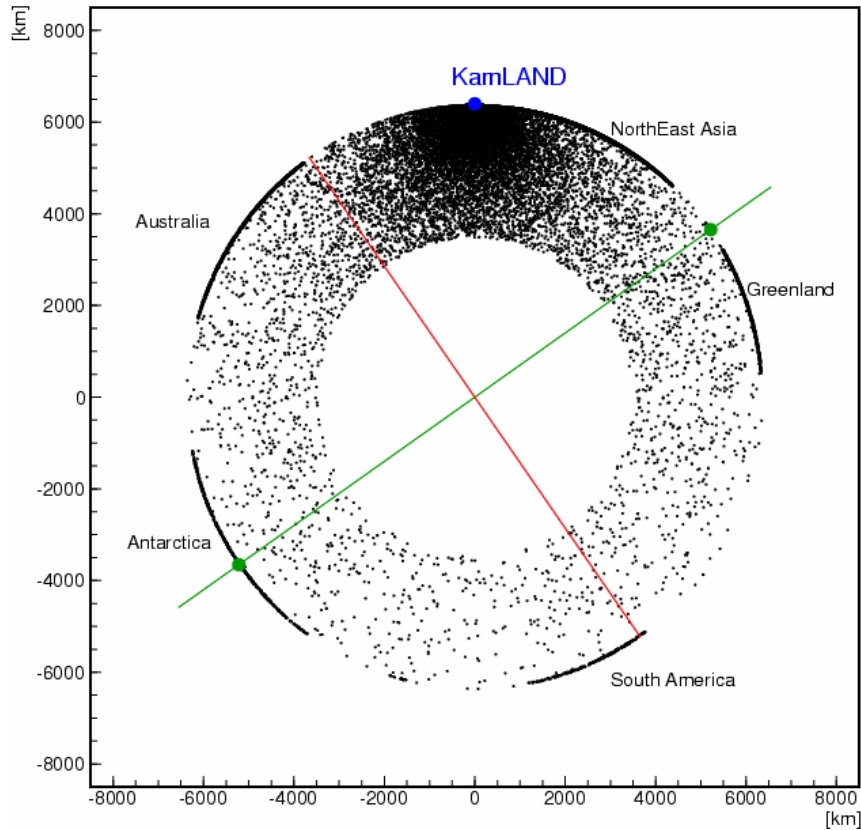
KamLAND における地球ニュートリノ観測



KamLAND における地球ニュートリノ観測 2

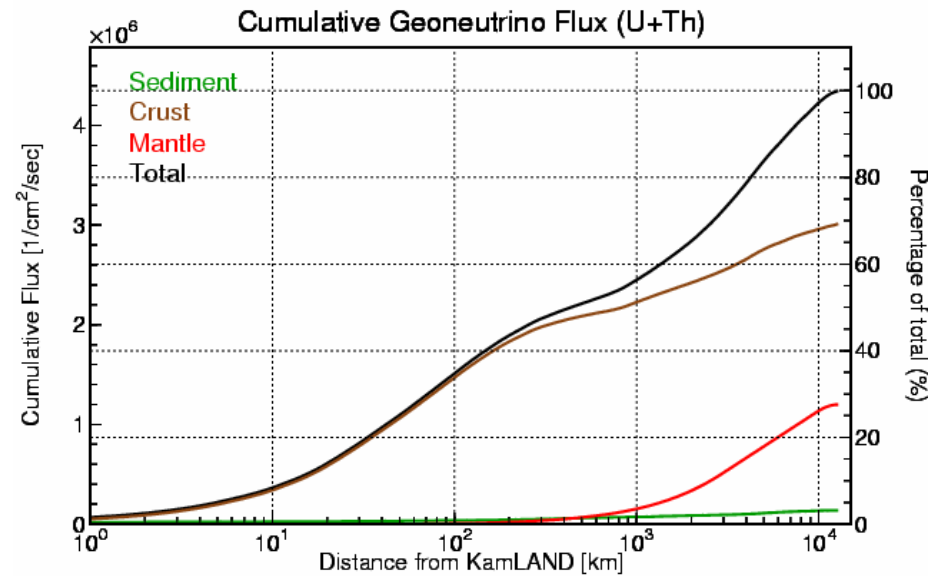


KamLAND は何を見ているか



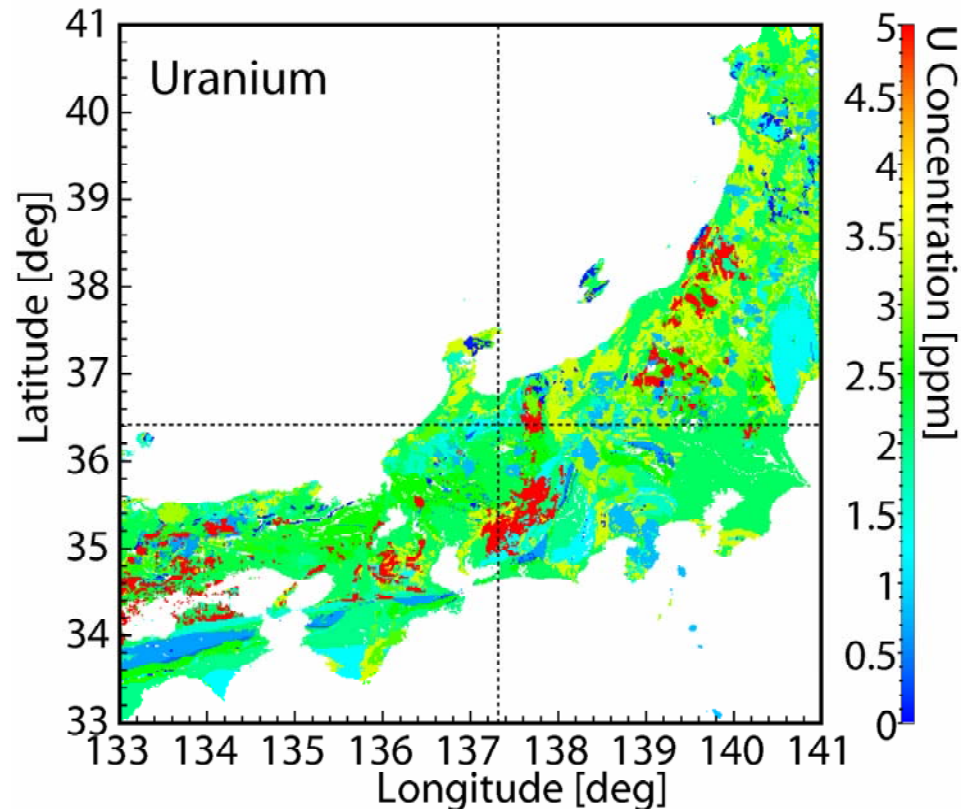
- 75%は大陸地殻起源
- 50%は半径 500km から

半径500kmをおさえれば
全地球物理ができる？



“近距離地質の影響は10%以下”

近距離地質と全地球物理



日本列島の U/Th 分布は分からない



- 地質図で空間スケールを調べる
- 岩石標本で濃度変化の度合いを知る
- 現実的な地質スケールでフラックス変化のスケールを調べる



全フラックスに 7% 程度の影響

- 半径 500km からのフラックスを正確に見積もっているわけではない
- 地殻を理解してマントルを議論しているわけでもない
- 「日本周辺の地殻」と「日本周辺のマントル」を仮定した全地球物理

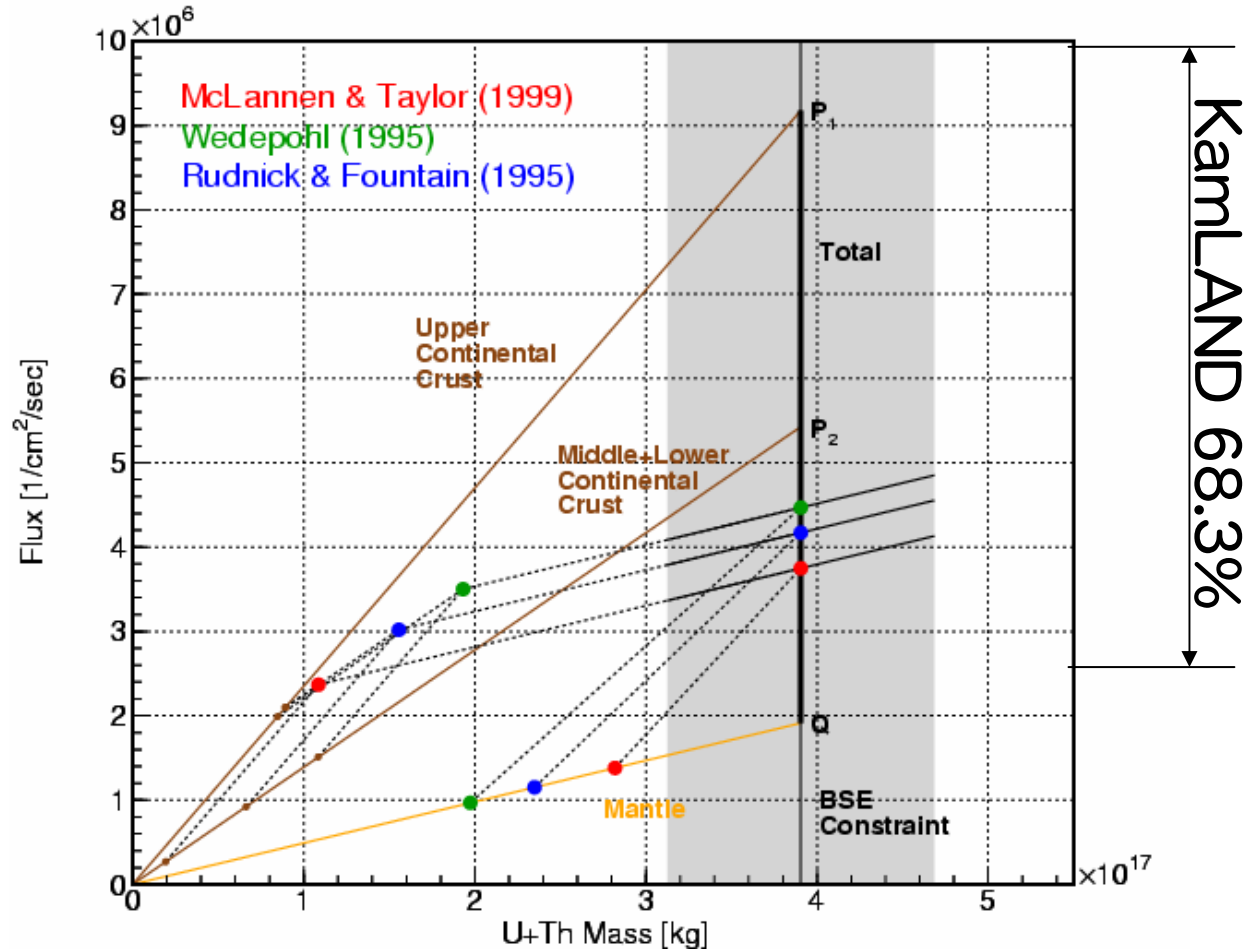
大陸地殻組成モデル

“手が届く”大陸地殻も，組成は良く分かっていない
 (表層と深部の差，サンプリングバイアス等の理由による)

	計算モデル	U/Th 濃度 [ppm]		
		上部地殻	中部地殻	下部地殻
McLennan&Taylor (1999)	Tectonic	2.8/10.7	0.28/1.06	
		0.91/3.5		
Wedepohl (1995)	Seismic	2.5/10.3	0.93/6.6	
		1.7/8.5		
Rudnick&Fountain (1995)	McLennan Seismic	(2.8/10.7)	1.6/6.1	0.2/1.2
		1.42/6.5		
Condie (1993)	Geologic	2.2/8.6	-	-
		-		

- Tectonic Model: 地殻生成のモデルを仮定して組成を推定
- Geologic Model: 大規模広範囲の岩石サンプリングによる
- Seismic Model: 地震波測定値にもとづき組成を推定

大陸組成モデルとニュートリノフラックス



- 大陸地殻は、U / Th のおよそ半分を含む
- 大陸地殻を理解することは、マントルや全地球組成(BSE)を理解するのと同様に重要

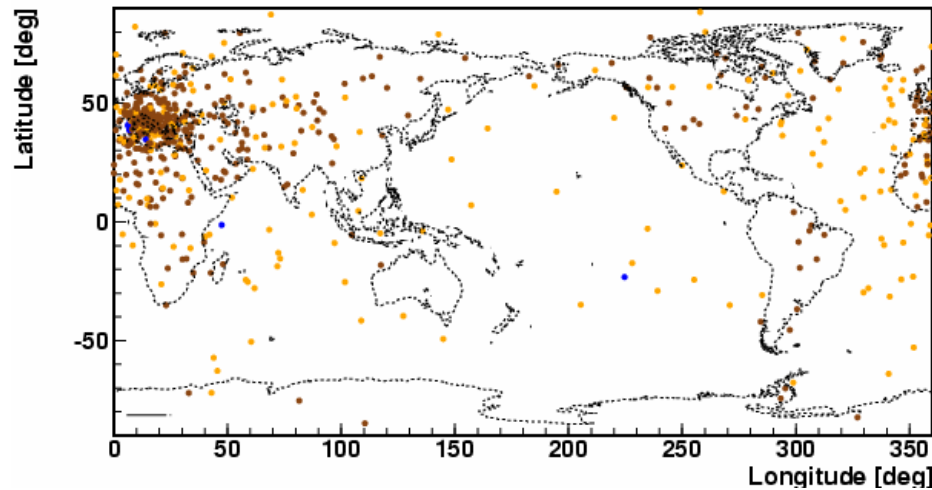
Borexino と SNO では

観測されるニュートリノの発生点分布 (MC)

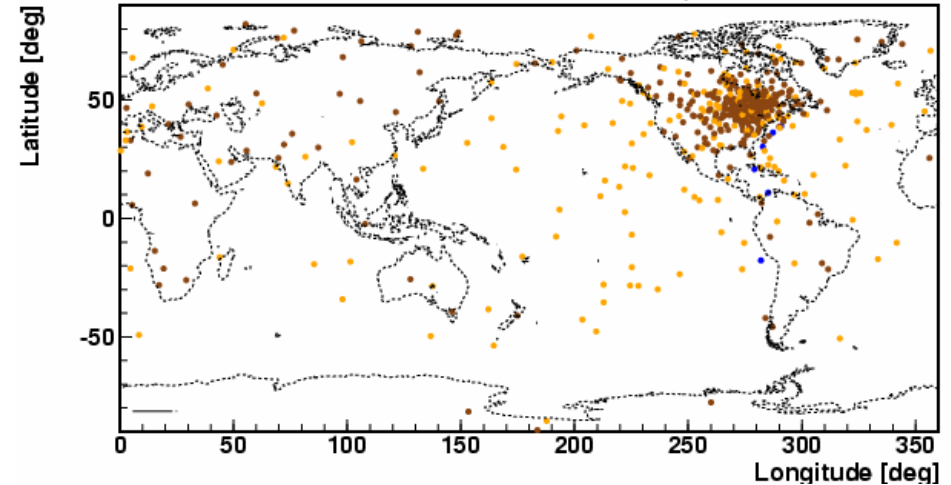
大陸地殻起源

マントル起源

Borexino @ Gran Sasso



SNO+ @ Sudbury

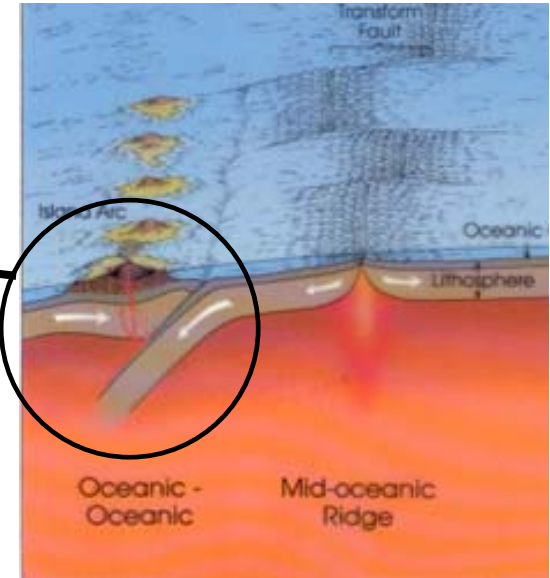
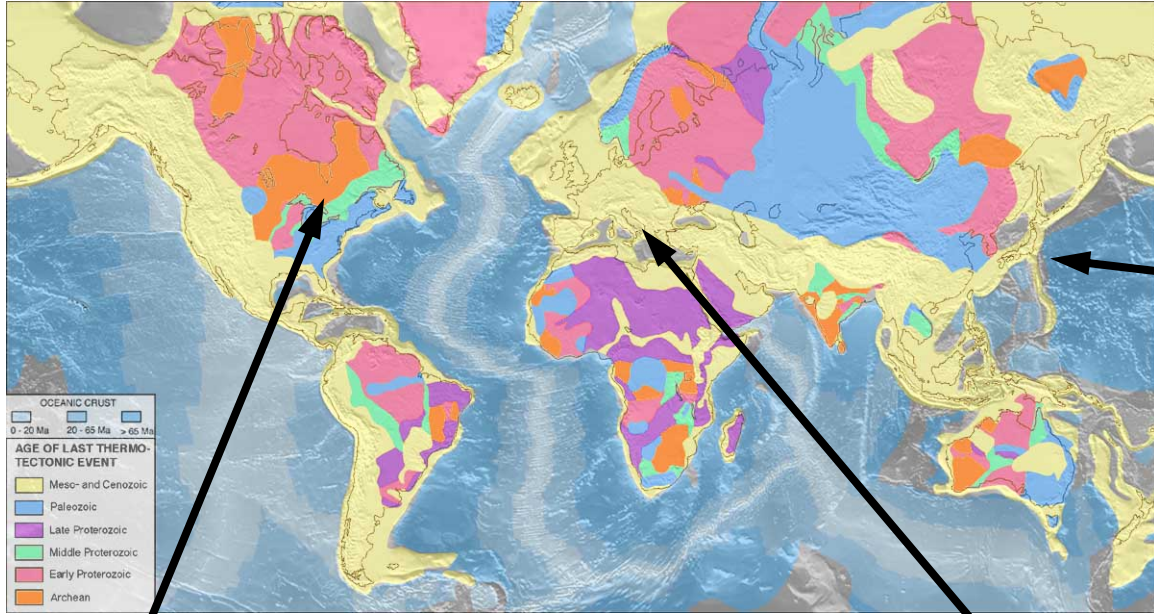


- フラックスの80%は大陸地殻由来
- 地球ニュートリノは半径 $\sim 500\text{km}$ を平均化する

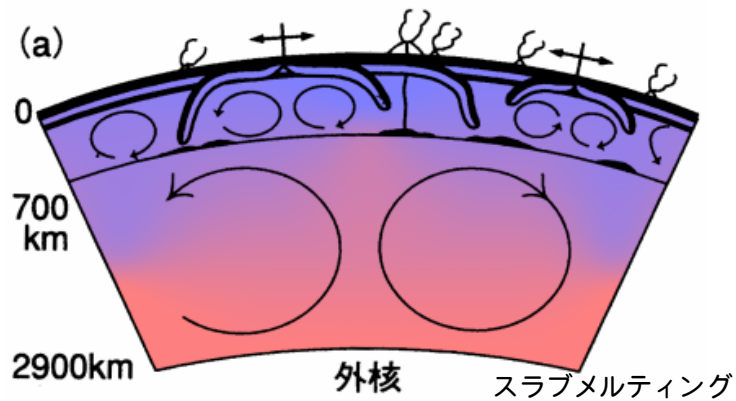


バイアス (サンプリング, 縦方向) を受けない地殻平均組成

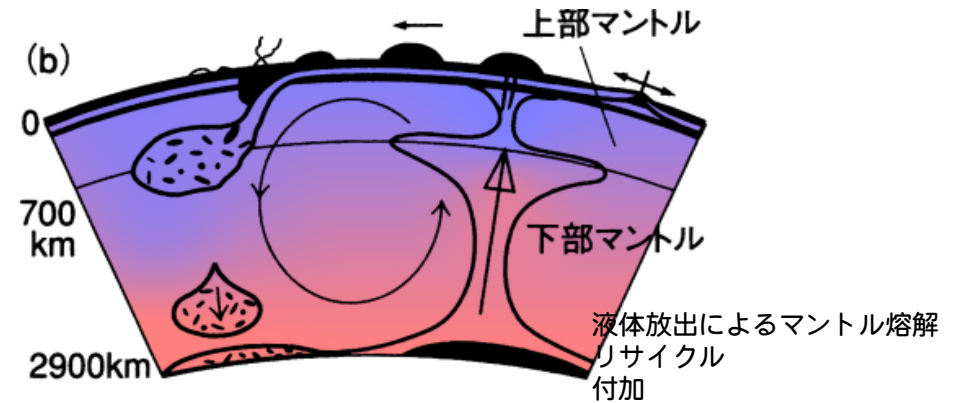
続・大陸地殻組成



昔(原生代)のマンテル対流???



最近のマンテル対流???

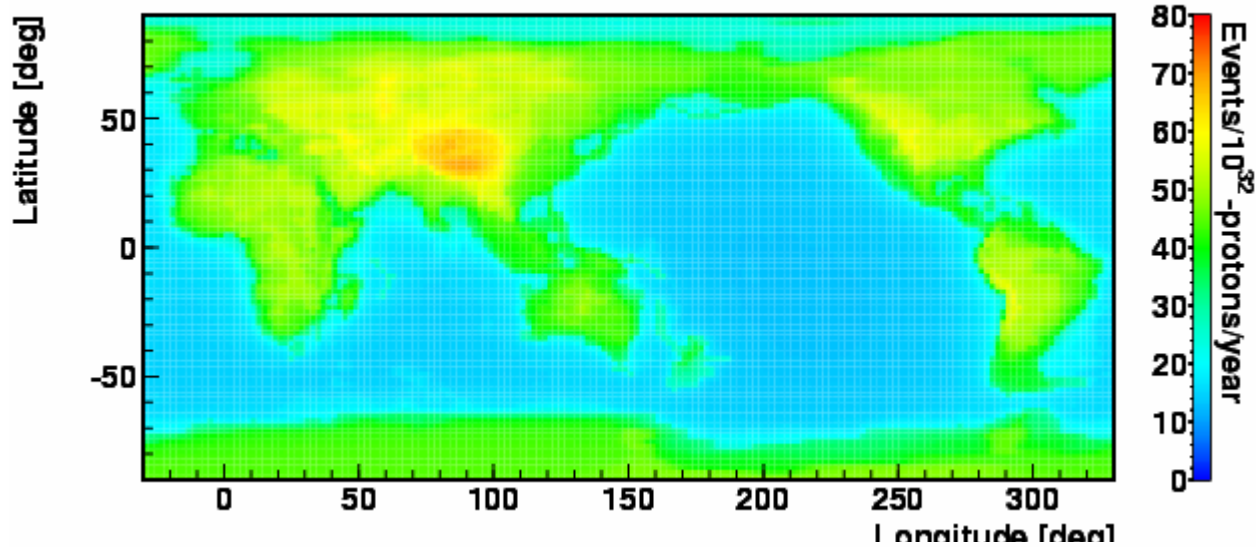


計画中の地球ニュートリノ実験

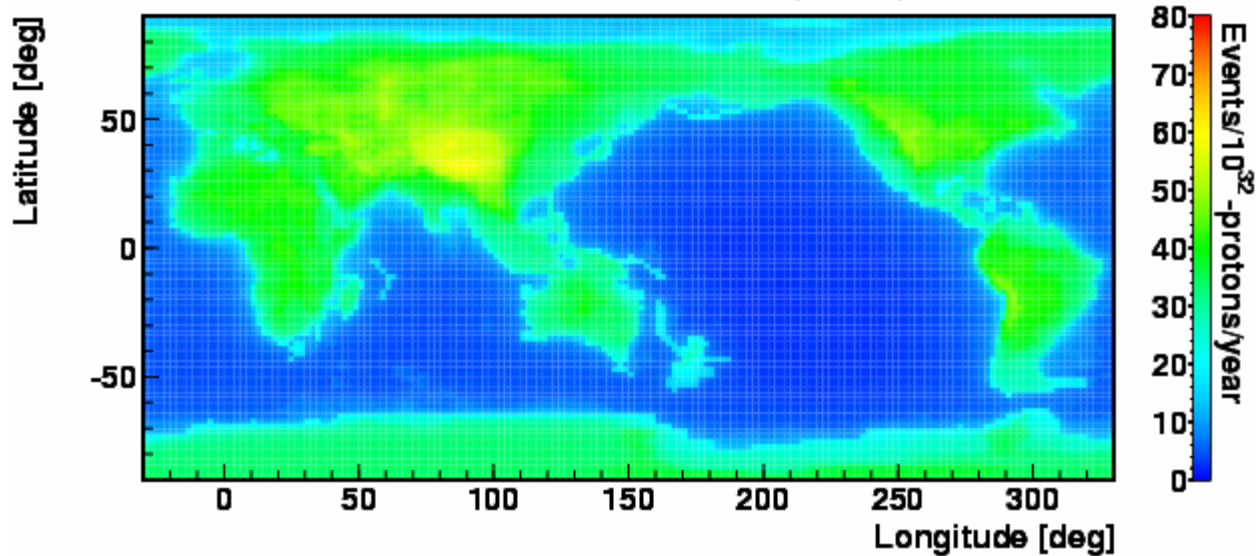
実験名	場所	容量 (kton)	深度 (m.w.e.)	開始予定
KamLAND	神岡	1.0	2700	2002
Borexino	Gran Sasso	0.3	1500	200?
SNO+	Sudbury	0.7	5400	検討中
Hano-hano	Hawaii	1.4 (?)	3000 (?)	計画中
BNO	Baksan	1.0	4800	計画中
LENA	Phyasalmi (Finland) Nestor (Greece)	60	4000 4000	ゆめ
HSD	Kimballton Homestake Soudan	100	1850 4200 2070	ゆめ

地球ニュートリノフラックス地図

Geoneutrino Event Rate (Crust+Mantle)



Geoneutrino Event Rate (Crust)

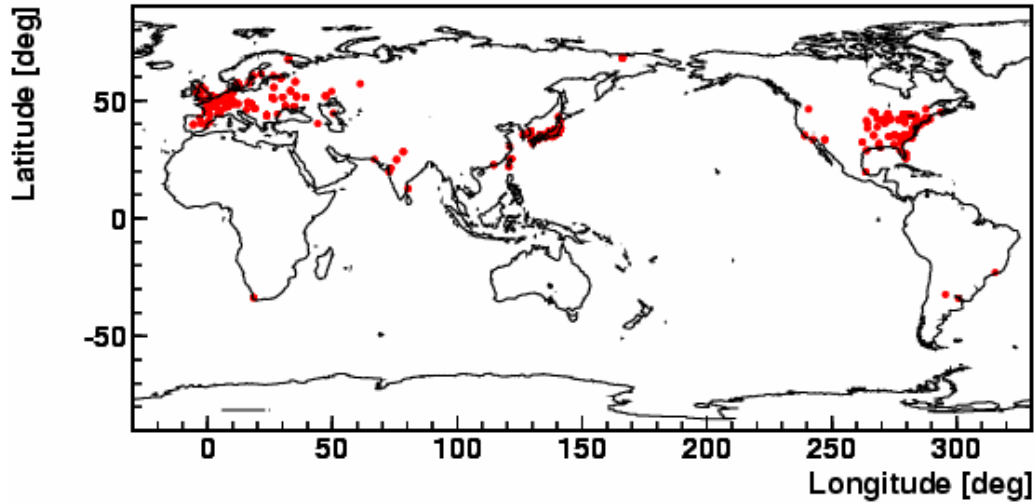


マントルから
~10 個/ 10^{32} P/年
地殻から
30~70個/ 10^{32} P/年

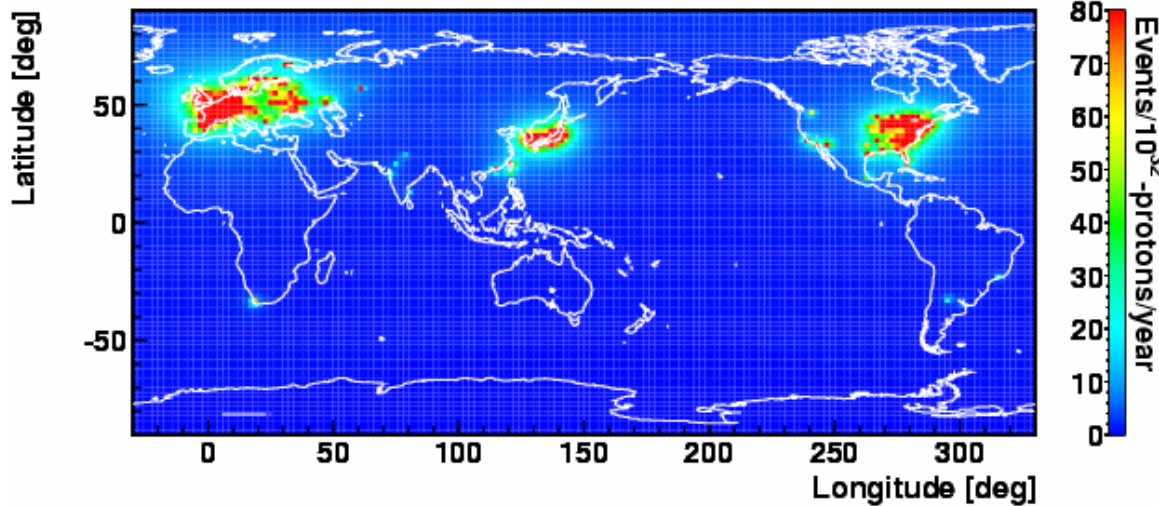
10^{32} -proton
||
1.2ktonCH₂

原子力発電所バックグラウンド

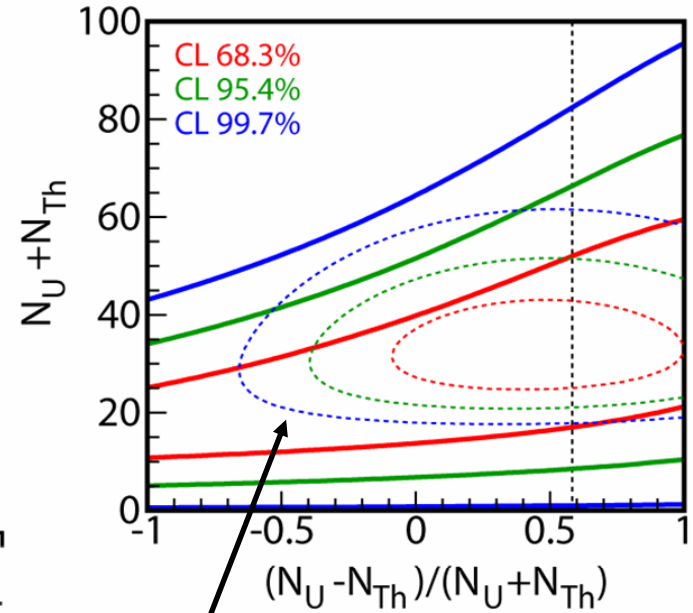
World Reactor Locations



Reactor Neutrino Event Rate ($1.8\text{MeV} < E < 3.3\text{MeV}$)



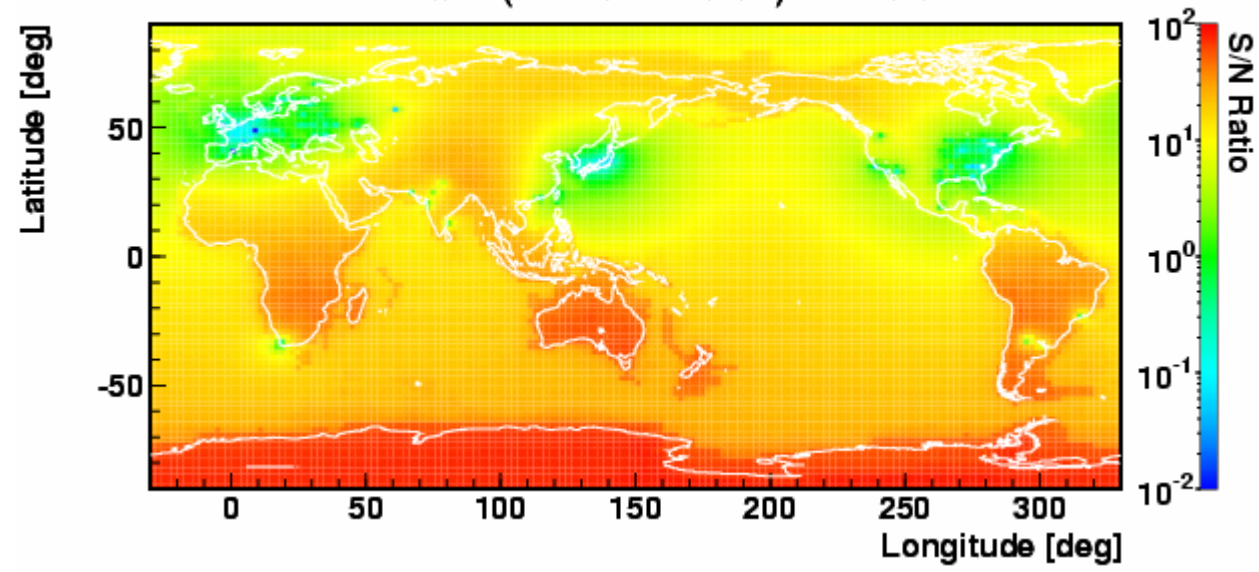
KamLAND 再純化後749日
(見込み)



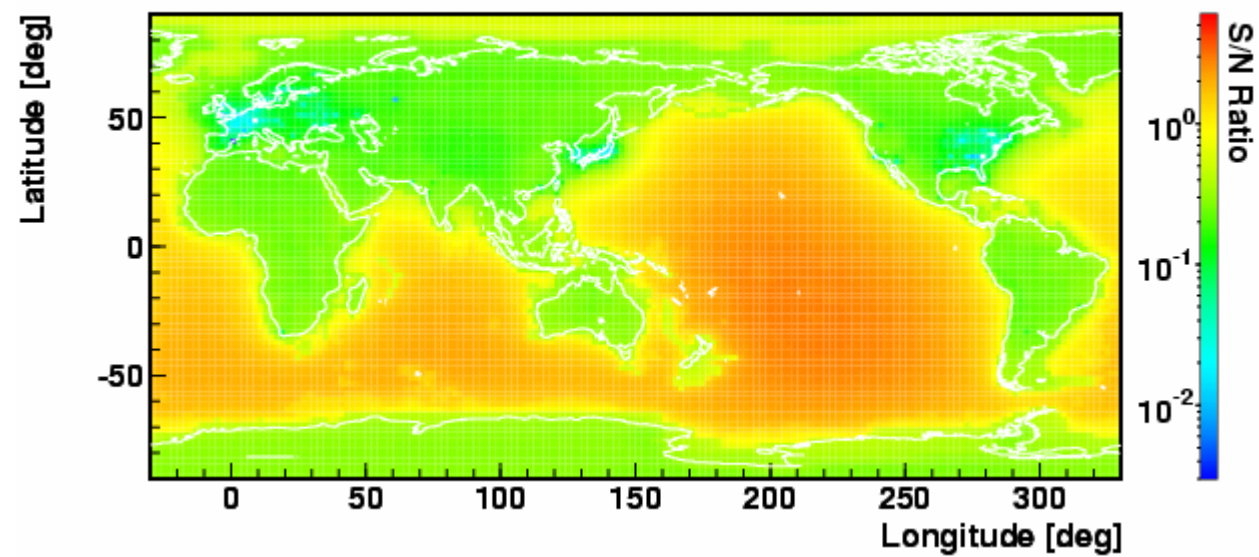
原子炉ニュートリノを
なくした場合

地球ニュートリノ観測 S/N 地図

S/N Ratio: (Crust + Mantle) / Reactor

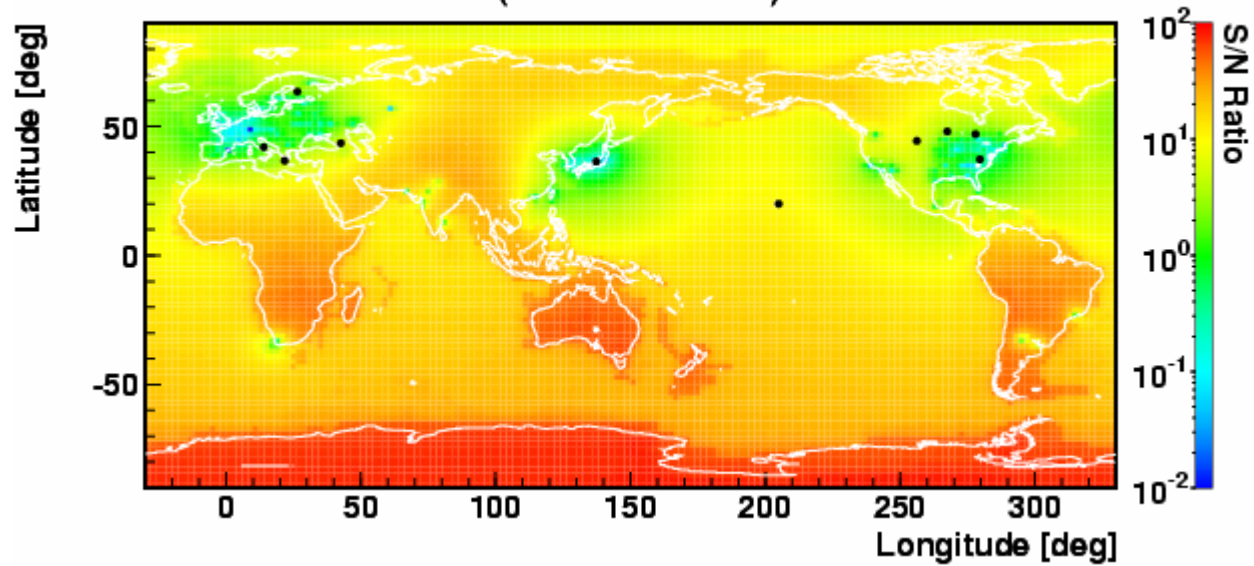


S/N Ratio: Mantle / (Crust + Reactor)

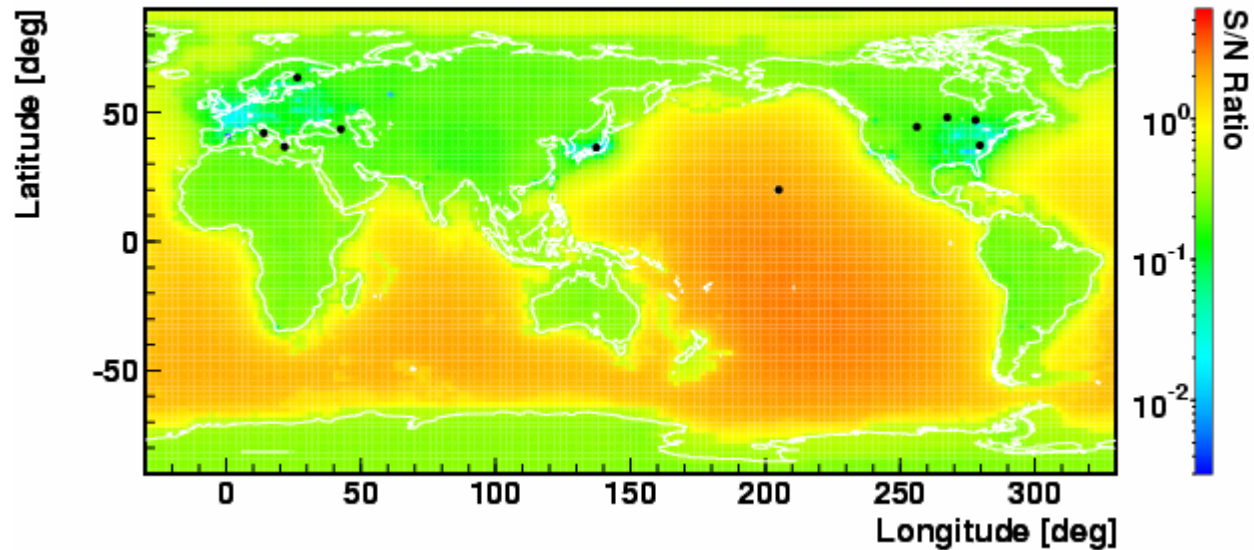


地球ニュートリノ観測 S/N 地図

S/N Ratio: (Crust + Mantle) / Reactor

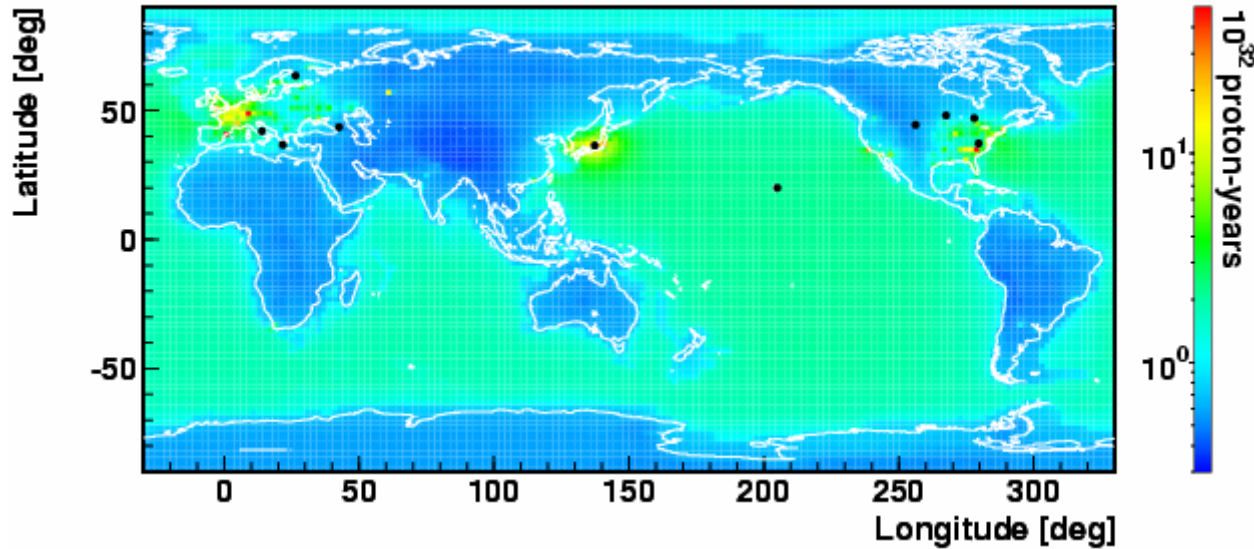


S/N Ratio: Mantle / (Crust + Reactor)



20%精度に達するまでの観測時間

Exposure for 20% precision: Sig:(Crust+Mantle) / BG:Reactor

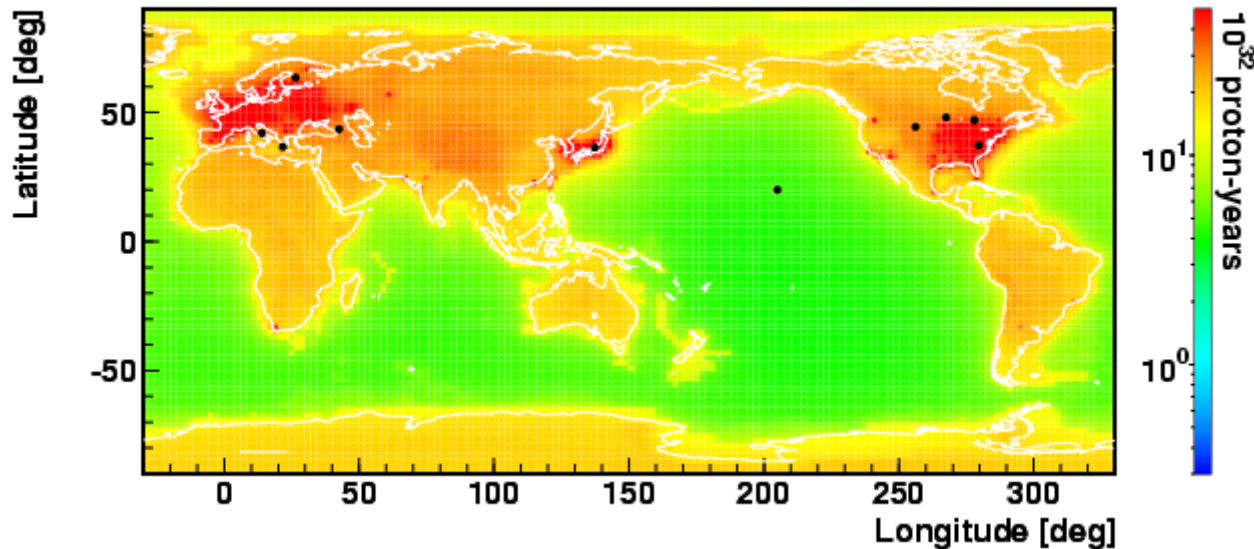


大陸上で全フラックス
0.5~1 [10³²P・年]

大陸上でマントル
~30 [10³²P・年]

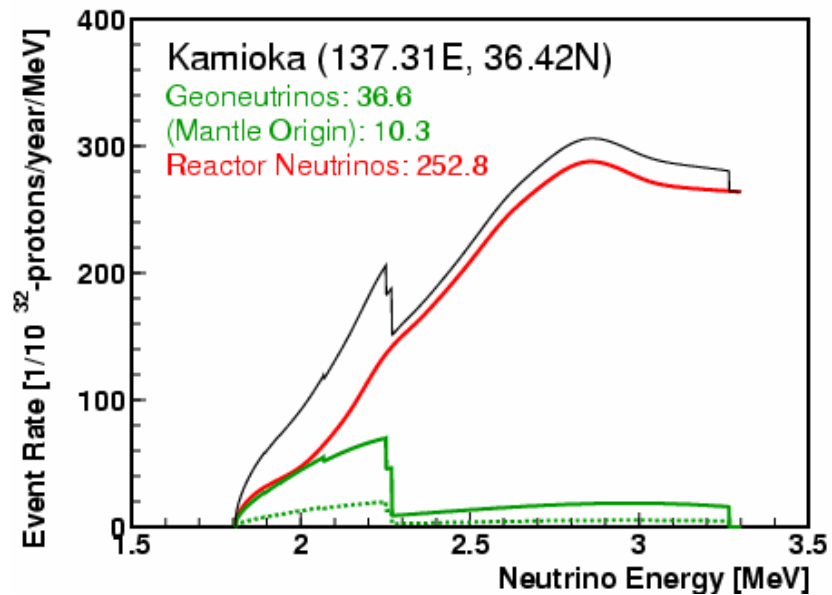
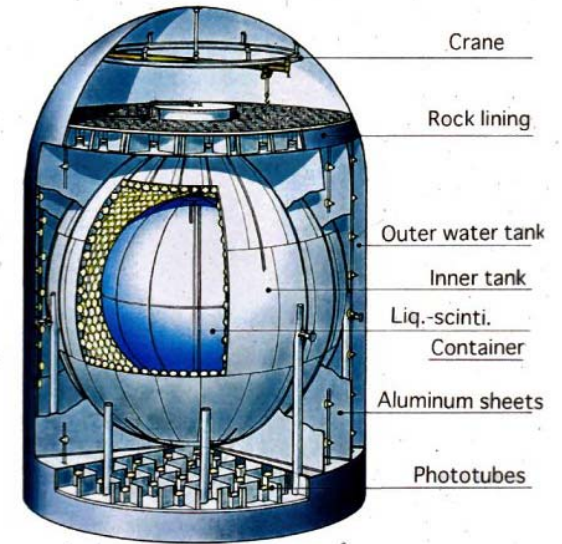
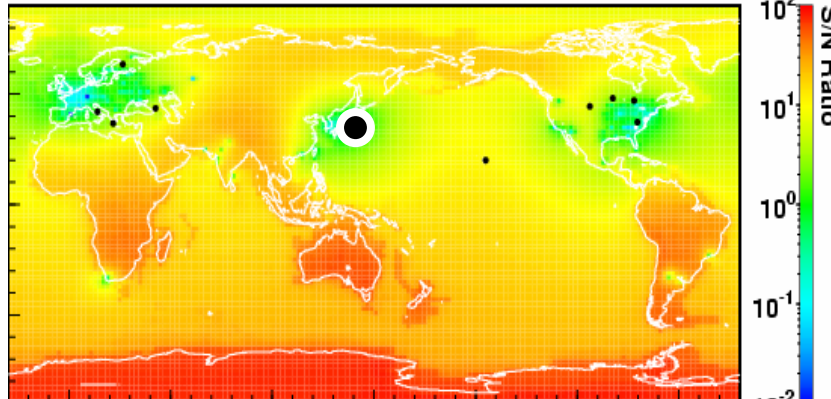
海洋上でマントル
4.5 [10³²P・年]

Exposure for 20% precision: Sig:Mantle / BG:(Crust+Reactor)



KamLAND @ Kamioka (Japan)

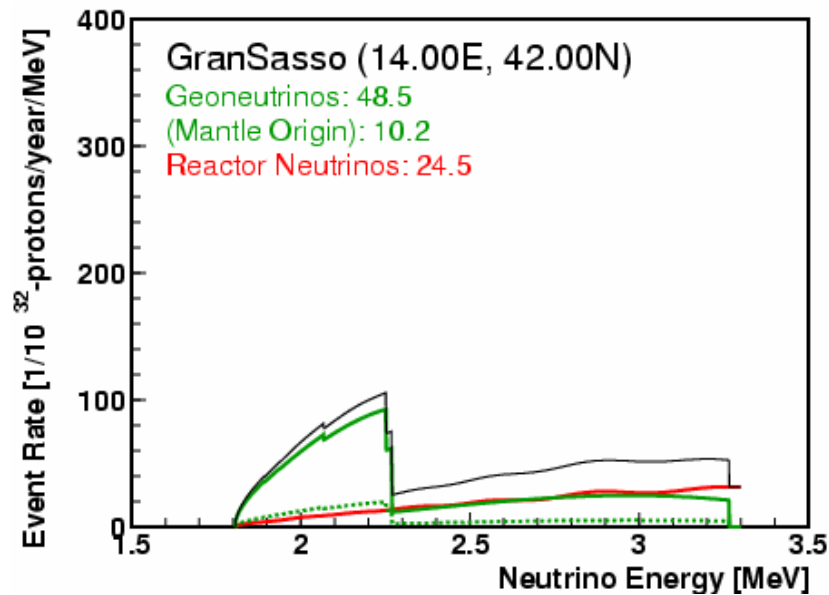
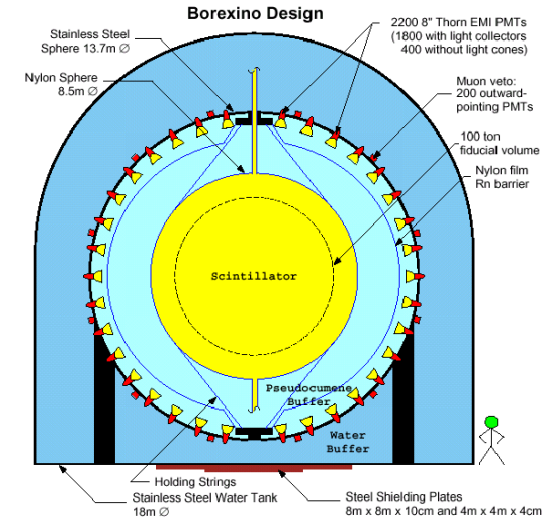
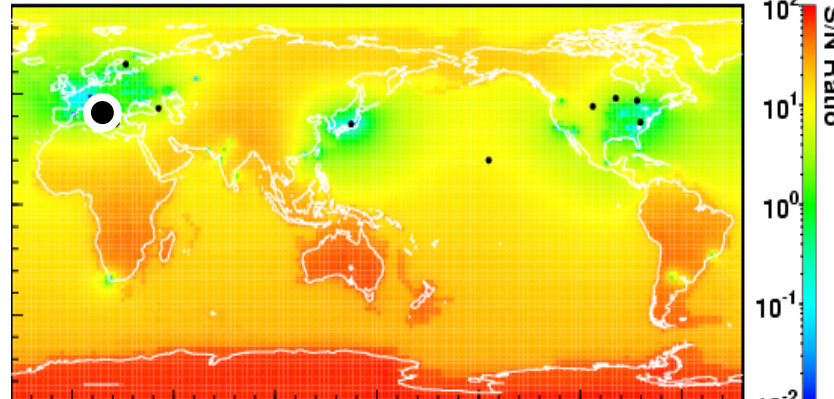
- 1.0 kton LS
- 2700 m.w.e.
- 2002~



- 島弧, 沈み込み帯
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 12.1 年
 - マントル : 160.8 年
- 実際には
 - 有効体積はもっと小さい
 - スペクトル解析がかなり有効

Borexino @ Gran Sasso (Italy)

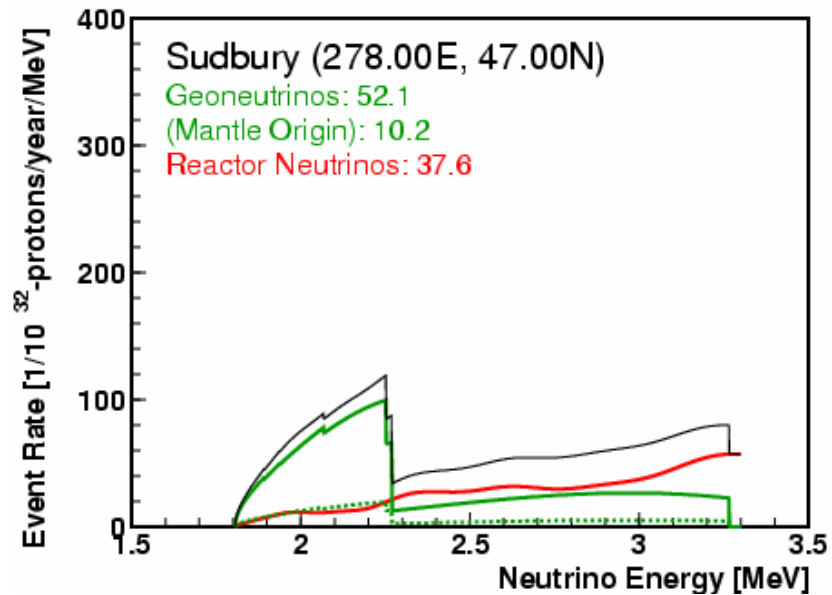
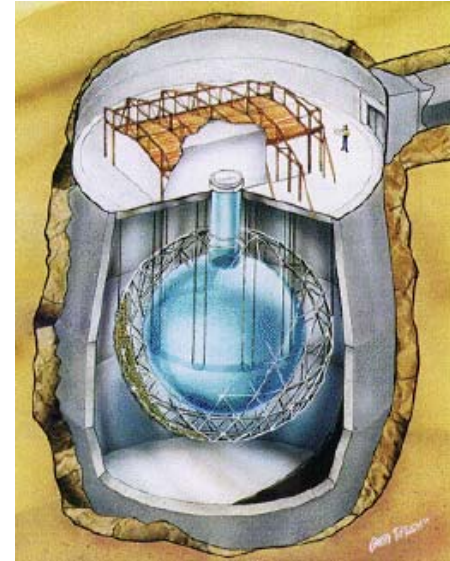
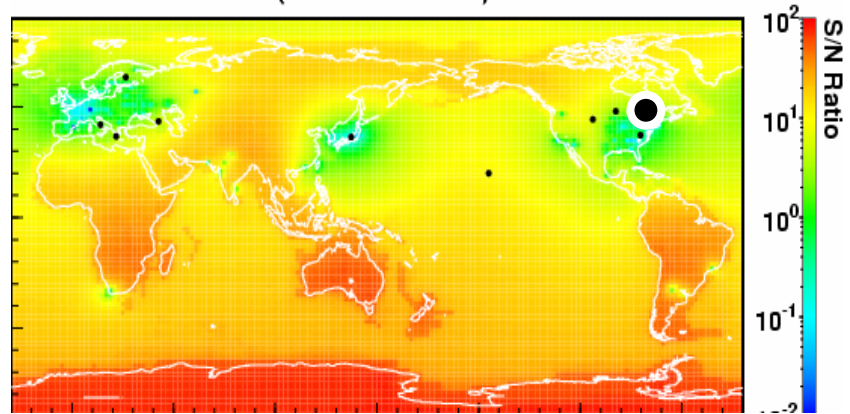
- 0.3 kton LS
- 1500 m.w.e.
- 200?~



- 中生代, 衝突帯
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 4.16 年
 - マントル : 130.52 年

SNO+ @ Sudbury (Canada)

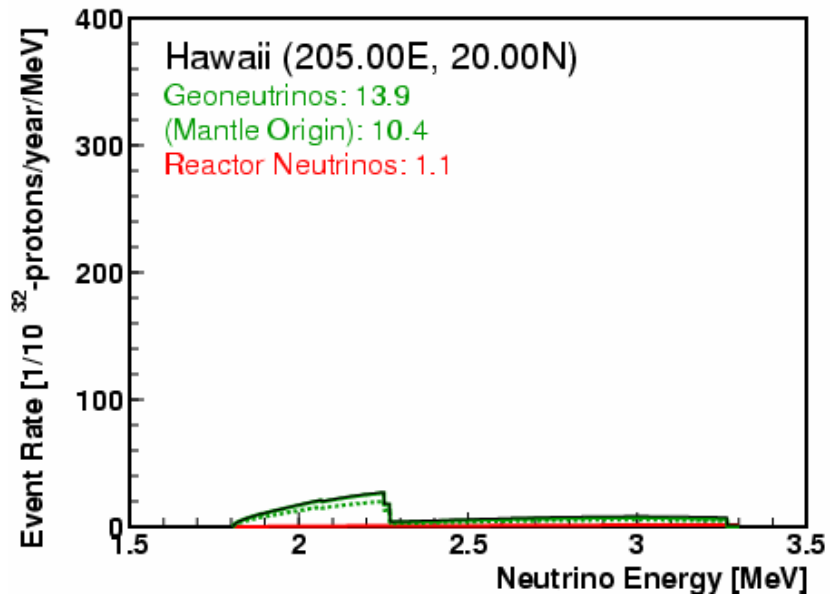
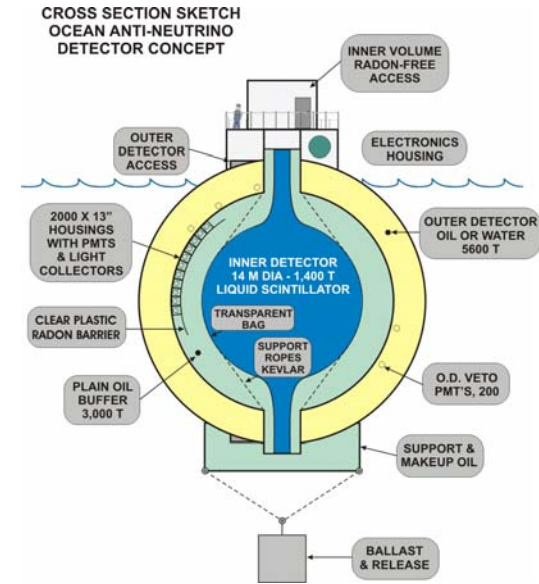
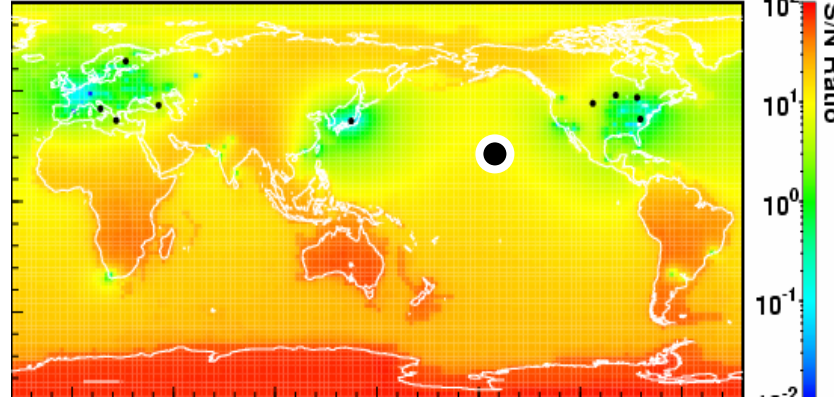
- 0.7 kton LS
- 5400 m.w.e.
- 検討中



- 始生代, 楕状地
- 20%精度までの時間
 - 全体: 2.02 年
 - マントル: 136.6 年

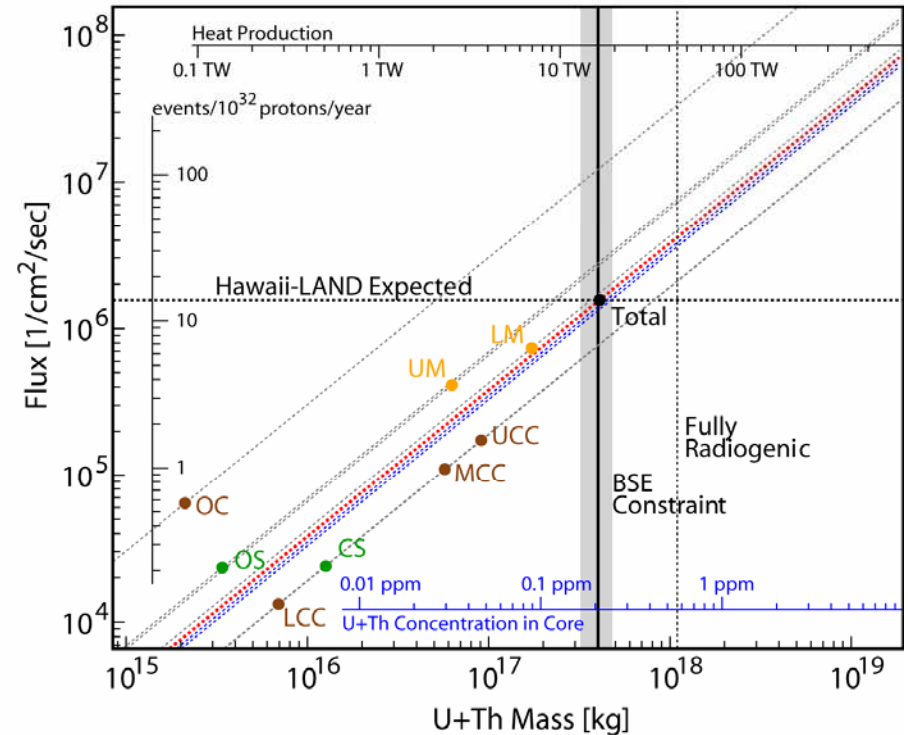
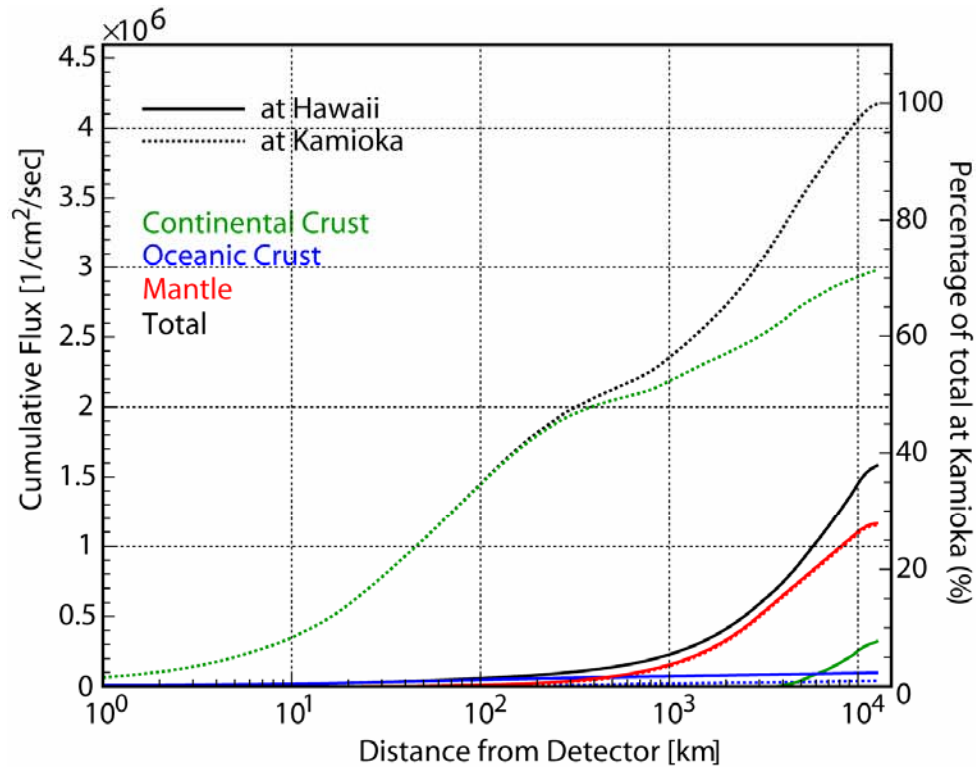
Hano-hano @ Hawaii (U.S.)

- 1.4 kton LS ?
- 1000 m.w.e. ?
- 計画中



- 海洋島
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 1.78 年
 - マントル : 3.88 年

続・ハワイ

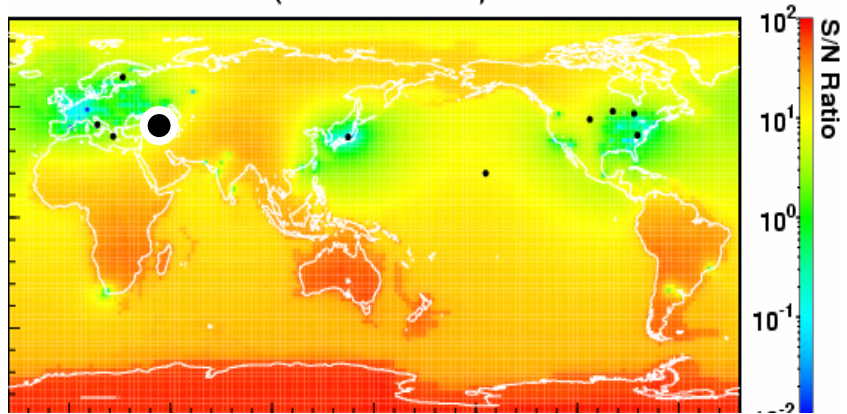


- フラックスの半分が下部マントル起源
- フラックスの3/4がマントル起源
- 近距離地質が単純で不定性が少ない
- 大陸地殻内部の構造の影響を受けない
- 周辺に原子炉がない (原子力潜水艦???)

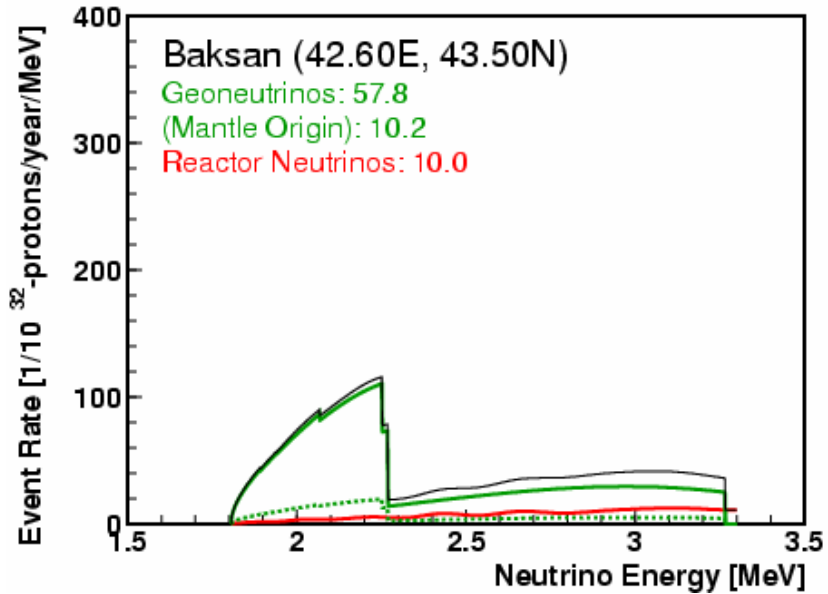


BNO @ Baksan (Russia)

- 1.0 kton LS
- 4800 m.w.e.
- 計画中



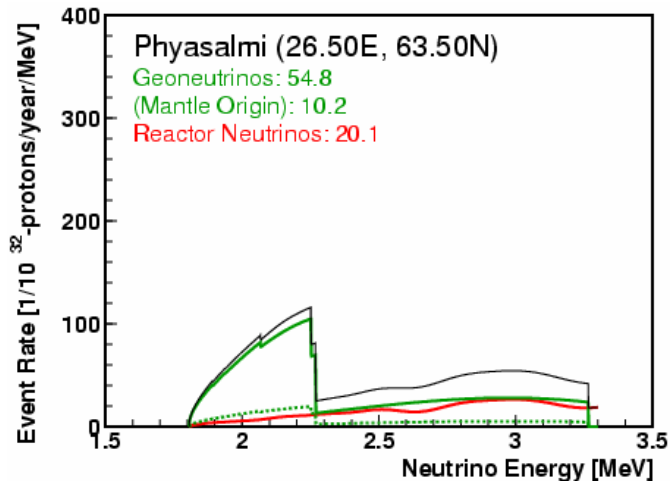
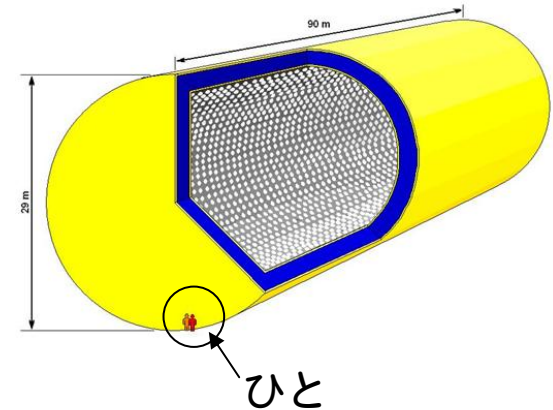
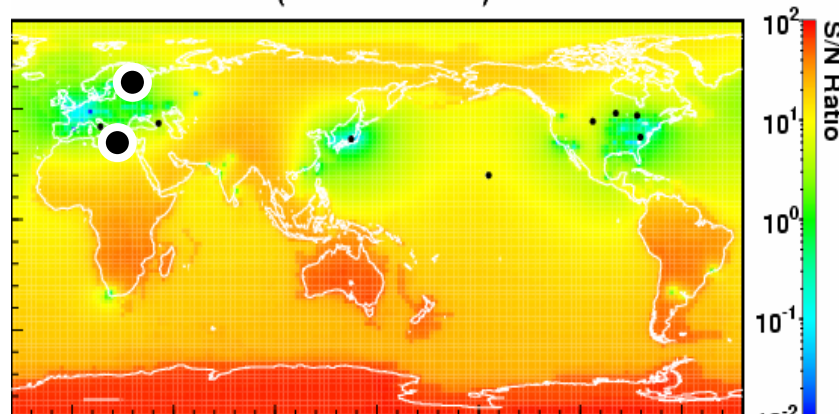
KamLAND型
検出器



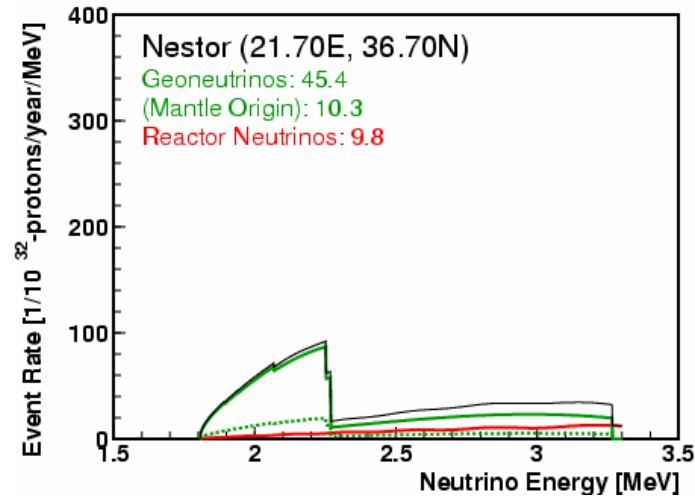
- 中生代, 造山帯
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 0.70 年
 - マントル : 36.2 年

LENA @ Phyasalmi (Finland), Nestor (Greece)

- 60 kton LS
- 4000 m.w.e.
- ゆめ



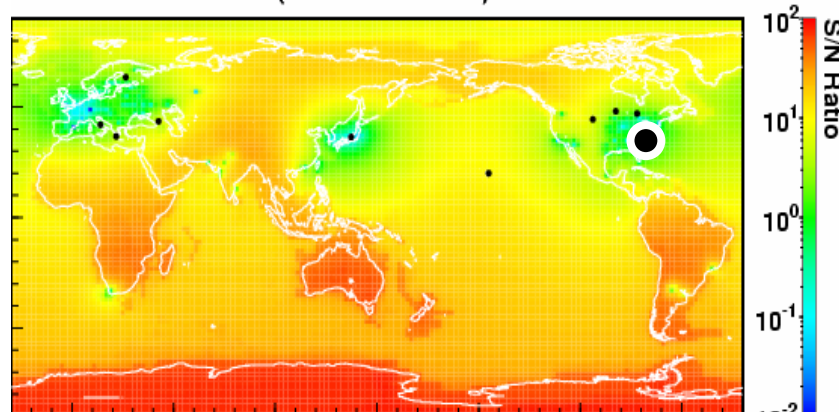
- 原生代, 楕状地
- 20%精度までの時間
 - 全体: 0.016年 (6日!)
 - マントル: 0.67年



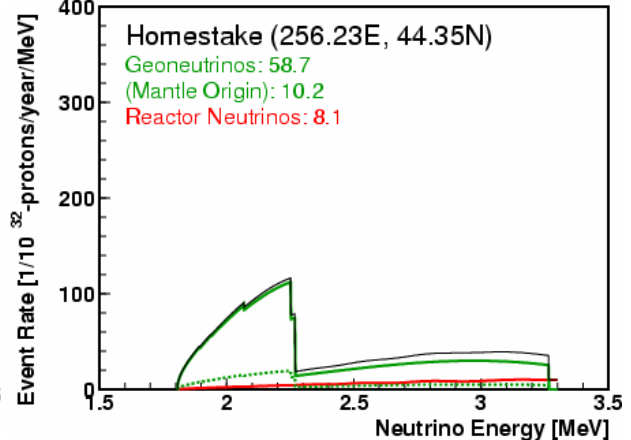
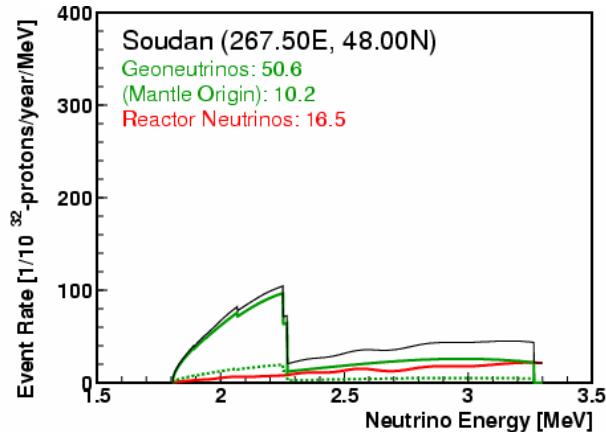
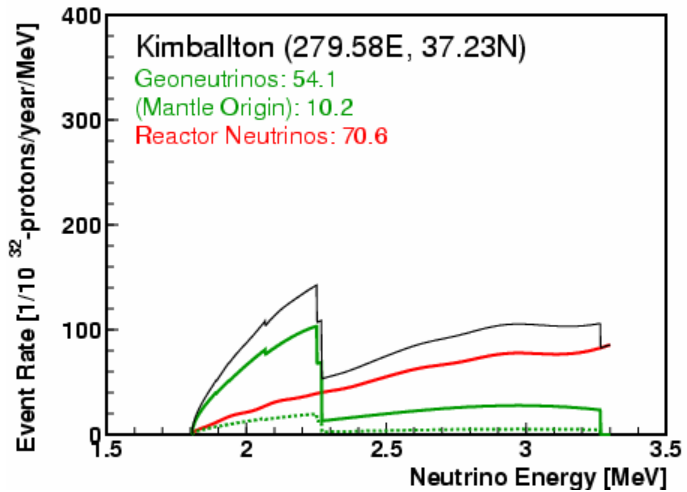
- 地中海, 中生代, 衝突帯
- 20%精度までの時間
 - 全体: 0.016年
 - マントル: 0.47年

HSD @ Kimballton, Homestake, Soudan, ...(U.S.)

- 100 kton LS
- 1850 m.w.e.
- ゆめ



検出器構造
検討中



- 古生代, 衝突帯
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 0.02 年
 - マントル : 0.69 年

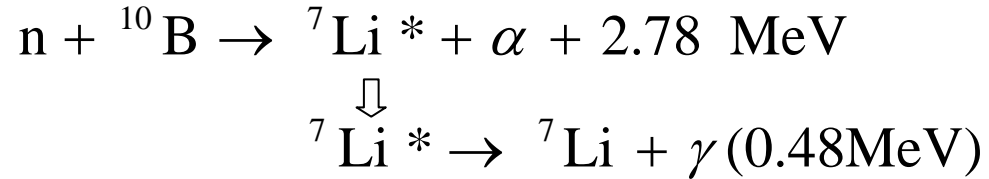
- 始生代楯状地
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 0.01 年
 - マントル : 0.37 年

- 始生代台地~造山帯
- 20%精度までの時間
 - 全体 : 0.0065年
 - マントル : 0.33 年

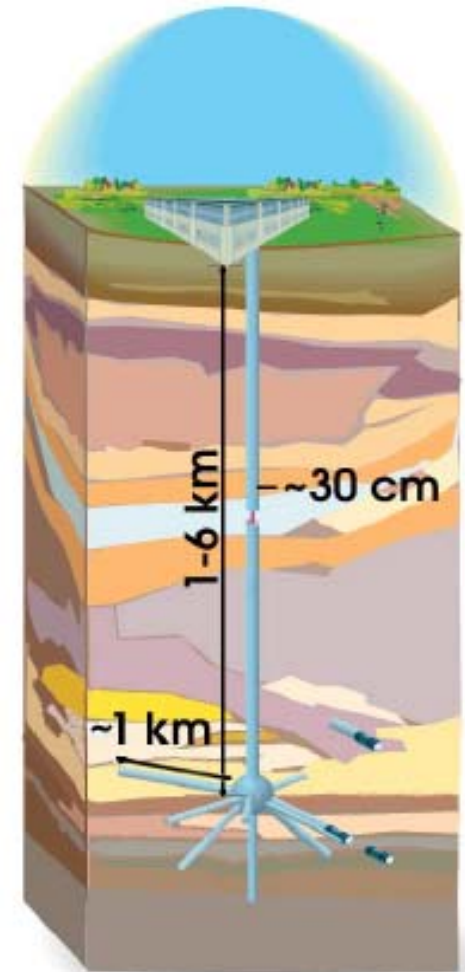
EARTH (Earth Antineutrino Tomography)

- ~1 kton LS ?
- >2700 m.w.e.
- ???

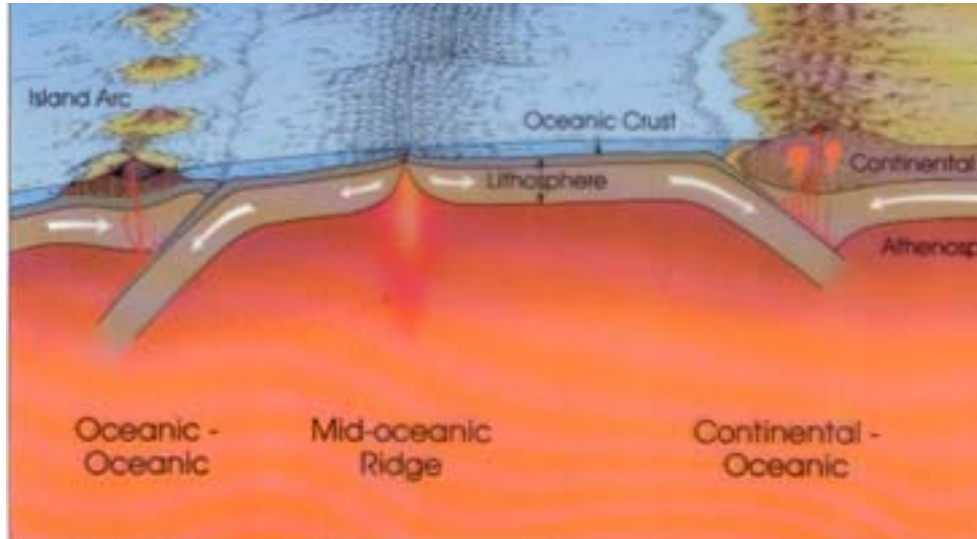
- ボアホール型検出器
- 方向に感度のある検出器を目指す



- 多地点観測によりトモグラフィを目指す

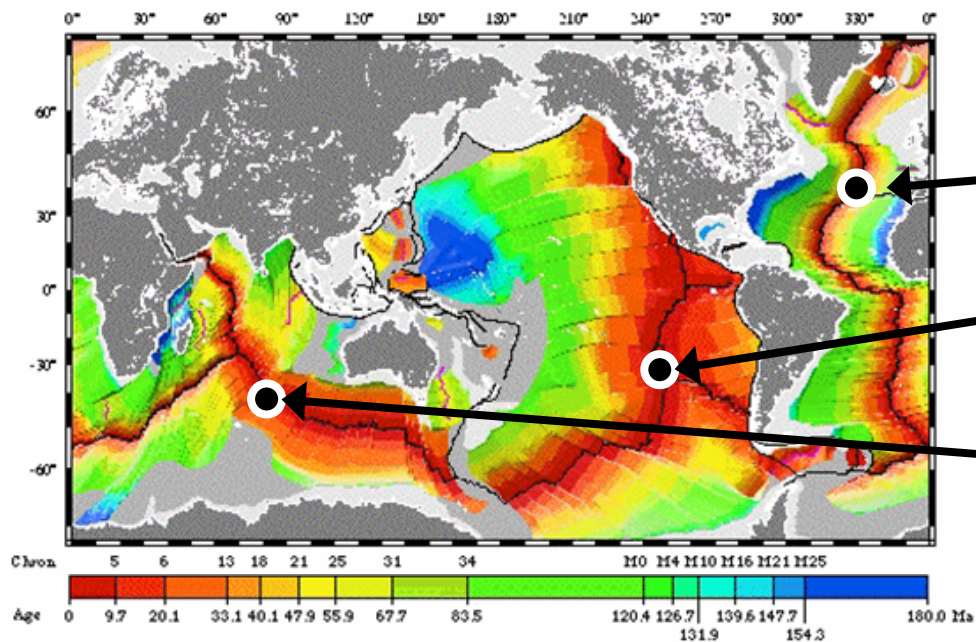


夢：海嶺上での観測



- 海嶺で新しい地殻が生成される
- ↓
- 海嶺下のマントルは不適合元素に欠乏している？

地球の進化過程理解への鍵

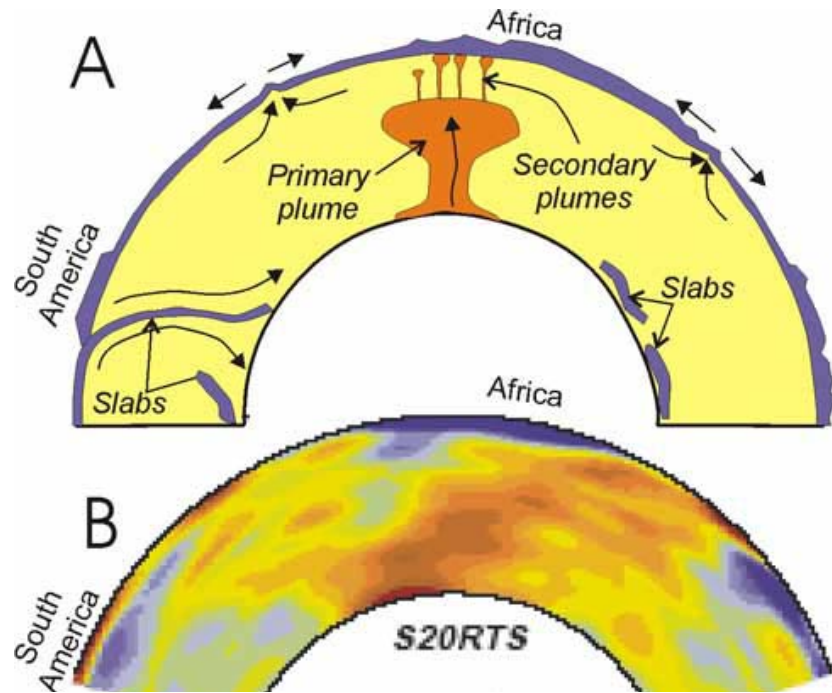


Azores →

Easter →

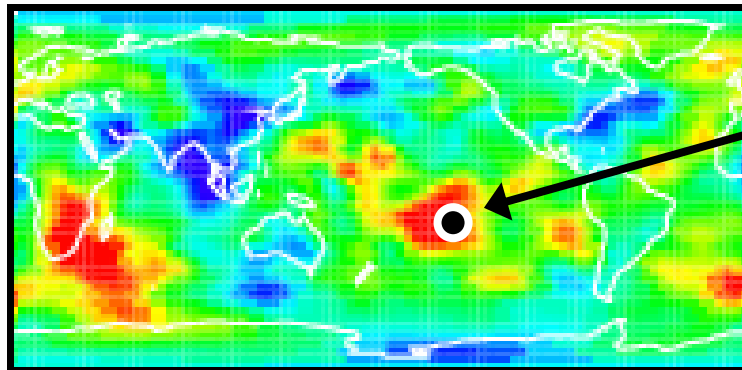
Kerguelen →

夢：マントルプルームを調べる



- プルーム構造は地震波で見えているが...
- **化学組成**は分からない
- 沈み込みスラブが循環しているのか...
- CMB に特殊な構造があるのか...

下部マントルにおける地震波速度異常



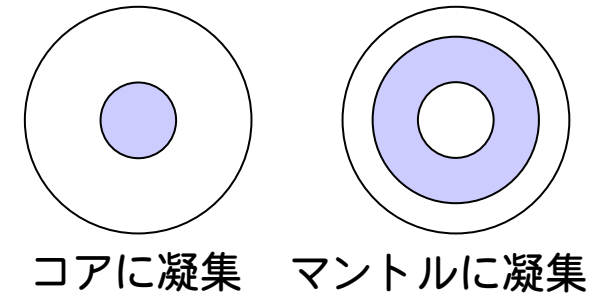
Tahiti



開発課題

- 方向検出

- 大陸の下のマントル組成
- コアとマントルの分離
- 地球トモグラフィの夢

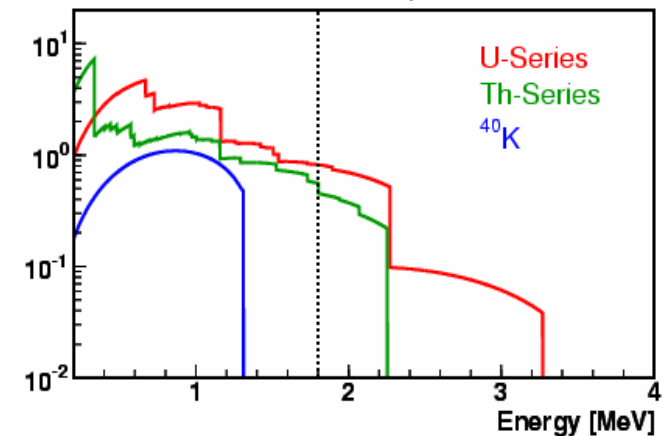


- ^{40}K ($E_{\text{max}}=1.3\text{MeV}$) ニュートリノの検出

- コアを含め, 重要な熱源 (3TW~20TW)
- 地球存在量の見積もりに大きな不定性
- 地球集積過程理解への重要な情報

- ポータブル化 (多地点観測へ向けて)

- 深海での観測
- 宇宙線耐性 (浅地下での観測)
- 小体積



まとめ

- 陸上での実験は基本的に大陸地殻を見ている
 - 手が届くはずの大陸地殻なのに、不定性が大きい
 - 大陸地殻は、放射性熱源のリザーバとして重要
 - 地球進化を理解する上でも重要な情報
- ハワイでの観測は、マントル組成に感度がある
- これらの実験計画が実際に活発に議論されている
- 多地点観測により、海嶺やプリューム組成理解への夢
- 方向検出、低エネルギー閾値化により、さらに大きな可能性も

