

KamLANDにおける地球ニュートリノの観測

0. 地球ニュートリノについて
 1. ニュートリノ地球物理学
 2. KamLAND 実験における地球ニュートリノの観測
 3. 議論と将来展望

東北大学ニュートリノ科学研究センター
榎本 三四郎

素粒子ニュートリノ

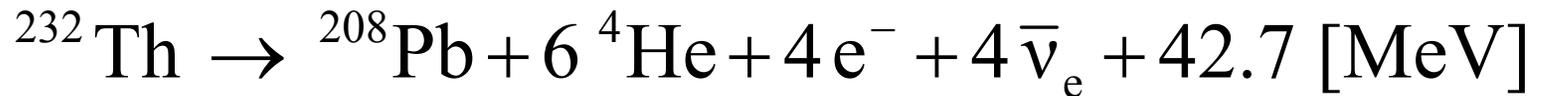
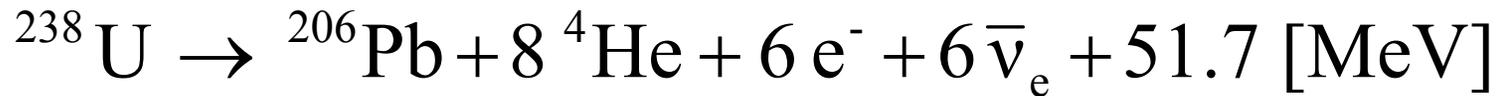
- 電子と同じレプトン族の素粒子
 - 原子核のベータ崩壊などにより生成される
 - 電荷を持たない
 - 質量はきわめて小さい
 - 物質とほとんど相互作用しない
(数MeVのニュートリノは水の中を20光年直進できる)
- 最近のニュートリノ物理学の発展により、
その性質の多くが解明され、観測技術も向上

「とどかないところ」を見る新しい観測手法

太陽, 超新星, 初期宇宙, 地球深部, 原子炉内部, ...

地球内部起源ニュートリノ

- 地球内部の放射性元素のベータ崩壊により生成



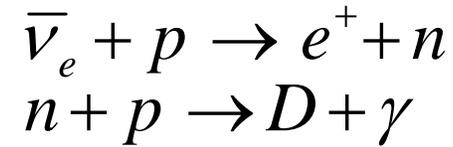
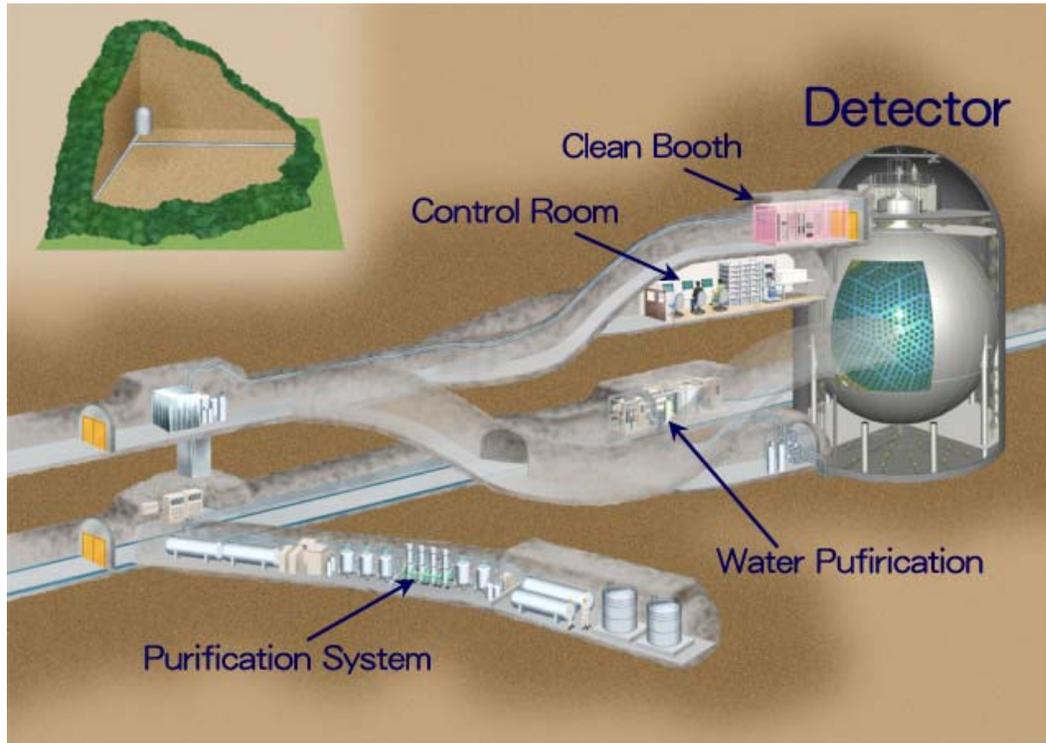
- 放射性熱源は地表熱流量のおよそ半分に寄与
 - 観測地殻熱流量 $\sim 44\text{TW}$ (31TW)
 - U系列 8TW / Th系列 8TW / ^{40}K 3TW ???
- 地球深部の化学組成に関する直接の情報
 - ボーリングによるサンプル採取は 12km 程度
 - 地上噴出岩石(捕獲岩)の最大生成深度は 200km 程度

歴史

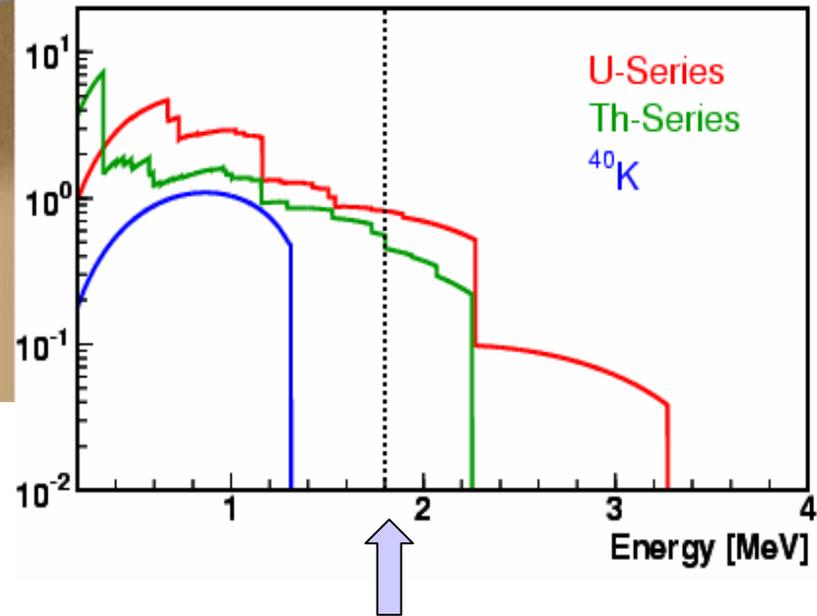
- G.Eder (1966)
- G.Marx (1969)
 - 地球ニュートリノに関する最初の言及
- C.Avilez et al. (1981)
- L.Krauss et al. (1984)
- M.Kobayashi, Y.Fukao (1991)
 - ニュートリノ観測による地球物理について
 - 現実の観測については「当面困難」
- R.Raghavan, S.Enomoto et al. (1998)
- C.Rothschild et al. (1998)
- G.Fiorentini et al. (2003)
 - KamLAND/Borexino により観測に現実味
 - 検出器の立地や構造を考慮した詳細な議論

KamLAND実験

カミオカンデ跡地に建設された第三世代ニュートリノ観測実験
1000ton 液体シンチレータにより超低エネルギー反ニュートリノを観測



反応閾値：1.8MeV



KamLAND 閾値

反ニュートリノに対する**選択的感度**
→太陽ニュートリノの混入を避けられる

2005年7月：初の実験的研究成果



The first detection of geoneutrinos from beneath our feet is a landmark result. It will allow better estimation of the abundances and distributions of radioactive elements in the Earth, and of the Earth's overall heat budget.

- William F. McDonough

第1部

ニュートリノ地球物理学

1. 既存の地球科学手法との比較
2. ニュートリノによる地球物理
3. ニュートリノフラックス計算

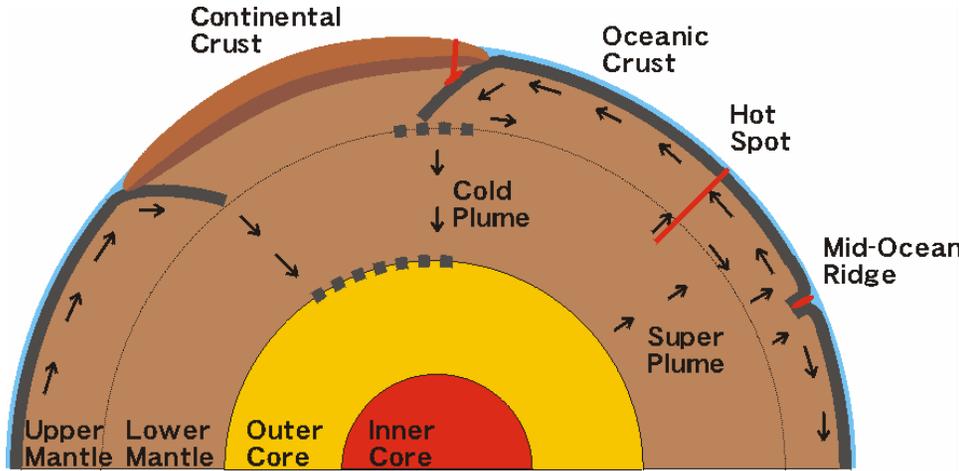


既存の地球科学手法とニュートリノ

- 既存の地球科学手法
 - 地震波解析
 - 地球内部の物理的構造（地震波速度，弾性定数，密度…）
 - 岩石学的手法，超高压実験
 - 深部における物質構造推定
 - 地上噴出物の生成深度推定
 - 地表における観測，測定
 - 地殻熱流量，重力異常，地磁気，電気伝導度， …
 - 地質学，古地磁気学によるダイナミクス研究
 - 隕石組成解析，惑星物理
 - 始原物質推定
- 地球深部の化学組成に関する直接の観測手段は存在しない

地球科学

地震波解析による構造モデル



- 地球内部の物理構造を詳細に記述
- マントル対流を示唆する構造
- 化学組成との対応ははっきりしない

隕石解析による組成モデル

- CI コンドライト隕石による始原物質推定
- 揮発物質の見積もり
- コア分化

BSE モデル

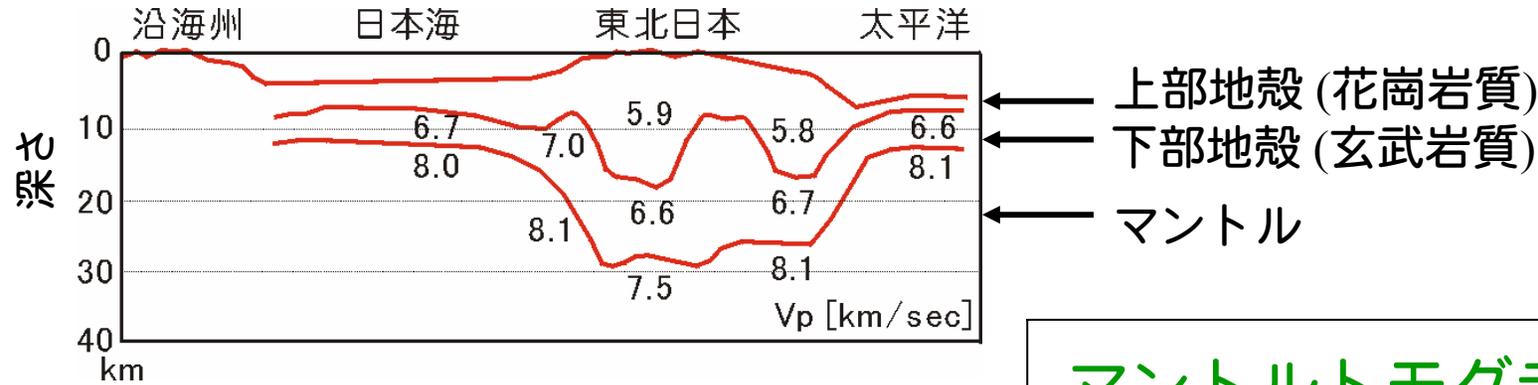
- コアを除く固体地球の平均組成
- 地球化学の基本的パラダイム
- U/Th 量に15%~20%の不定性
- 20TW の放射性熱源を予測
- 直接のテストは存在しない

熱収支

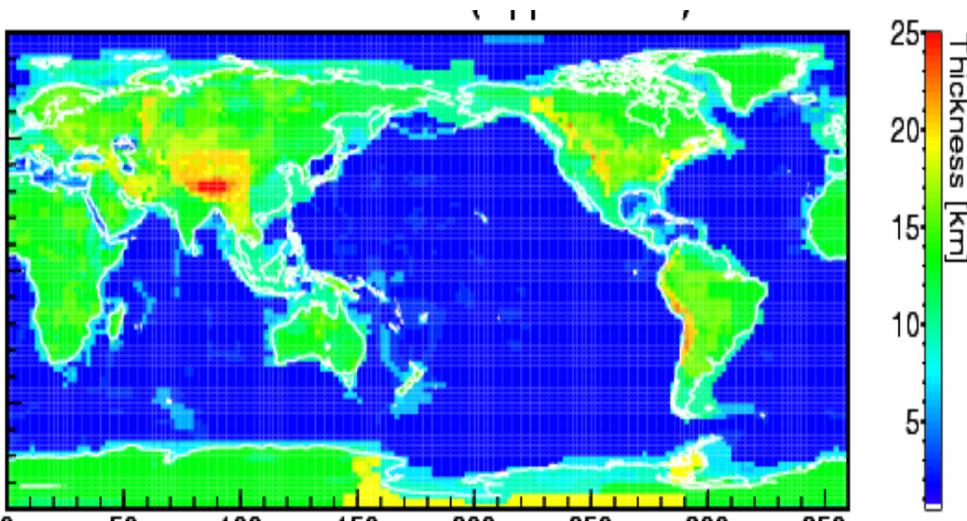
- 観測地殻熱流量：44TW (最近の再計算で31TW)
- 熱源：冷却熱(???), 液体コアの固化熱(???), 放射壊変熱(20TW???)
- 熱収支を決定することが地球ダイナミクスの理解に不可欠

地震波解析による地球内部構造モデル

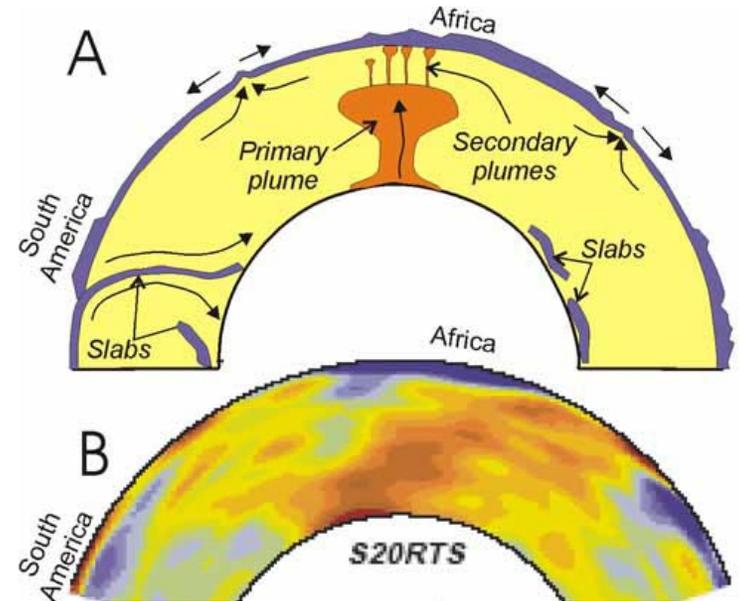
日本周辺の地殻断面



地殻の厚さ世界地図



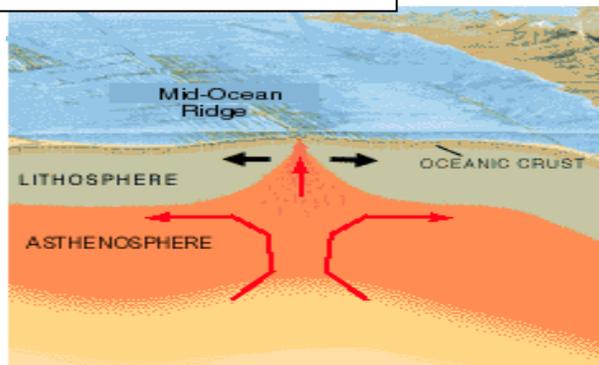
マントルトモグラフィ



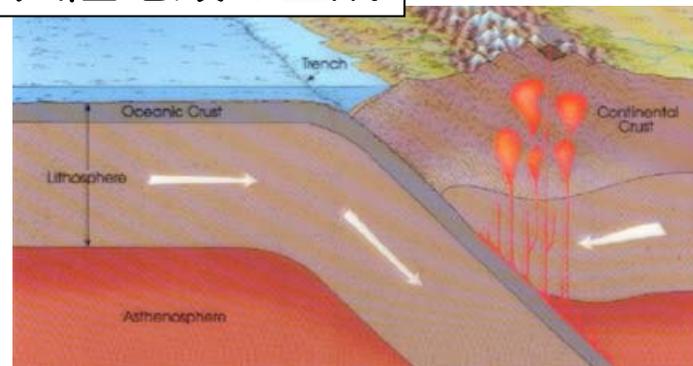
地球化学

- コア：超高密度の金属。イオン半径の大きい U/Th など は存在しにくい。
- マントル：よく分からない。上部についてはサンプルがあることはあるが，マントル組成を代表しているかどうか疑問。 **BSE組成は重要なヒント**
- 大陸地殻：部分熔解プロセスにより， **全地球の半分**の U/Thが濃集。手が届く場所ではあるが，不定性は大きい

海洋地殻の生成



大陸地殻の生成



大陸地殻組成モデル

- **Geologic Model:** 大規模広範囲の岩石サンプリングによる
→ サンプリングバイアス (特に表層)
- **Tectonic Model:** 地殻生成のモデルを仮定して組成を推定
→ モデル依存性
- **Seismic Model:** 地震波測定値と高圧実験で組成を推定
→ 一意でない組み合わせによる不定性

	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	-	-
		-		

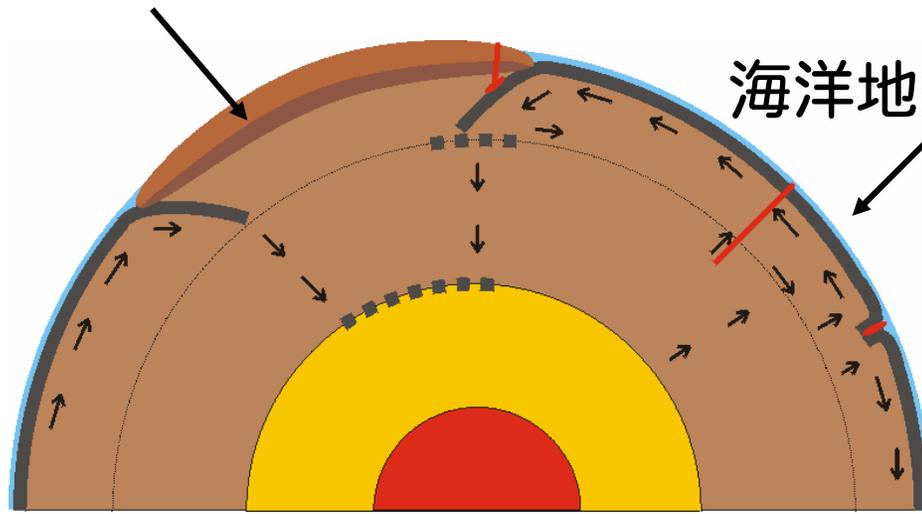
ニュートリノによる地球科学

- U/Th の総量・分布を決定することにより,
 - ✓ BSE モデルをテスト
 - ⇒ 地球化学の基本的パラダイムの検証
 - ⇒ 地球生成プロセスの理解 (始原物質, 集積速度, ...)
 - ✓ 熱収支の決定
 - ⇒ ダイナミクスを理解
 - ⇒ 地球発達史の理解
 - ⇒ 地磁気発生メカニズムの理解
 - ✓ 深部の化学組成の理解
 - ⇒ 化学構造モデル (マントル, 地殻) の決定
 - ⇒ 地震波観測との対応付け

参照地球モデルによるフラックス予想 1

大陸上部地殻 U: 2.8ppm / Th: 10.7ppm
大陸中部地殻 U: 1.6ppm / Th: 6.1ppm
大陸下部地殻 U: 0.2ppm / Th: 1.2ppm

Rudnick et.al. (1995)
をとりあえず参照。
不定性は別に議論。



海洋地殻 U: 0.08ppm / Th: 0.32ppm

マントル組成はBSEから
地殻を差し引いて求める。
とりあえず一様を仮定。

マントル U: 0.012ppm / Th: 0.048ppm

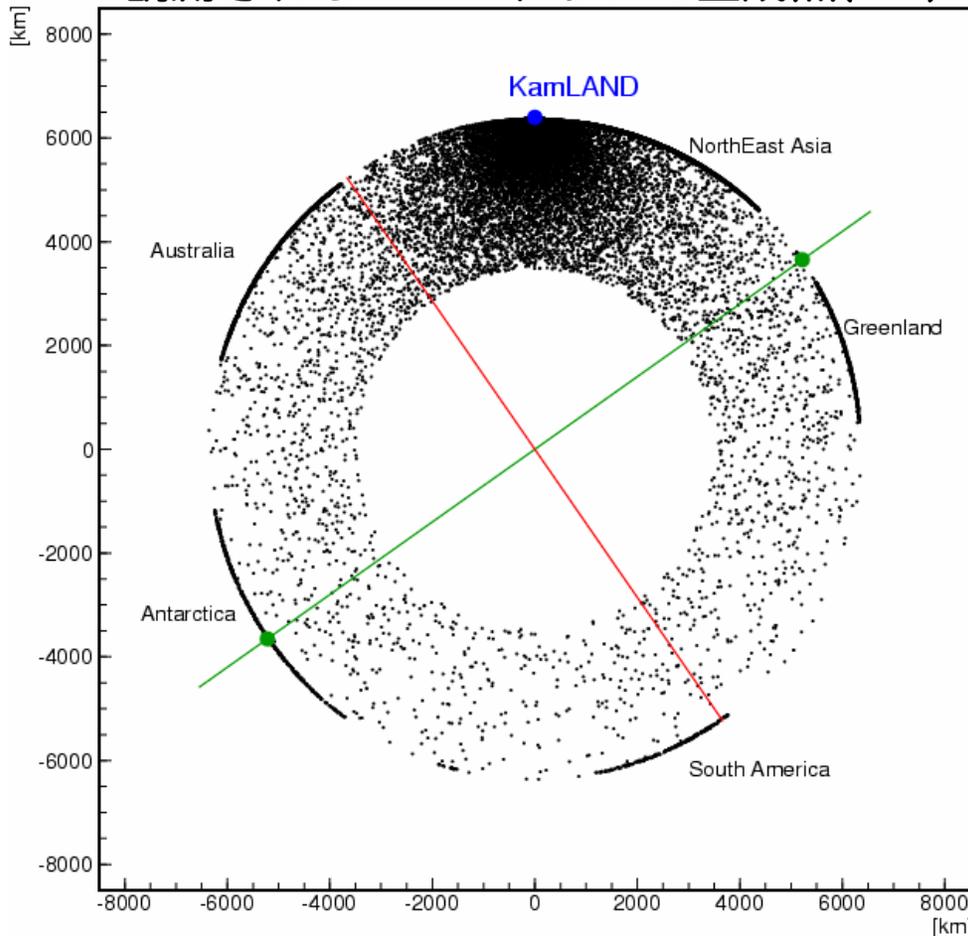
外核・内核 U: 0ppm / Th: 0ppm

核にはU/Thは
存在しない

参照地球モデルによるフラックス予想 2

$$F_{U/Th} = A \cdot \int_{earth} \frac{\rho_{U/Th}(\vec{r})}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}_{KamLAND}|^2} P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) dV$$

観測されるニュートリノの生成点(MC)



KamLANDにおける
ニュートリノフラックス

•U系列

2.3×10^6 [1/cm²/sec]

30.5 [TNU]

•Th系列

2.0×10^6 [1/cm²/sec]

8.0 [TNU]

TNU: Terrestrial Neutrino Unit

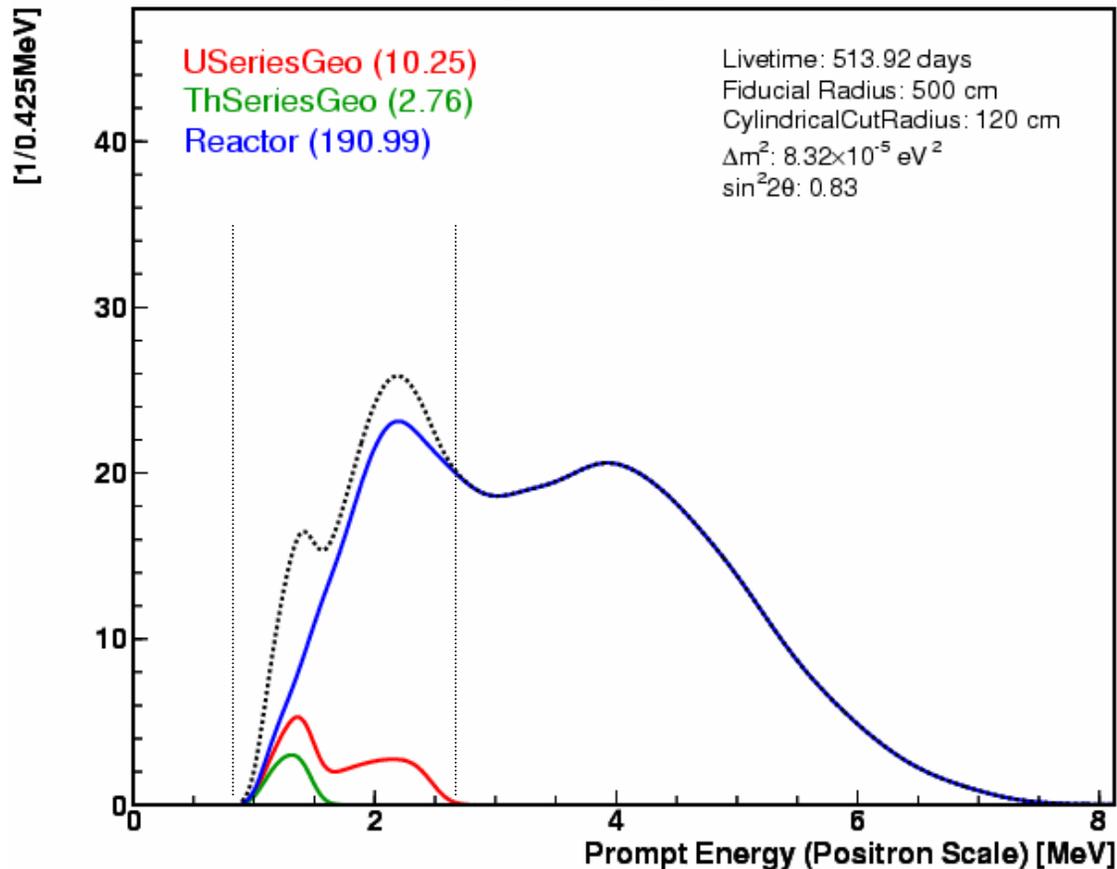
1 TNU = 1/10³²protons/year

~ 1/1.2ktonCH₂/year

KamLAND における地球ニュートリノ観測

- 地球化学参照モデルに基づいたニュートリノフラックス
- 408ton CH₂ (半径5mの有効体積), 513日の観測, 検出効率69%
- KamLAND 2nd Result のニュートリノ振動パラメータ

Expected Spectrum



予測イベント数

U 系列: 10.3

Th 系列: 2.7

原子炉起源($E_p < 2.7 \text{ MeV}$): 58

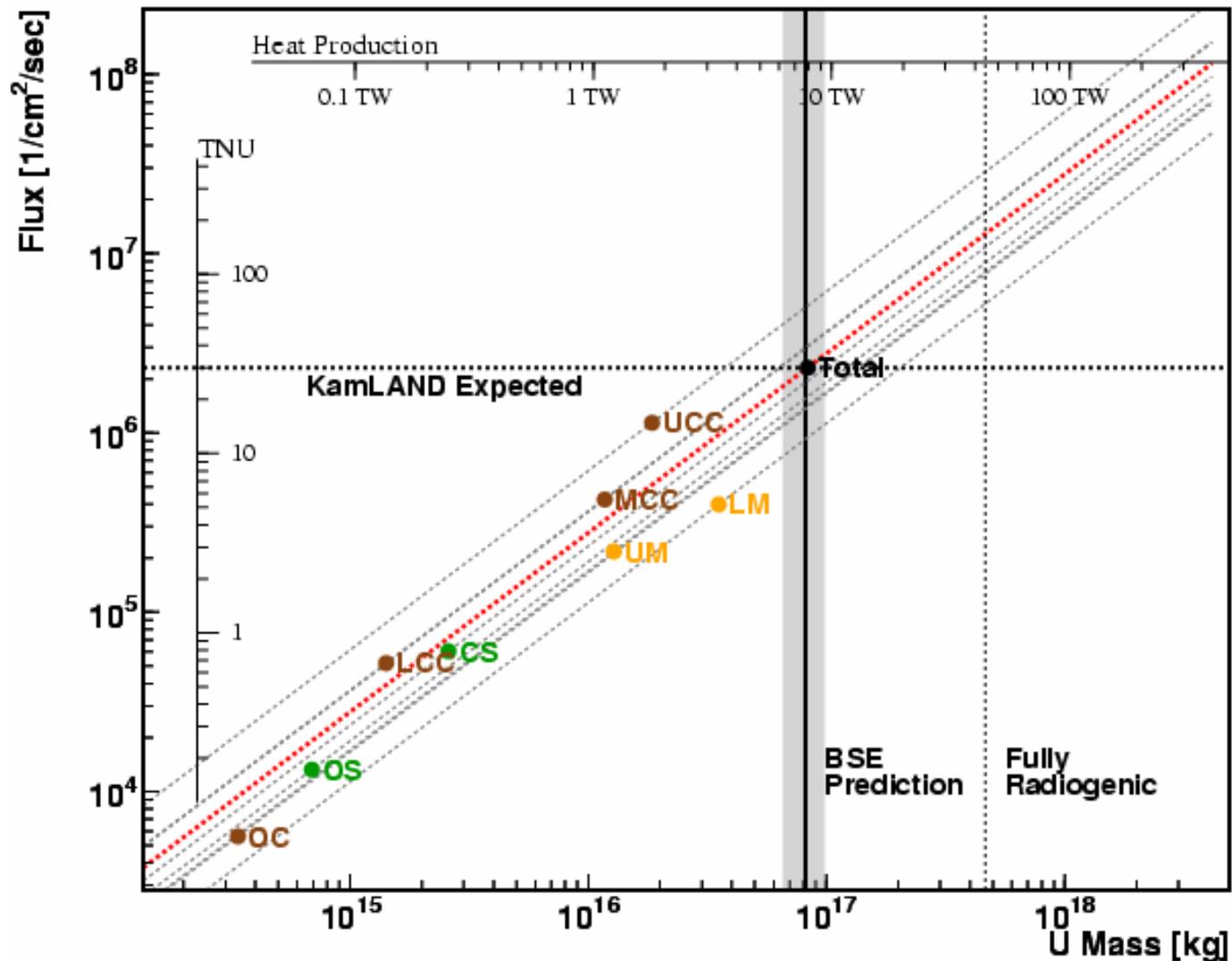
その他バックグラウンド

accidental: ~2

muon spallation: ~1

$^{13}\text{C}(\alpha, n)$: ~30

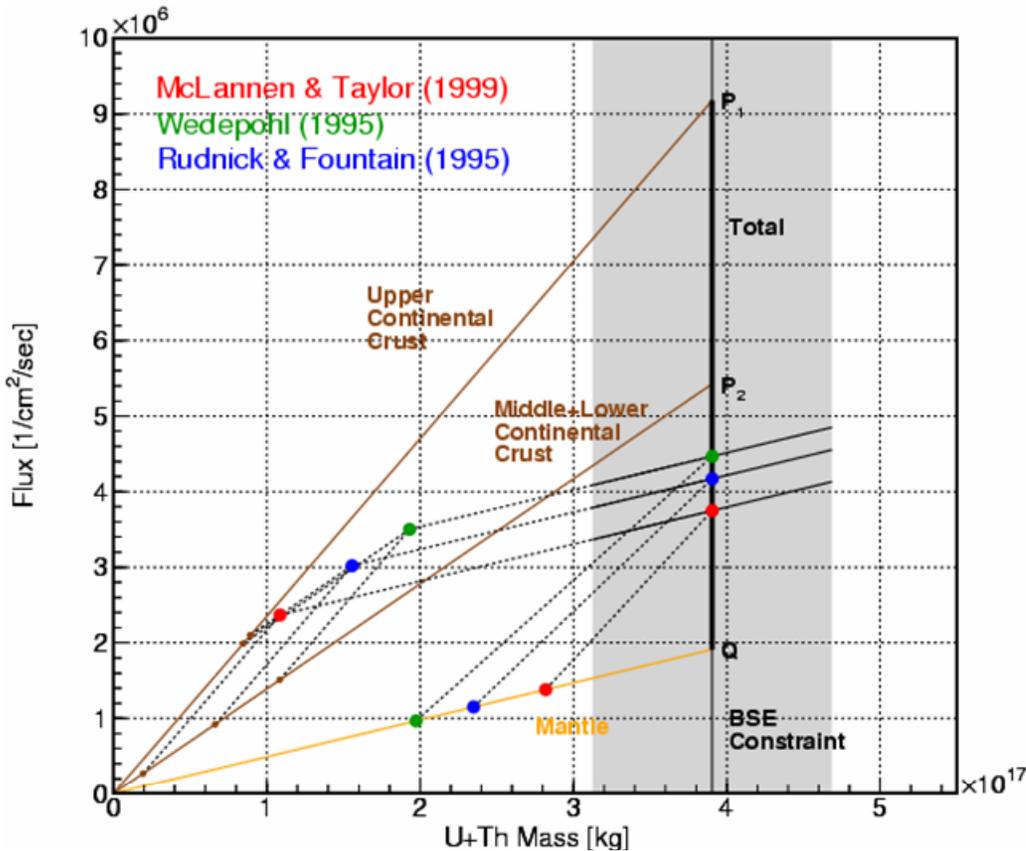
KamLAND における地球ニュートリノ観測



ニュートリノ地球科学 1

地殻組成モデルとニュートリノフラックスの関係

総量を保存(BSEモデル)し、地殻の増減分をマントルで補填



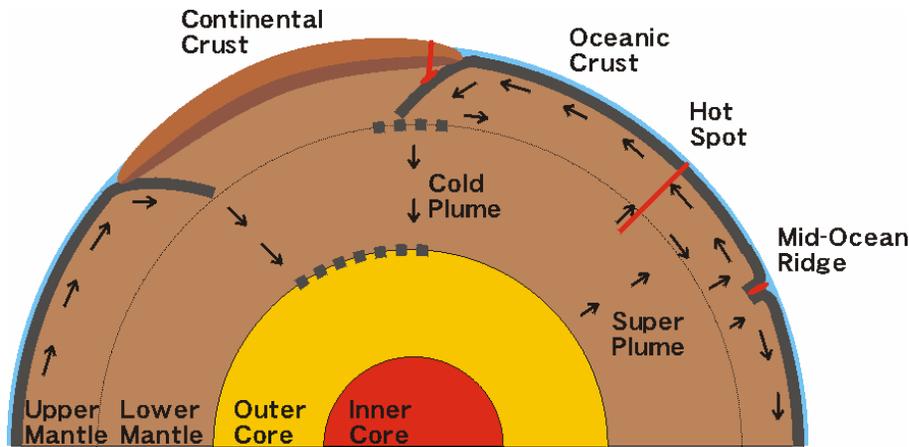
地殻組成モデルにより
フラックスが8%増減

BSEの20%の不定性は
同程度のフラックス
変化をもたらす

ニュートリノ地球科学 2

マンタルの組成に対する複数のモデル

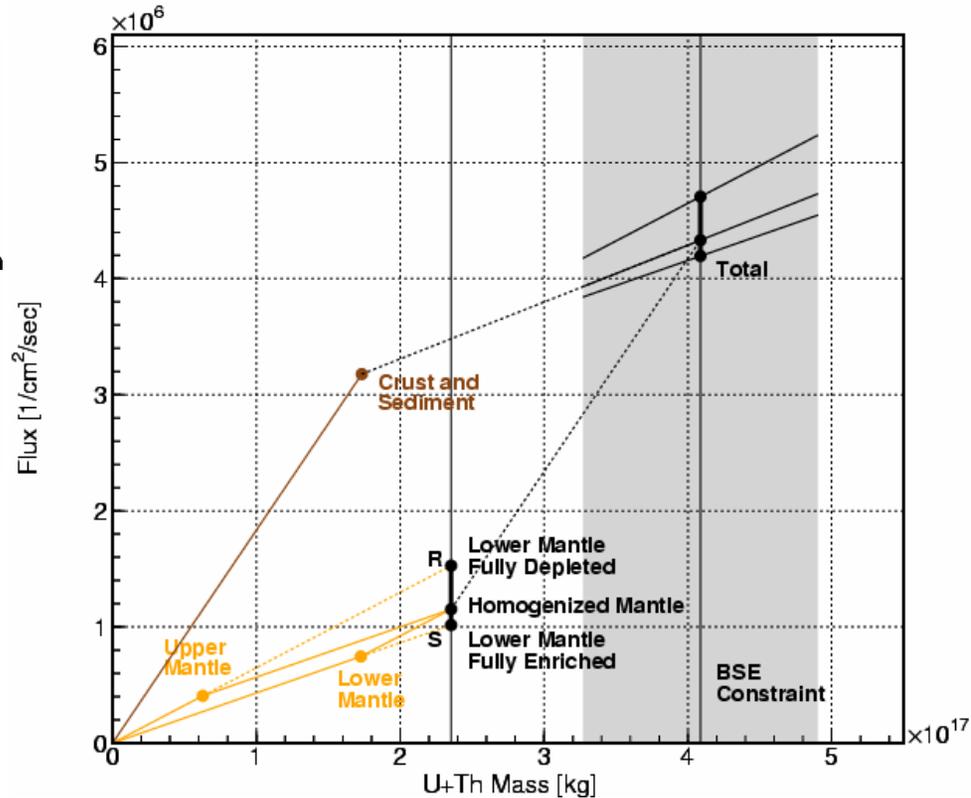
- **均質モデル**：マンタルの1層対流によりよく混合されている
- **分化モデル**：マンタルの2層対流により上部はU/Thに欠乏



一様に分布: 8.05 [TNU]

下部マンタルに集中: 7.10 [TNU]

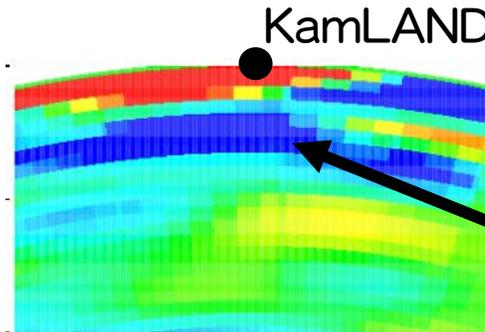
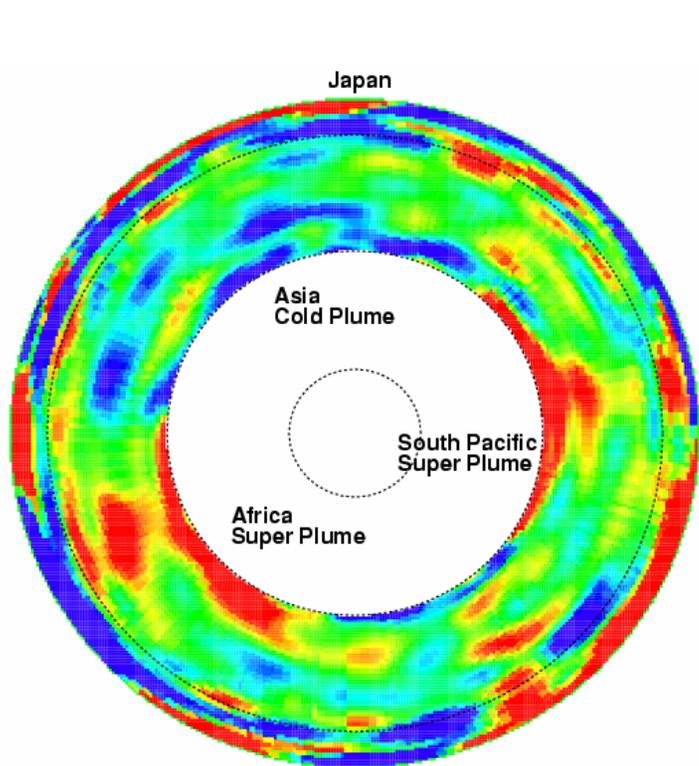
上部マンタルに集中: 10.67 [TNU]



マンタルからのフラックスが **12% 程度** 増減する
(総フラックスの**3%**程度)

ニュートリノ地球科学 3

- 沈み込み部分のマントルは海洋地殻に近い組成を持っているかも？
- 上昇流部分の組成も他と異なる可能性がある？



日本直下の地震波速度異常
沈み込みプレートの滞留？

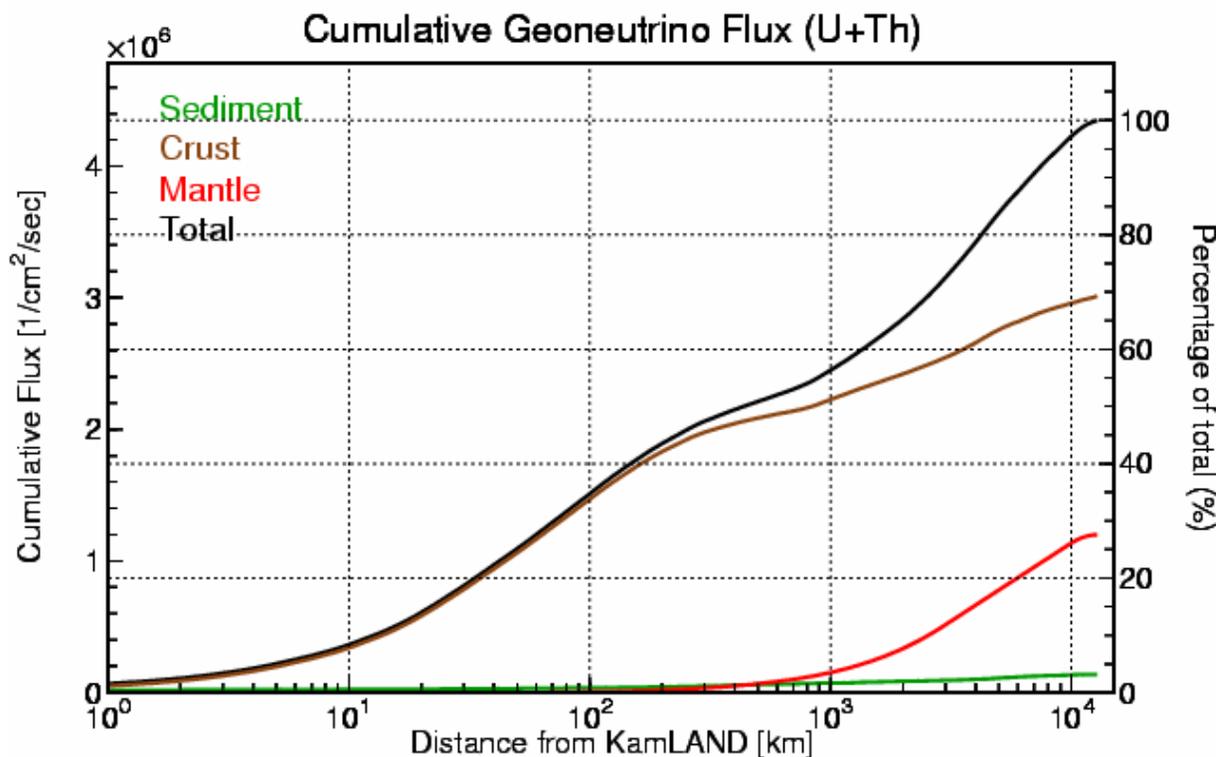
地震波速度	質量 [kg]	U系列 Flux [TNU]
ふつう	3.6×10^{24}	5.37
高速 (低温)	0.23×10^{24}	0.71
低速 (高温)	0.14×10^{24}	0.63

高速(低温)部分の組成を海洋地殻の値に近づけると
マントルからのフラックスは**6%程度**増える (全体の1-2%)
(マントル0.012ppm, 海洋地殻0.08ppm, プレートの10%を海洋地殻とする)

ここまでのまとめ

- 参照モデルによるニュートリノフラックス計算
 - U系列: 30.5 TNU
 - Th系列: 8.0 TNU
- U/Th の総量は隕石分析などに基づき計算
 - 見積もりに 20% 程度の不定性
 - ニュートリノにより直接のテストが可能
- マントルの構造や組成によりフラックスが変化
 - 1層モデルと2層モデルに 3% 程度の差
 - 高速(低温)領域の組成により 1-2% の差

近距離地質の影響



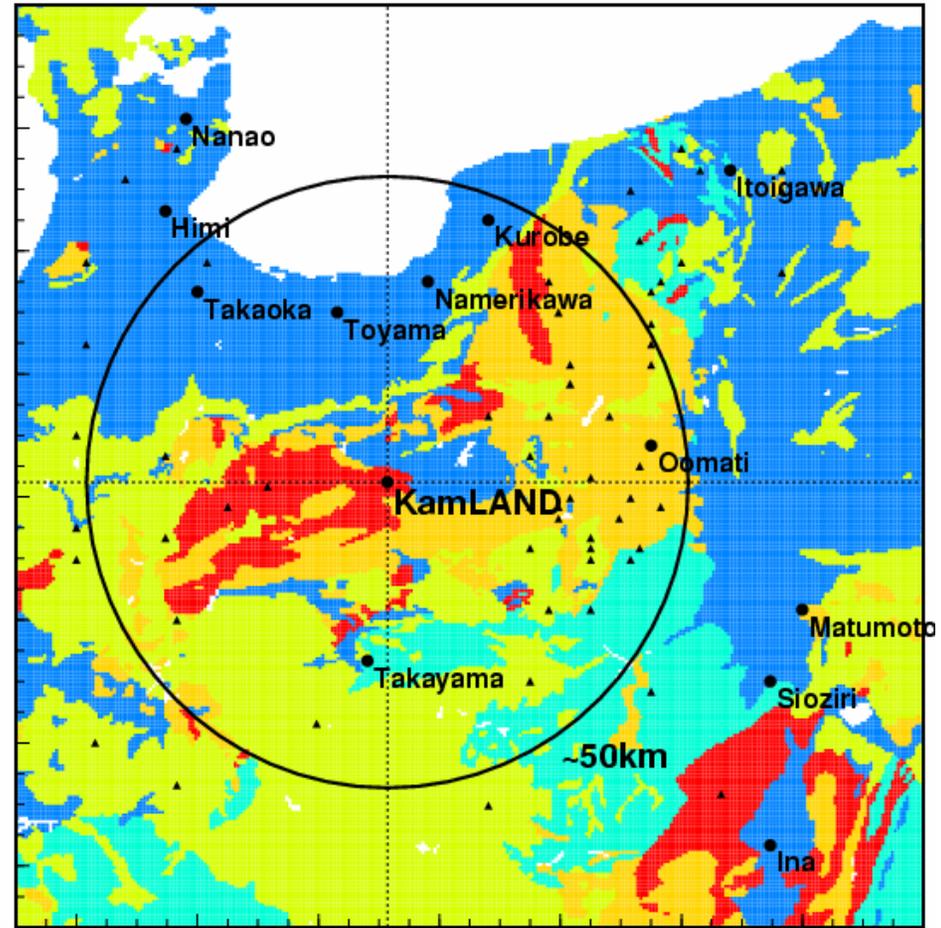
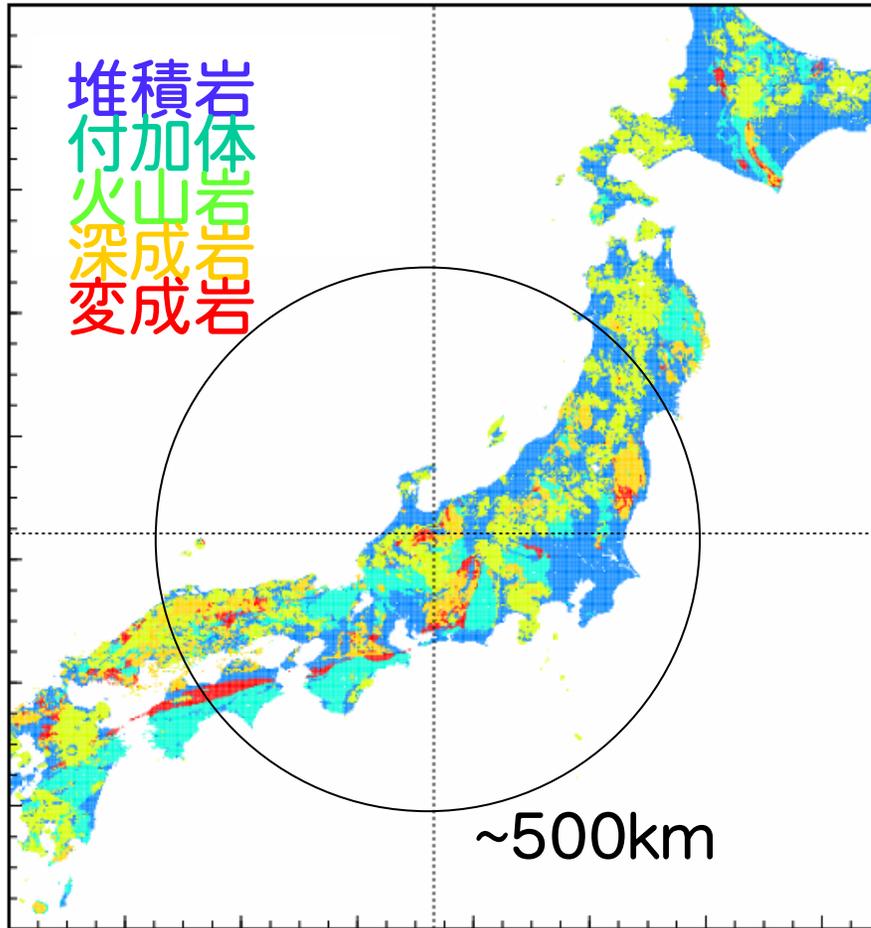
- 50%が半径500kmから
- 25%が半径50kmから

- 半径1kmからは1%

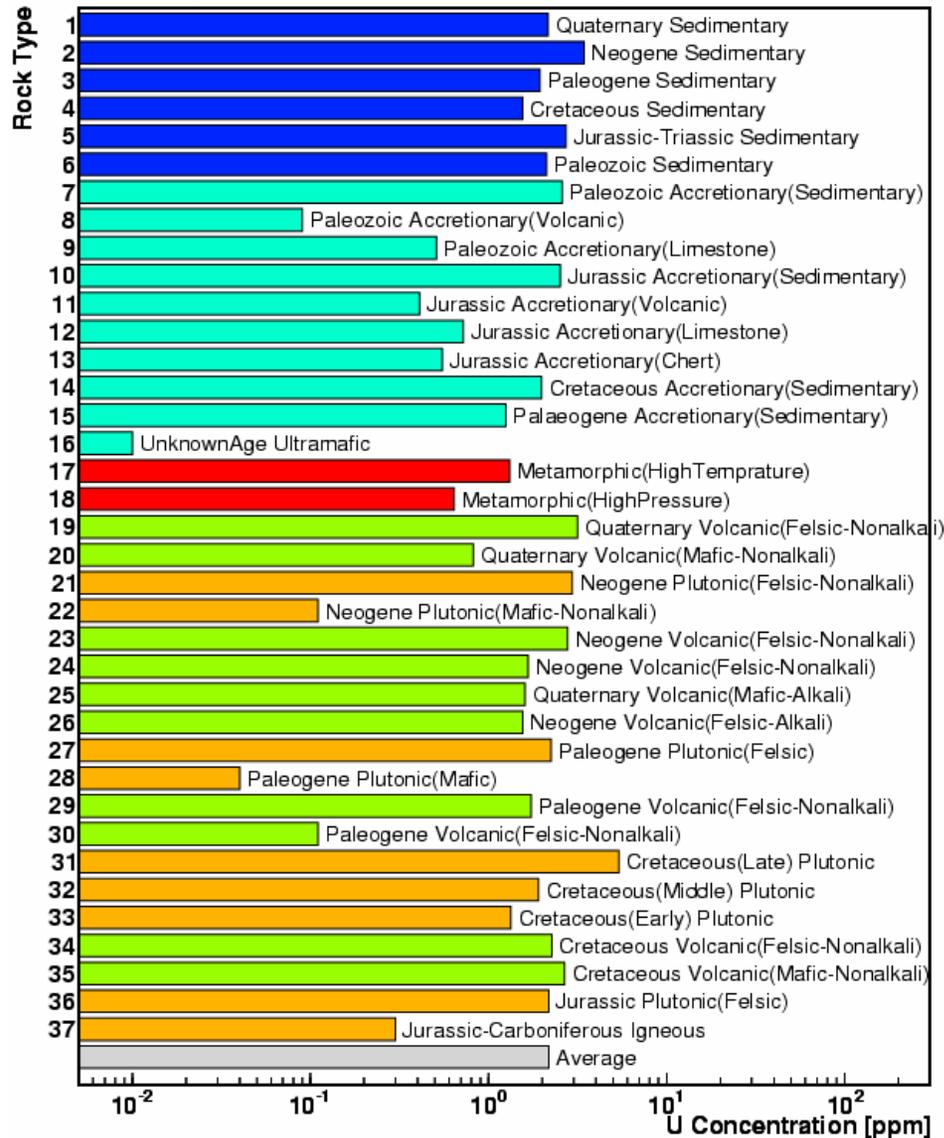
半径500km程度の表層地質を理解することが地球深部の議論を行うのに不可欠

周辺地質

- 火成岩はマグマ生成や上昇のプロセスに応じて，多様な組成を示す
- 表層は侵食や堆積の作用を受け，物質分化がおこる
- 一方で侵食や堆積は，異なった組成の岩石を混合させる作用も持つ



地球化学 – 日本島孤の組成 –



Togashi et.al. (2000)

(Geochemistry Geophysics Geosystems, volume 1 number 27)

- 日本の表層地質を37種に分類
- 各グループから計166個のサンプルを採取し組成を解析
- 分布面積で重みづけして上部地殻の平均組成を計算



日本の上部地殻の平均組成

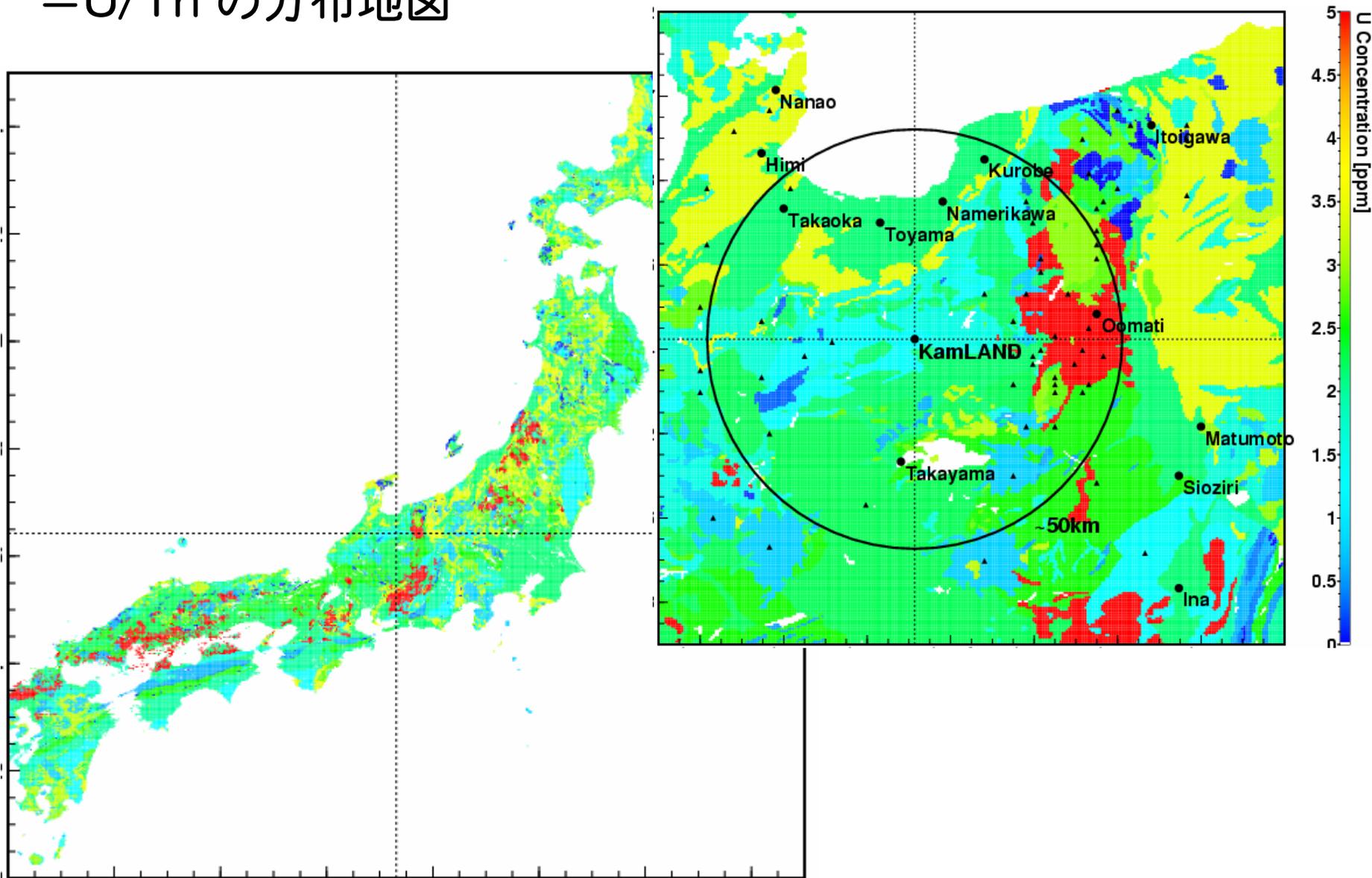
U: 2.32ppm
Th: 8.3 ppm

上部地殻全体の平均組成は

U: 2.8 ppm
Th: 10.7 ppm

地質図 + 岩石標本分析値

=U/Th の分布地図



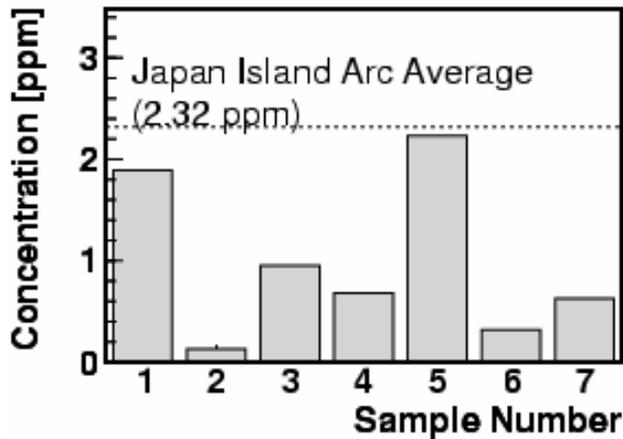
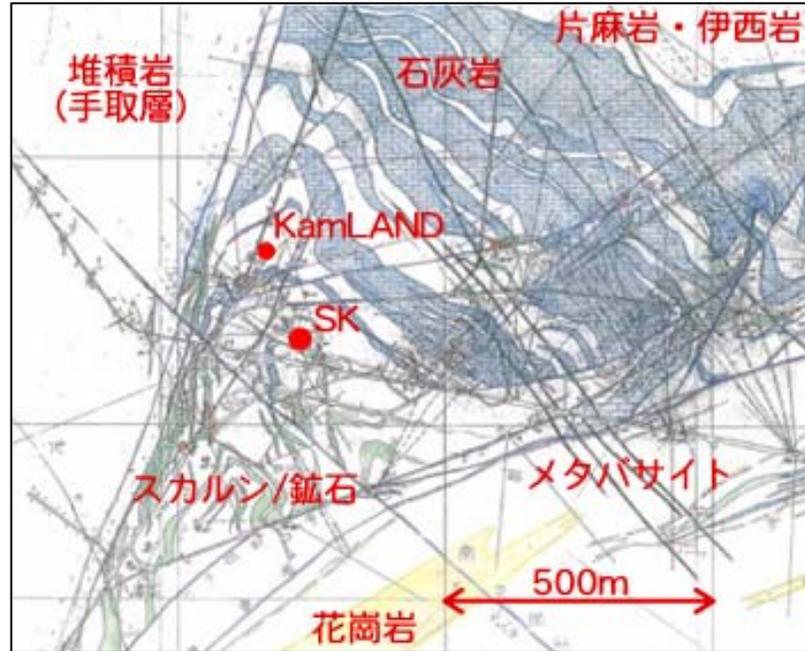
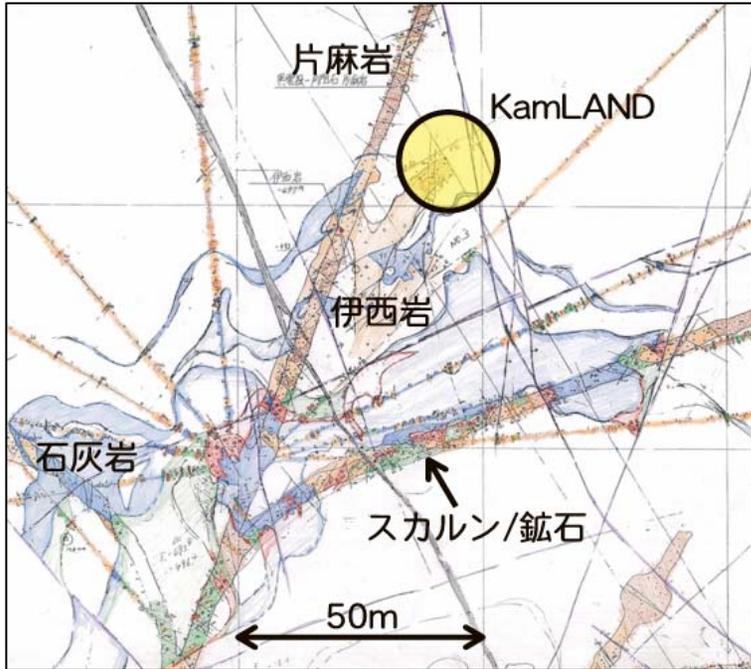
周辺地質の影響

表層の U/Th 分布が深さ 5km まで達しているとして
この範囲からのニュートリノフラックスを計算

	U 系列 [TNU]	Th 系列 [TNU]
全ての地質グループの組成に 日本全体の平均組成を使用	4.8	0.96
各地質グループの組成に グループ全サンプルの平均を使用	3.8	0.97
各地質グループの組成に KamLAND 周辺のサンプルの値を使用	4.6	0.83
地球全体	30.1	6.7

全フラックスに対する周辺地質の影響は **4 %程度**

超近距離地質 – 神岡鉱山地質 –



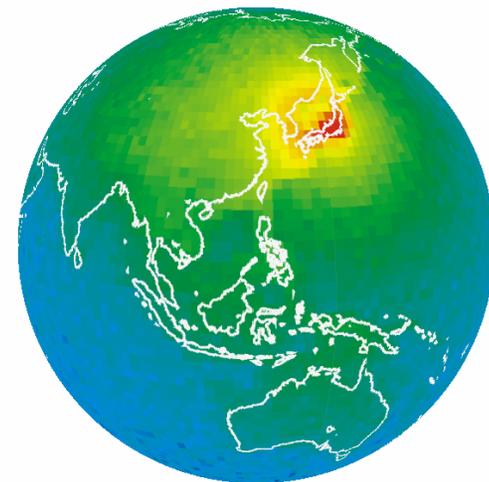
- 1: 緑泥石片麻岩
- 2: 珧長質片麻岩
- 3: 伊西岩
- 4: スカルン
- 5: 伊西岩
- 6: 伊西岩
- 7: 伊西岩

- 全てのサンプルで U/Th 含有量は日本平均より小さい
- 石灰岩中には U/Th はほとんど含まれない

全フラックスに対する影響は **1%以下**

第2部

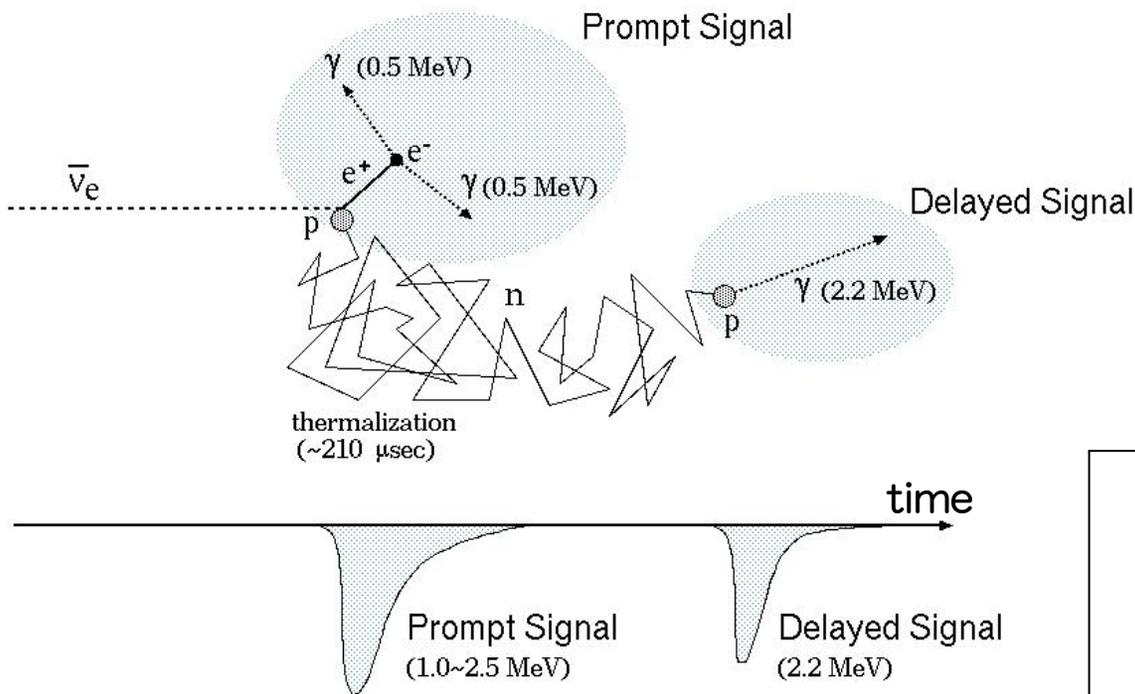
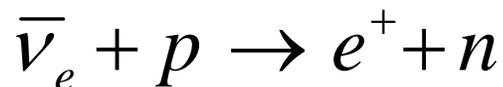
KamLAND実験における 地球ニュートリノの観測



1. KamLAND 検出器
2. イベント再構成, イベントセレクション
3. バックグラウンドの見積もり
4. 解析

KamLAND 検出器1：検出原理

- 1000ton の有機液体シンチレータでニュートリノを検出
- 水素原子核との逆ベータ崩壊反応を利用



時間的、空間的に相関した信号を検出することで、バックグラウンドを大幅に削減

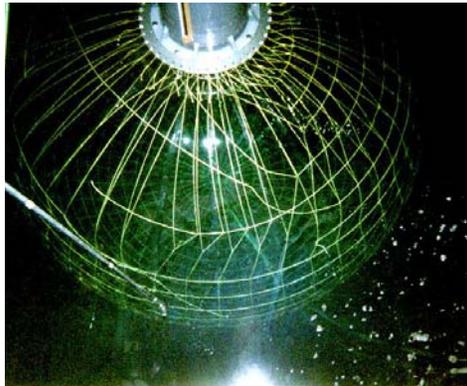
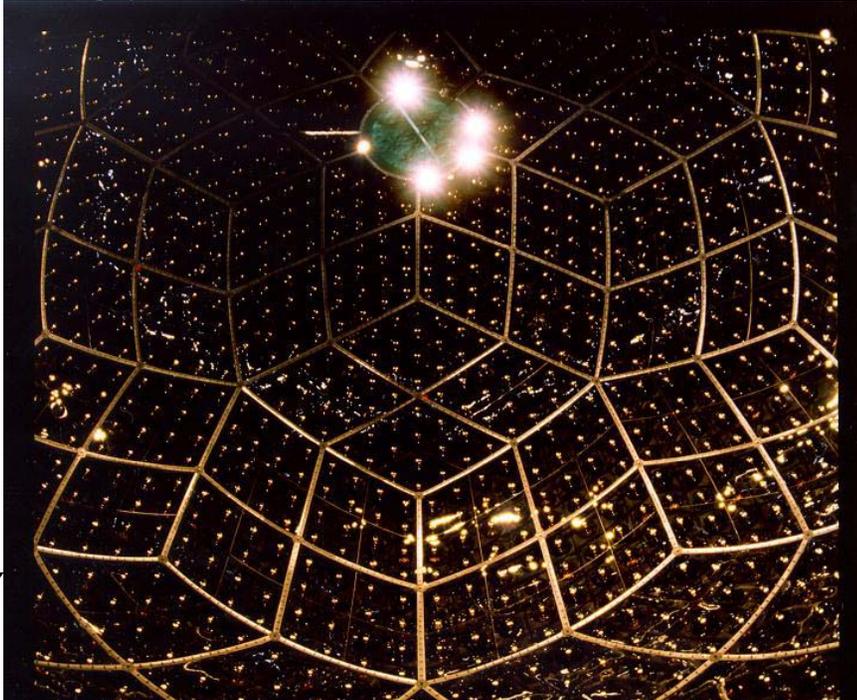
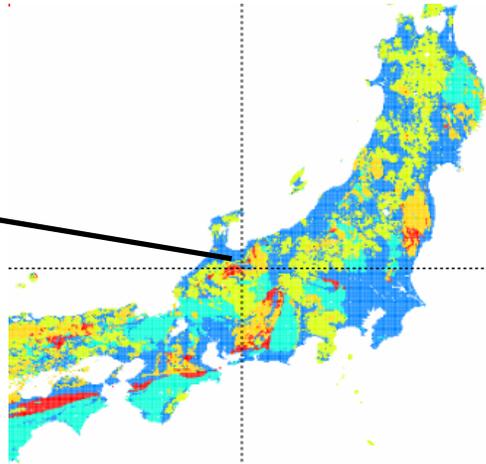
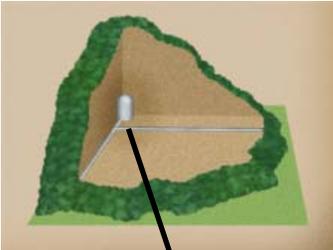
$$E_{\text{threshold}} = 1.8 \text{ MeV}$$

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

$$E_{\text{geo-}\nu_e} : 0 \text{ MeV} \sim 3.3 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{prompt}} : 1.0 \text{ MeV} \sim 2.5 \text{ MeV}$$

KamLAND 検出器 2



KamLAND 検出器 3

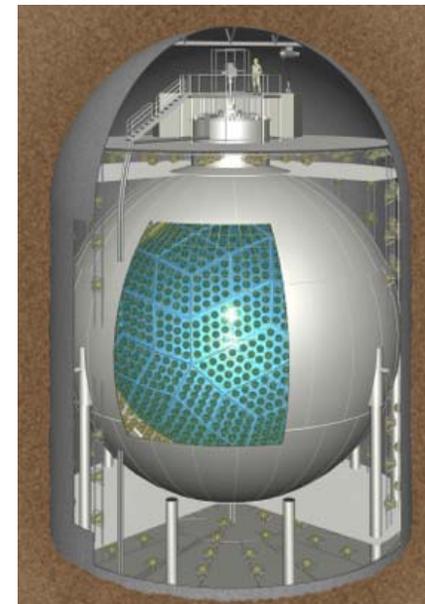
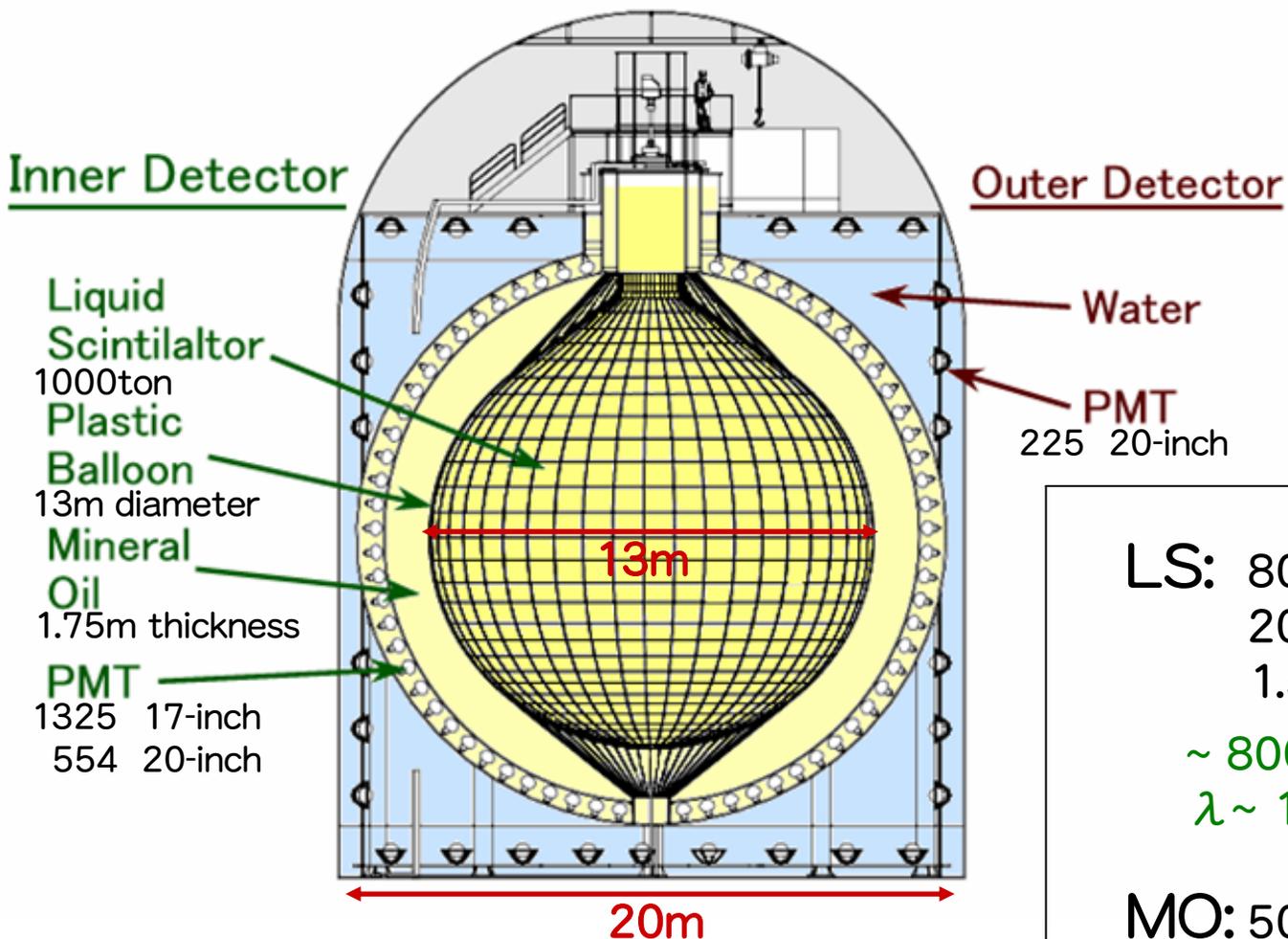


photo-coverage: 34%
~ 500 p.e. / MeV

LS: 80%: dodecane
20%: pseudocumene
1.5g/l: PPO

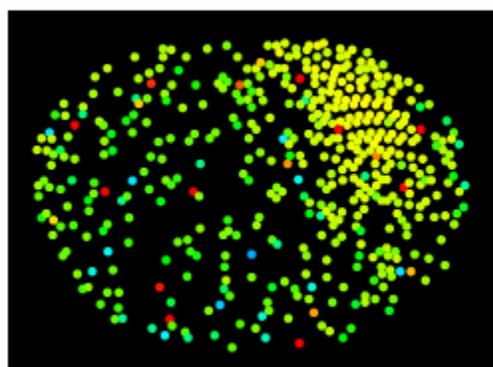
~ 8000 photons/MeV
 $\lambda \sim 10\text{m}$

MO: 50%: dodecane
50%: isoparaffin

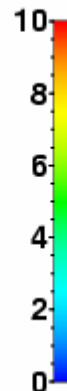
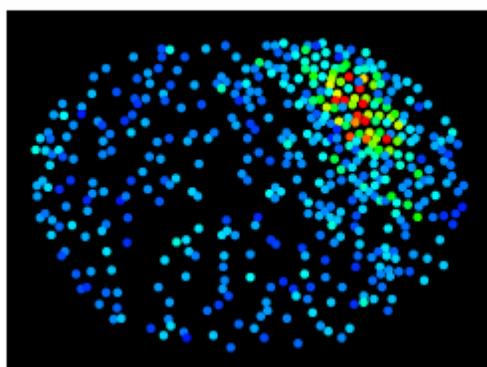
$\rho_{\text{LS}} / \rho_{\text{MO}} = 1.0004$

KamLAND イベント：低エネルギーイベント

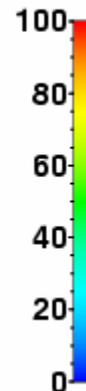
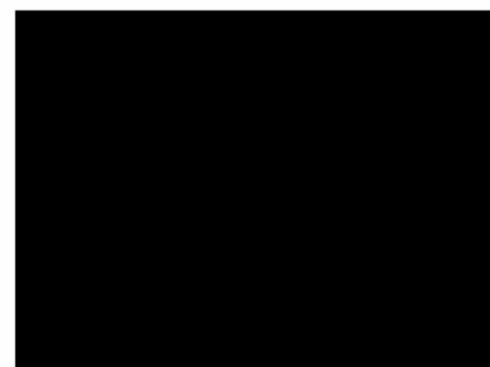
ID Hit Time



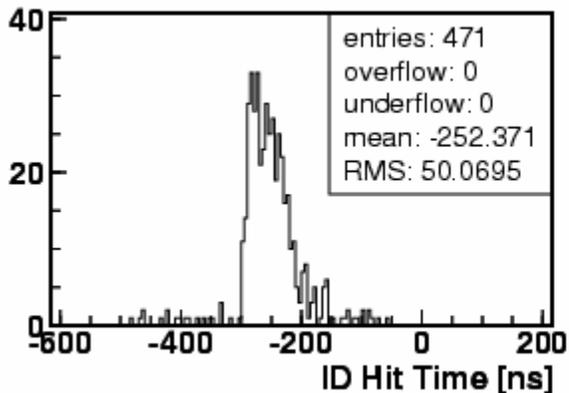
ID Hit Charge



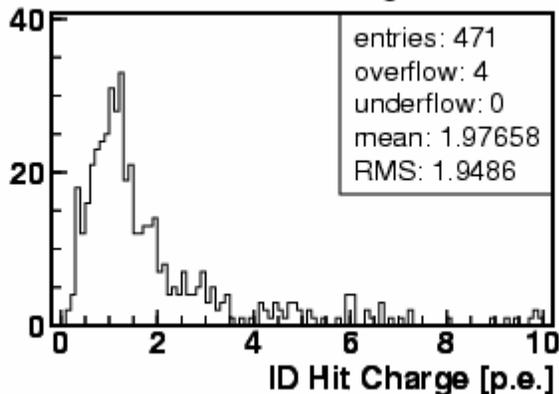
OD Hit Charge



ID Hit Time



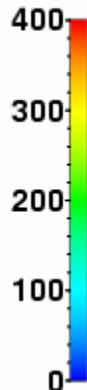
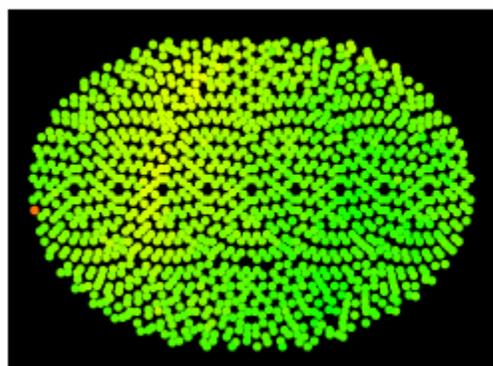
ID Hit Charge



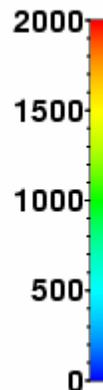
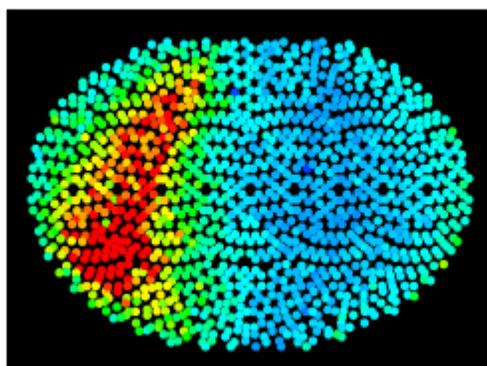
RunNumber:1215
EventNumber:24744
EventTime:1028730596 (2002-08-08 08:29:56 JST)
TimeStamp:0001:9aa6:50ec (172.238956300 sec)
TriggerType:0a000002 (History Prompt IdToOd)
NSum2:436
NIdWaves:477
:
NIdHits:471 (+6)
NOdHits:0 (+0)
TotalCharge:930.97

KamLAND イベント：ミューオンイベント

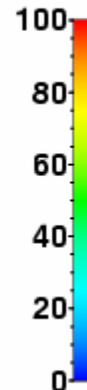
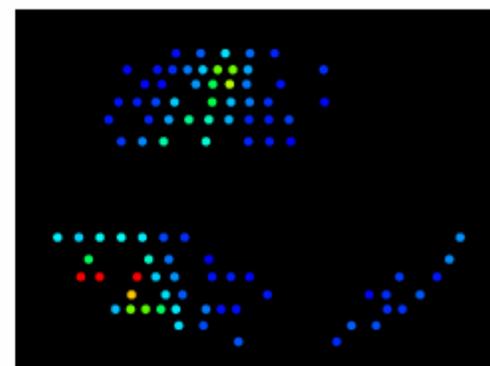
ID Hit Time



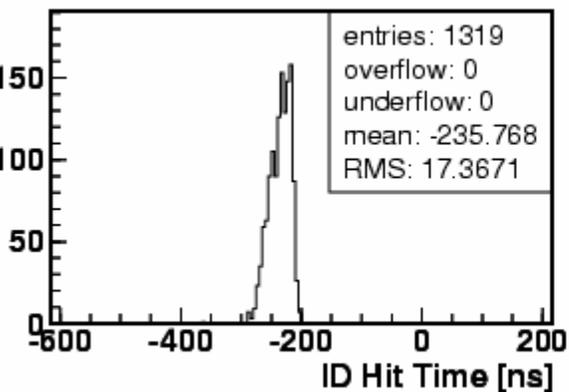
ID Hit Charge



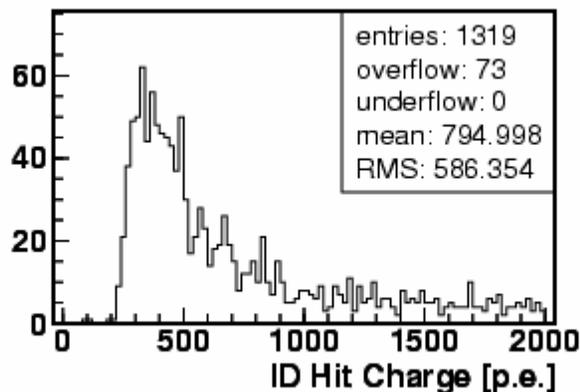
OD Hit Charge



ID Hit Time



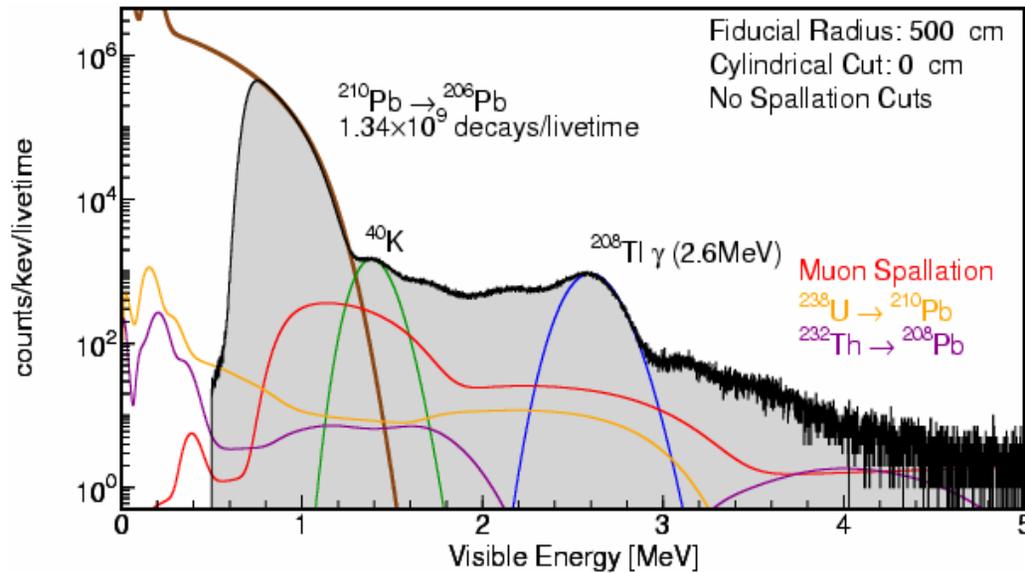
ID Hit Charge



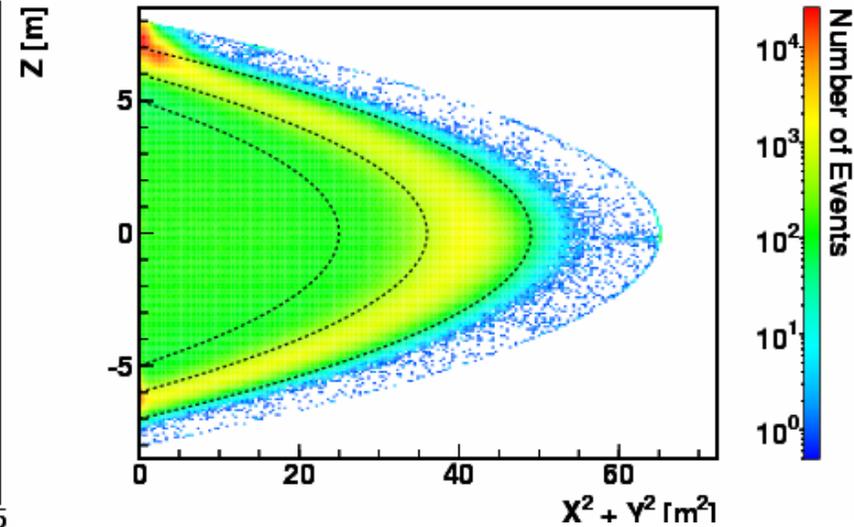
RunNumber:1215
EventNumber:5235
EventTime:1028730508 (2002-08-08 08:28:28 JST)
TimeStamp:0000:ca24:9fee (84.784946750 sec)
TriggerType:fb100002 (History OdTop Delayed Prompt IDT)
NSum2:1319
NIdWaves:1321
.
NIdHits:1319 (+2)
NOdHits:92 (+2)
TotalCharge:1.0486e+06

Detector Activity (Singles Spectrum)

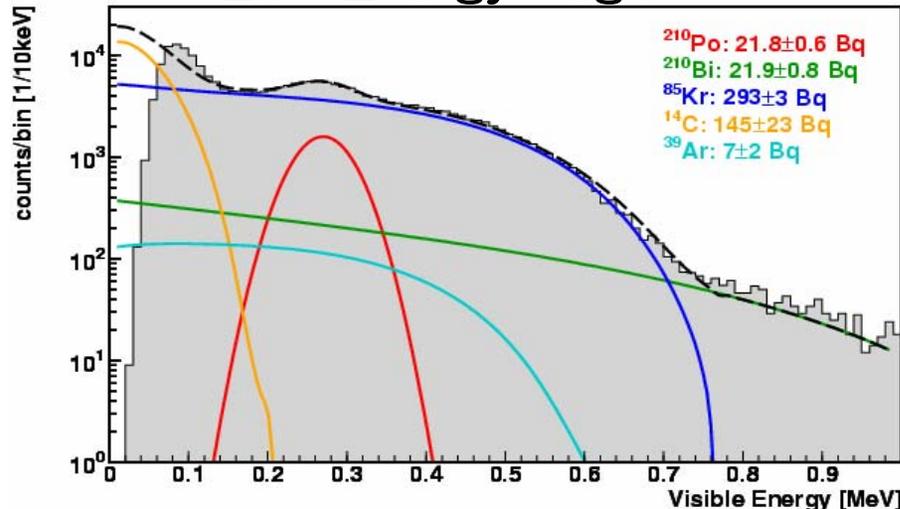
Normal Trigger Range



Event Vertices



Low Energy Region



Major Background Sources:

LS impurity (^{210}Pb , ^{85}Kr , ^{39}Ar)
 extrinsic gamma (^{40}K , ^{208}Tl)
 muon spallation (^{10}C , ^{11}C , ^{12}B , ...)

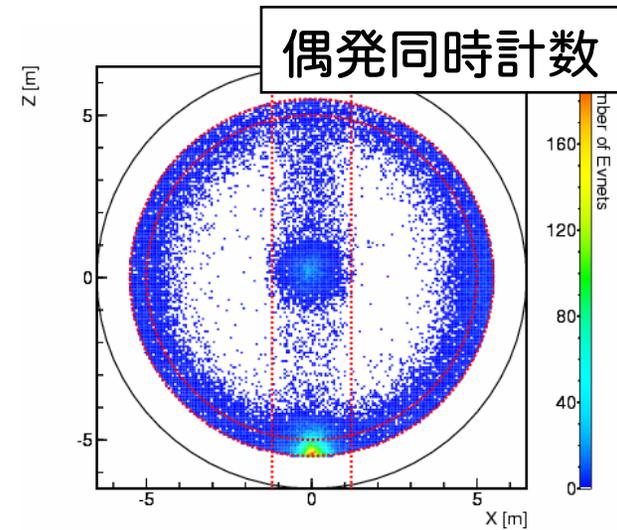
Measured LS impurity:

U: 3.5×10^{-18} g/g
 Th: 5.2×10^{-17} g/g

イベントセレクション

有効体積

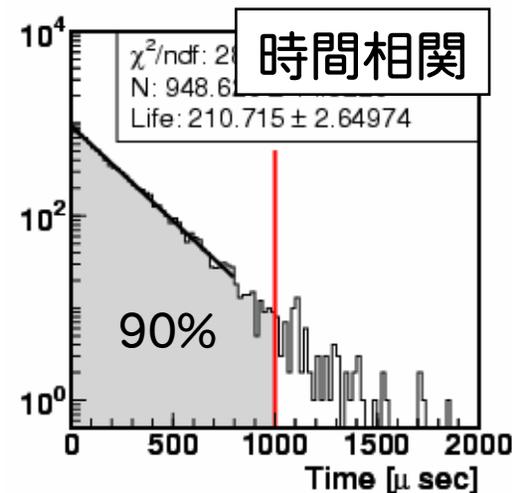
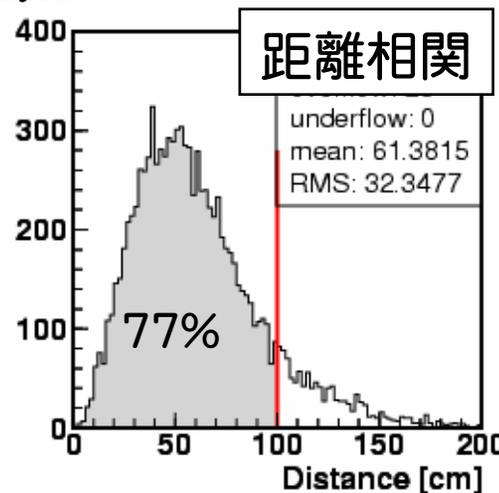
- 中心より半径 500 cm を選択
- 中心軸周辺半径 120 cm を除去
- ミューオン後の破砕原子核崩壊の除去
 - シャワーミュオン後, 全ボリュームを2秒
 - 非シャワーミュオン後, トラック沿い 3 m を 2 秒



遅延同時計数

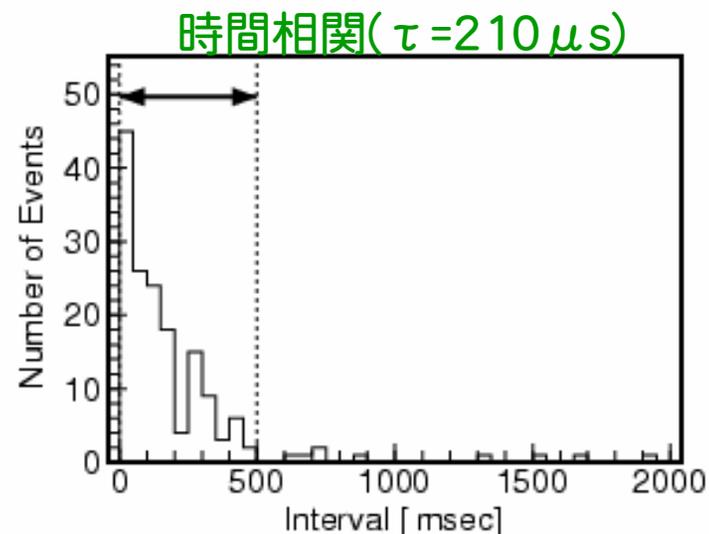
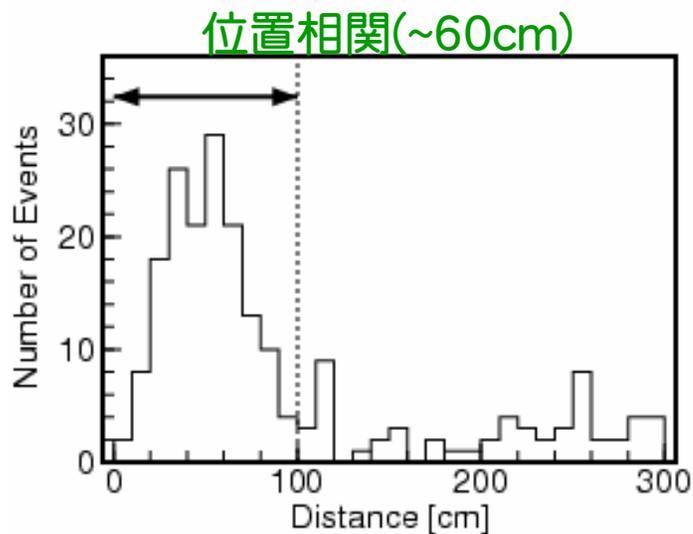
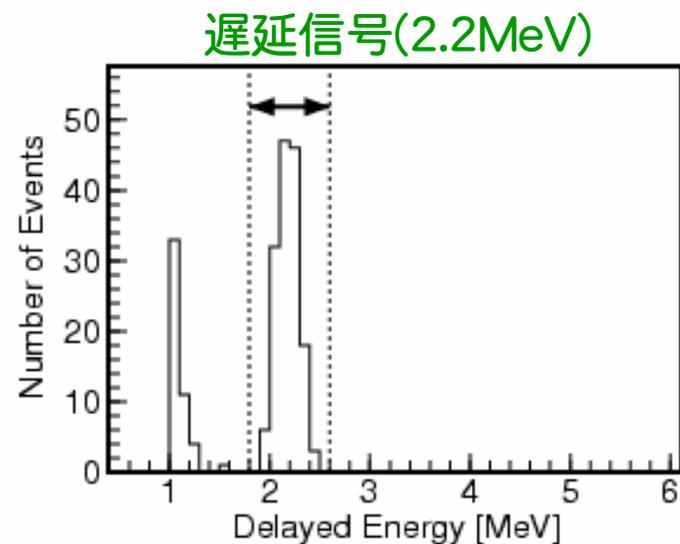
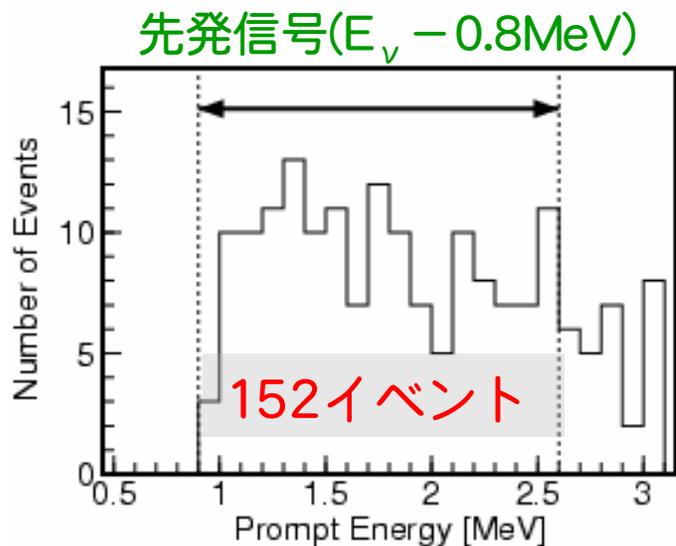
- 位置相関: $0 < \Delta R < 100\text{cm}$
- 時間相関: $0.5 \mu\text{sec} < \Delta T < 1000 \mu\text{sec}$
- 遅延信号: $1.8 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$

偶発同時計数を減らすため、
原子炉ニュートリノ解析より
厳しめのカット

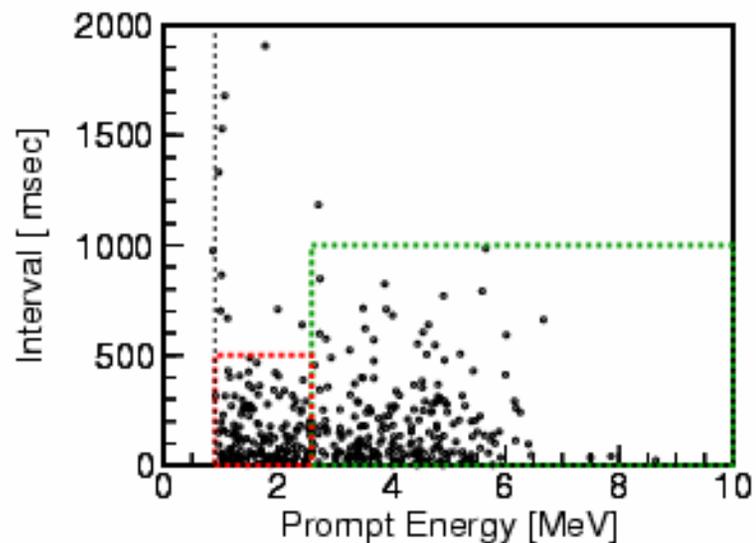
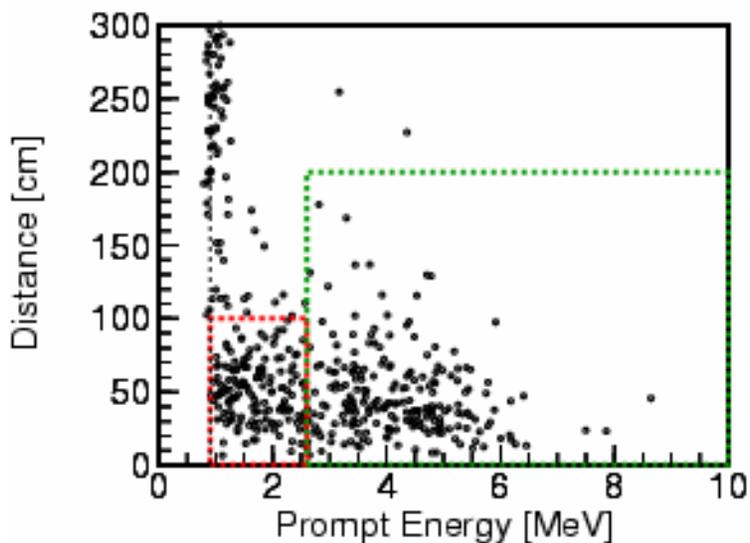
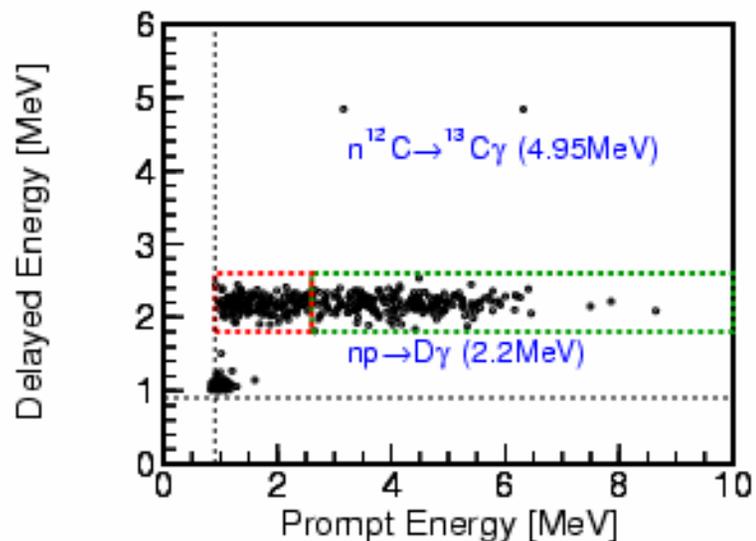
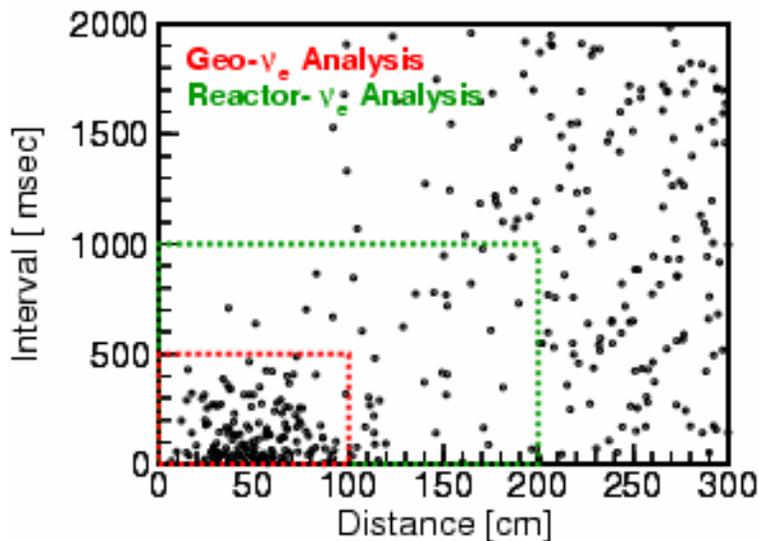


ニュートリノイベント候補

- 観測時間: 749.14 days
- ターゲット数: 3.459×10^{31}



ニュートリノイベント候補 (N-2 プロット)



バックグラウンド概要

- ニュートリノ
 - 原子炉： 80.4 ± 7.2
 - 使用済み燃料 (Ru, Ce, St)： 1.9 ± 0.2
- 偶発同時計数 (accidental)： 2.4 ± 0.0077
- 相関信号 (correlated)
 - ミューオンによる原子核破砕反応 (${}^9\text{Li}, \dots$)： 0.30 ± 0.047
 - ミューオンによる高速中性子 (検出器外起源)： < 0.1

- バックグラウンド見落としは虚偽の地球ニュートリノ信号となる
- 中性子を生成する反応は特に慎重に

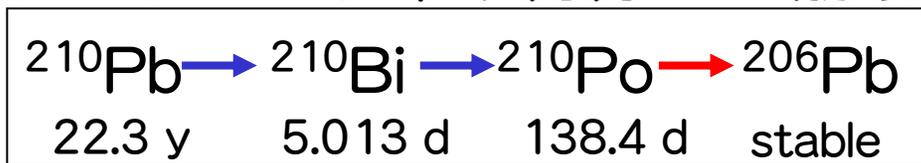
バックグラウンド概要

- ニュートリノ
 - 原子炉： 80.4 ± 7.2
 - 使用済み燃料 (Ru, Ce, St)： 1.9 ± 0.2
- 偶発同時計数 (accidental)： 2.4 ± 0.0077
- 相関信号 (correlated)
 - ミューオンによる原子核破砕反応 (${}^9\text{Li}, \dots$)： 0.30 ± 0.047
 - ミューオンによる高速中性子 (検出器外起源)： < 0.1

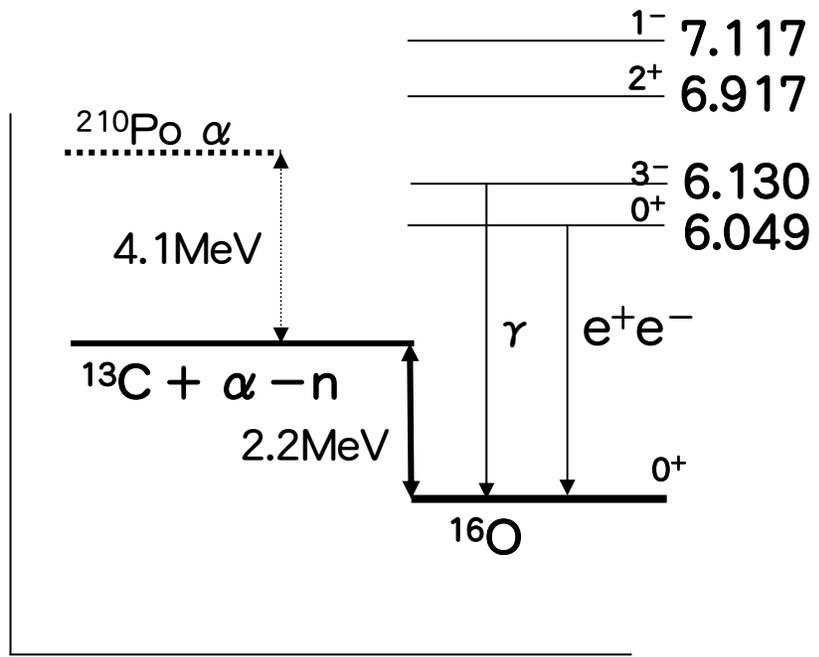
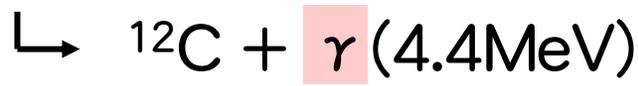
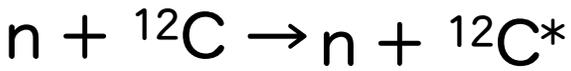
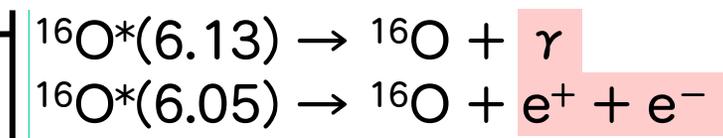
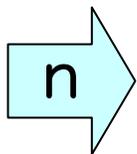
 - 短寿命核の崩壊連鎖
 - 自発核分裂 (${}^{238}\text{U}, \dots$)
 - 中性子放出核 (${}^{210}\text{Tl}, \dots$)
 - (α, n) 反応, (γ, n) 反応
 - 太陽ニュートリノによる重水素の分解 (disintegration)
 - 大気ニュートリノと ${}^{12}\text{C}$ の反応

(α, n) 反応概要

シンチレータ中不純物の α 崩壊



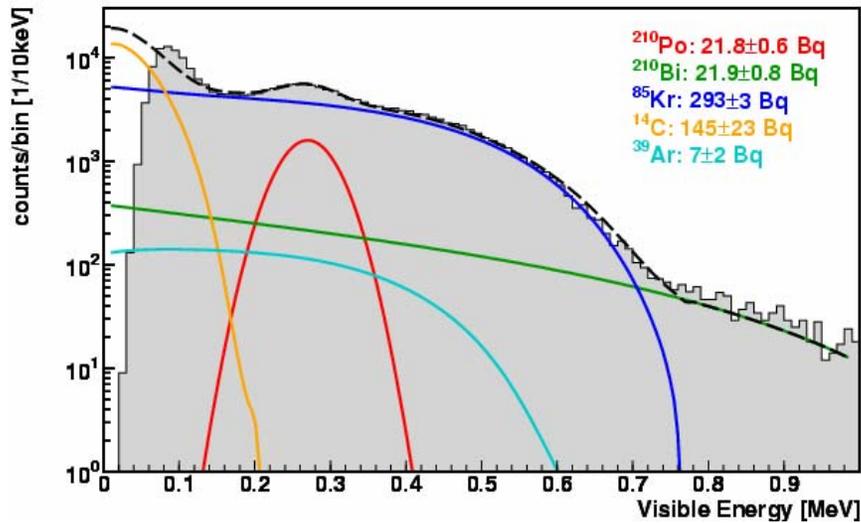
- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}$
- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}^*$
- $^{14}\text{N} (\alpha, n) ^{17}\text{F}$
- $^{15}\text{N} (\alpha, n) ^{18}\text{F}$
- $^{17}\text{O} (\alpha, n) ^{20}\text{Ne}$
- $^{18}\text{O} (\alpha, n) ^{21}\text{Ne}$



先発信号



(α, n) 反応： ^{210}Po 崩壊数



^{210}Po 崩壊数:

21.1 Bq

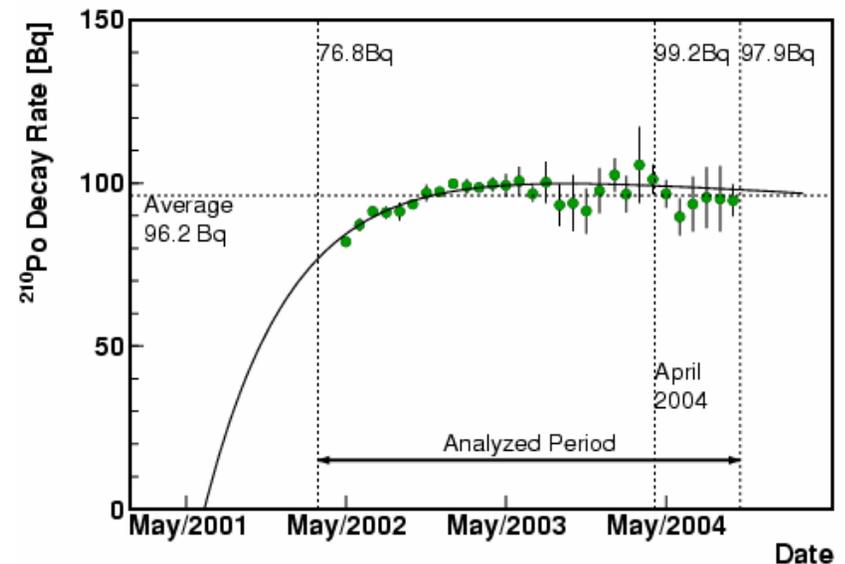
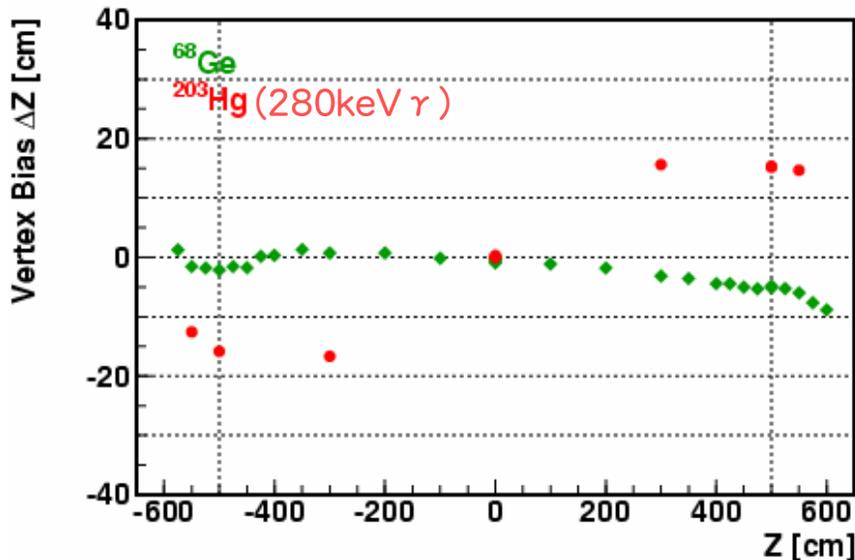
1.50×10^9 decays/lifetime

不定性:

低エネルギーでの Vertex Bias

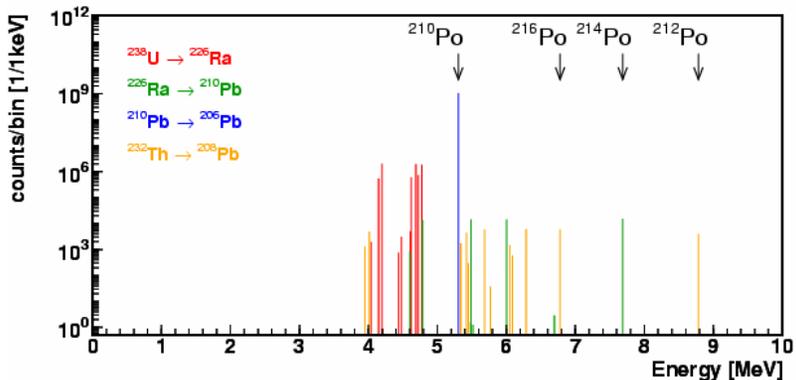
^{210}Po の崩壊非平衡

⇒ 10% のエラー

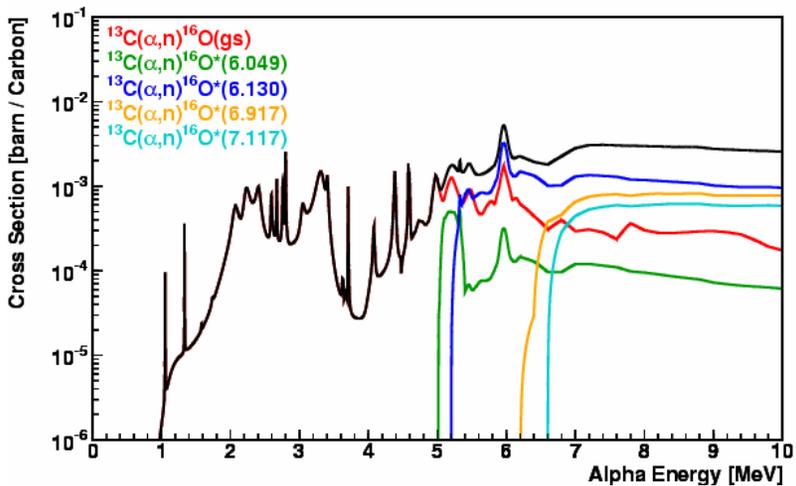


(α, n) 反応：中性子生成

シンチレータ不純物による α スペクトル



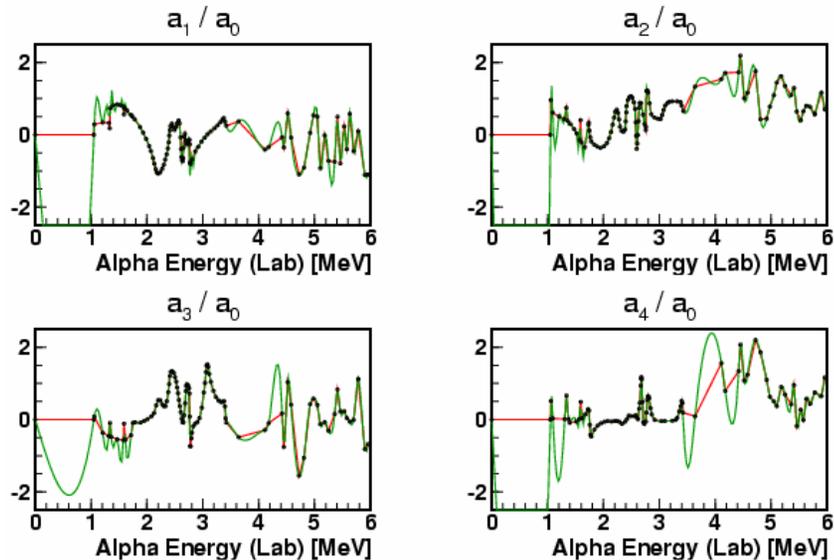
$^{13}\text{C}(\alpha, n)$ の反応断面積



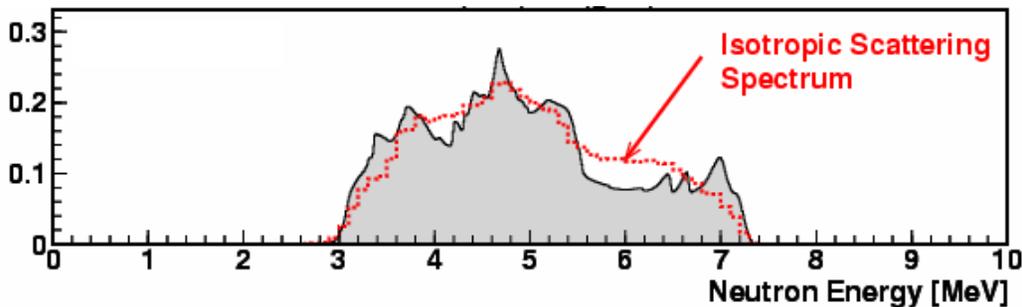
不定性：

反応断面積 \Rightarrow 20%のエラー

$^{13}\text{C}(\alpha, n)$ の角分布
(Legendre Coefficients)

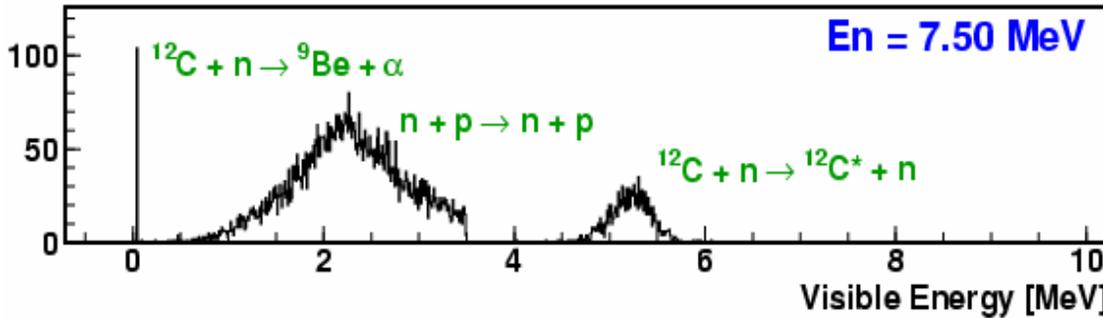


計算された中性子スペクトル



(α, n) 反応：陽子散乱と可視エネルギー

中性子の可視エネルギーの計算 (MC)

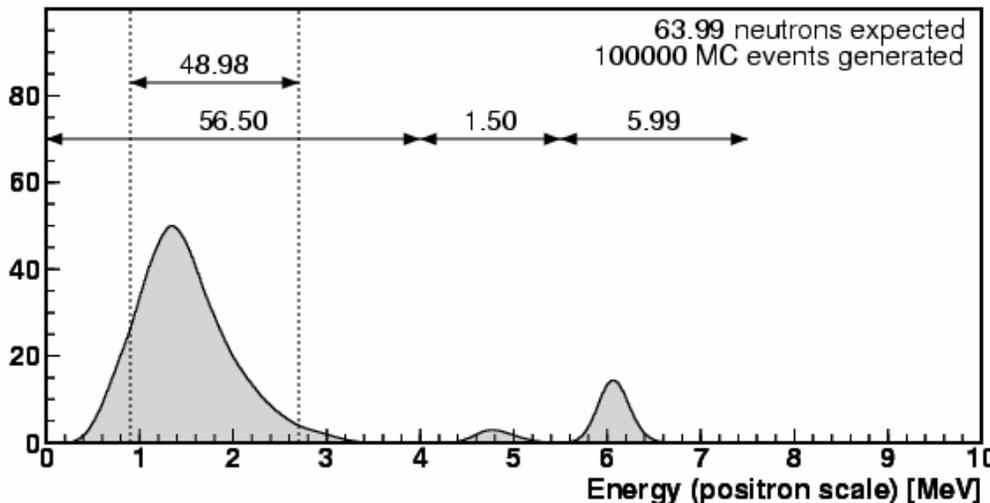


- 中性子-陽子散乱 (MC)
- 陽子のエネルギー損失
- シンチレーション光の生成

$$dN_{\text{sci}} = \frac{1}{1 + k_b \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)^2 + \dots} dE$$

- 陽子のクエンチングは直接測定されていない
- α で決めた Birks と γ で決めた Birks が(単純には)一致しない

計算された (α, n) 反応のスペクトル



不定性：

クエンチング係数

(α, n) 角分布

⇒ 横方向10%のエラー

バックグラウンドのまとめ

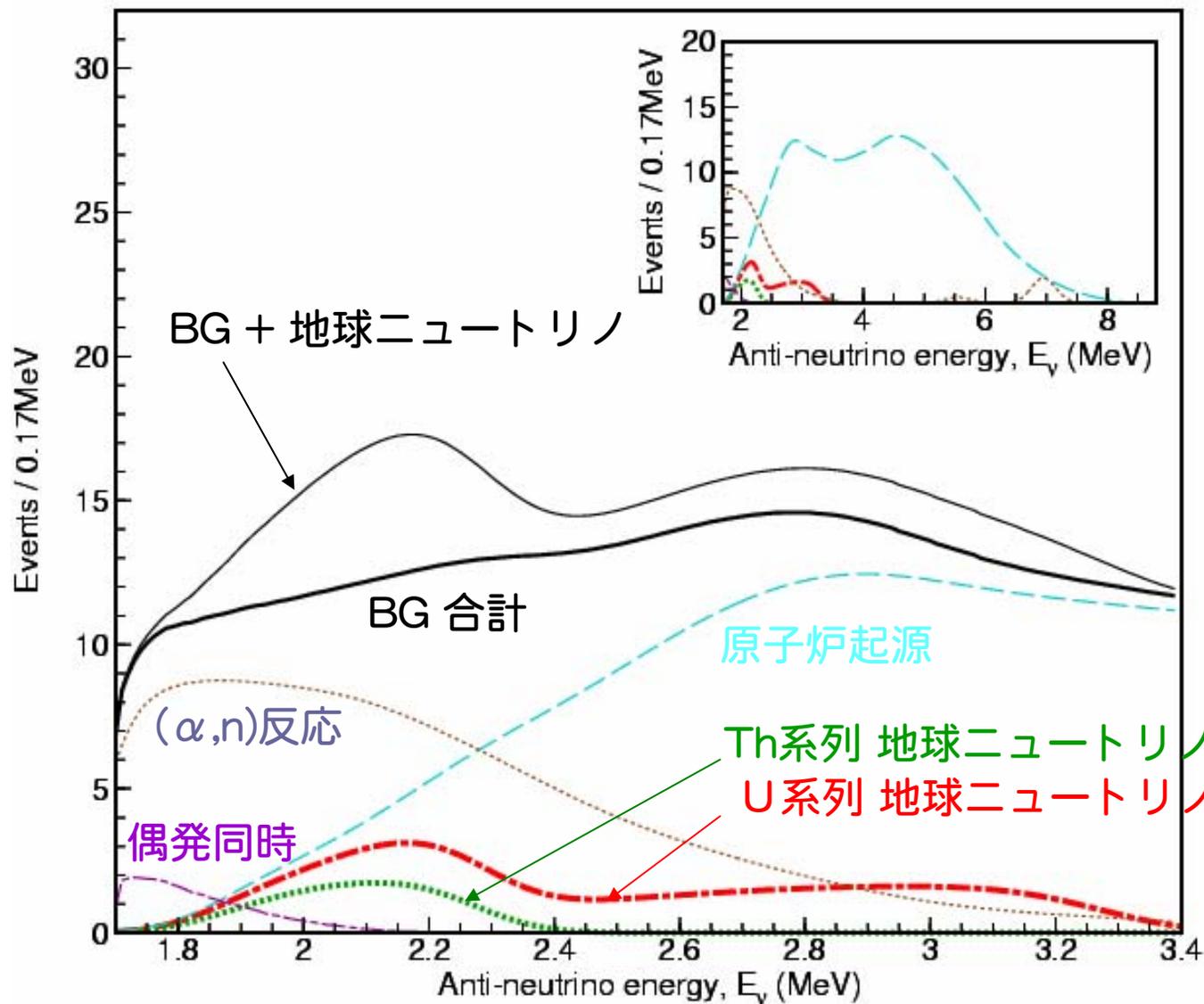
- 原子炉ニュートリノ起源
 - 短寿命核: 80.4 ± 7.2
 - 長寿命核 (使用済み燃料) : 1.9 ± 0.2
- 宇宙線ミュオン起源
 - 中性子 (検出器内) negligible
 - 高速中性子 (検出器外) < 0.1
 - 原子核破碎反応 (${}^9\text{Li}$) 0.30 ± 0.047
- 放射性不純物起源
 - 偶発同時計数 2.38 ± 0.0077
 - 崩壊連鎖 negligible
 - 自発核分裂 < 0.1
 - (α, n) 反応 42.4 ± 11.1
 - (γ, n) 反応 negligible



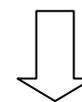
観測数
は152

合計: 127.4 ± 13.3 (syst.)

予測スペクトル

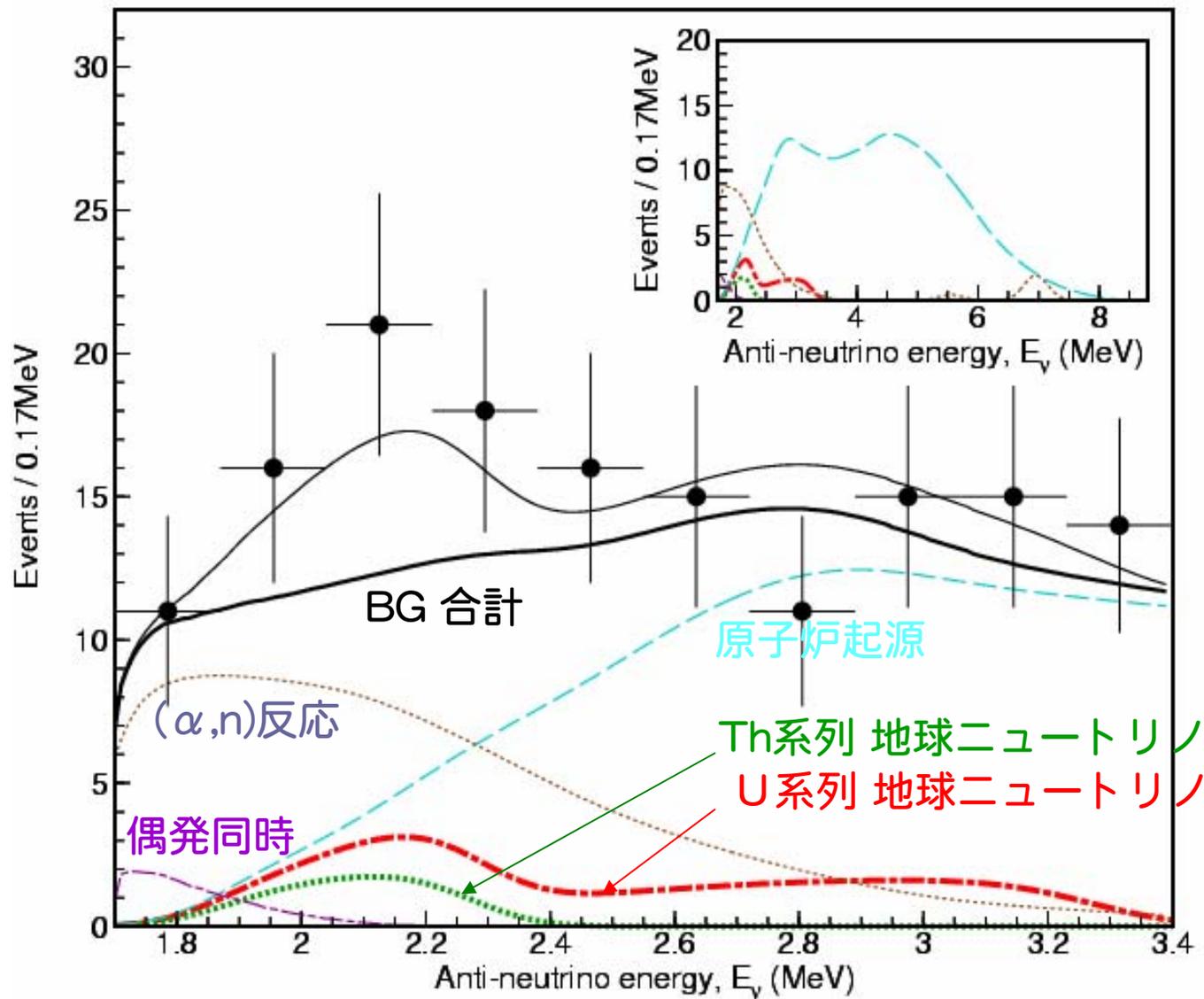


参照地球モデルによる
予測イベント数



(4.0 events)
(14.9 events)

観測データ

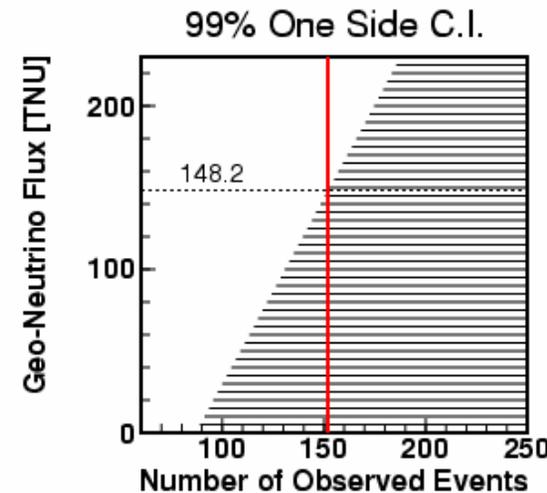
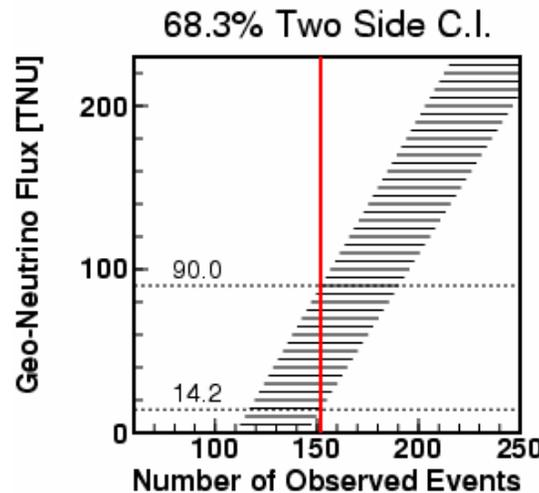
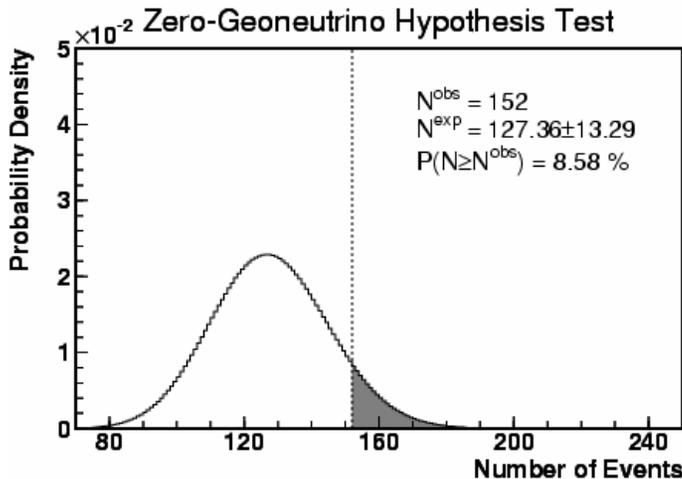


イベント数解析

- 観測数: 152
- バックグラウンド数: 127.4 ± 13.3 (syst.)
- 超過数: 24.6 ± 17.9
- 系統誤差: 5.0% (主に有効体積; バックグラウンドのエラーと相関)

$$P(N; F_{\text{geo}}) = \int_{\nu} d\nu \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\nu - N^{\text{expected}})^2}{2\sigma^2}} \times \frac{\nu^N e^{-\nu}}{N!} \right)$$

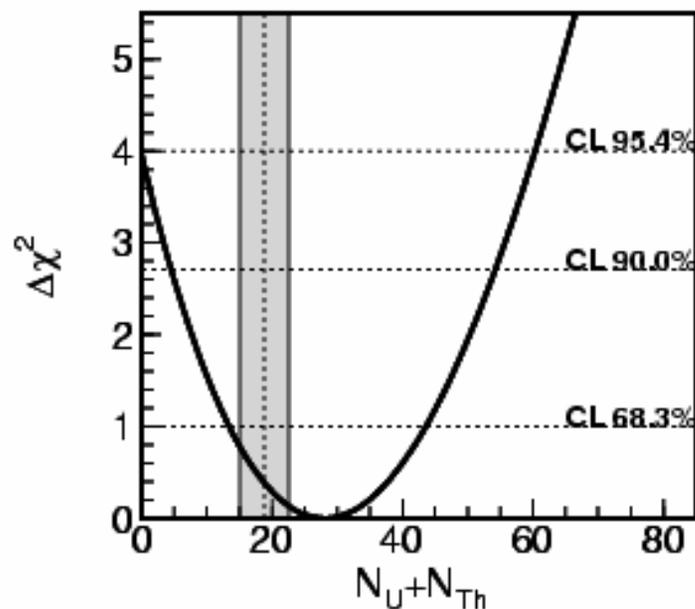
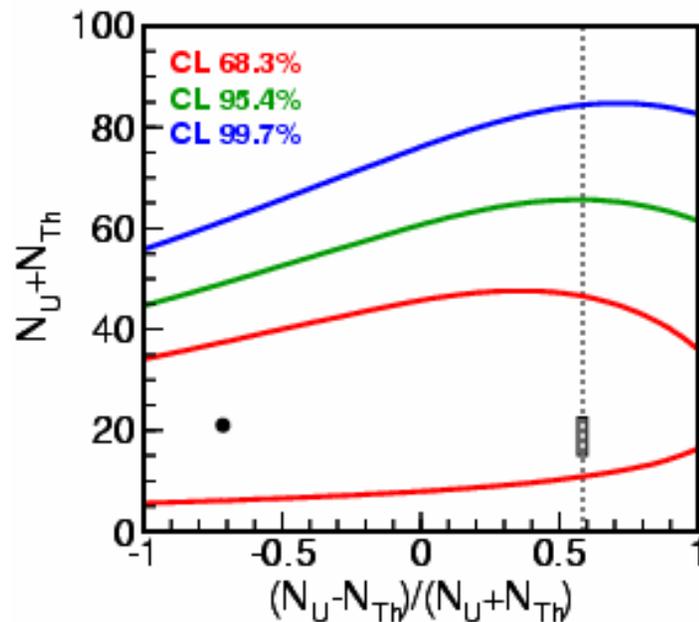
与えられたフラックス F_{geo} のもとで, N イベントを観測する確率



- 有意性: 91.4%
- 地球ニュートリノ数: 25^{+19}_{-18} イベント (参照地球モデルは 19 を予測)
- 99% C.L. 上限: 72 イベント

スペクトル形解析

$$\chi_{\text{shape}}^2 = -2 \log \prod_k \frac{dP(E_k; N_U, N_{Th}, \text{BG-parameters})}{dE} + \chi_{\text{BG-parameters}}^2$$



KamLAND データは U/Th 比には感度がない
 ⇒ 地球化学の予測比 Th/U=3.9 を使う

- イベント数： $28.0^{+15.6}_{-14.6}$
- 99% C.L. 上限：70.7 イベント
- $N_{\text{geo}}=0$ は 1.99σ (95.3%) で排除

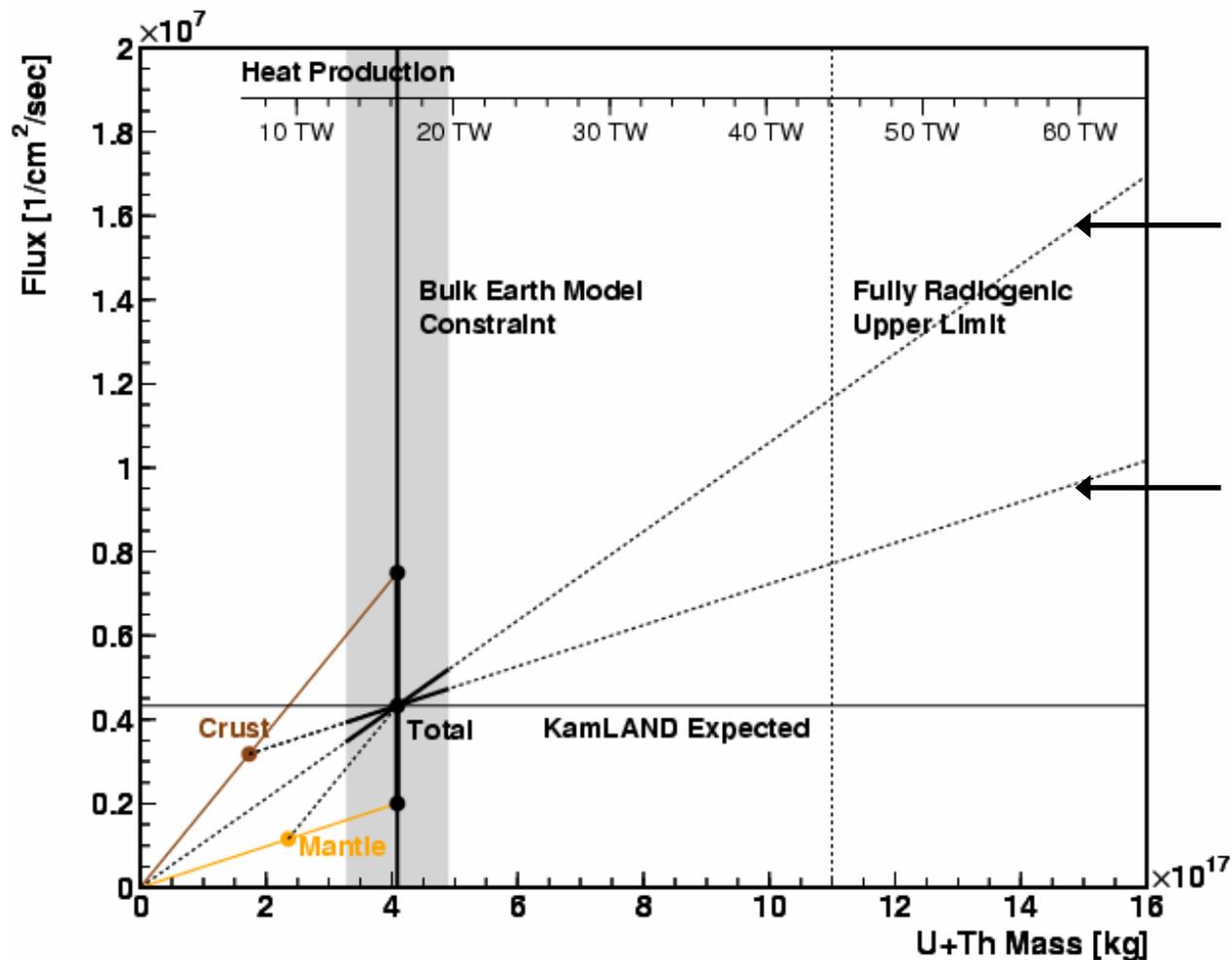
第3部

議論と将来展望

1. KamLAND における観測
2. KamLAND における観測の将来展望
3. 他の地球ニュートリノ実験
4. 地球ニュートリノ観測の将来展望



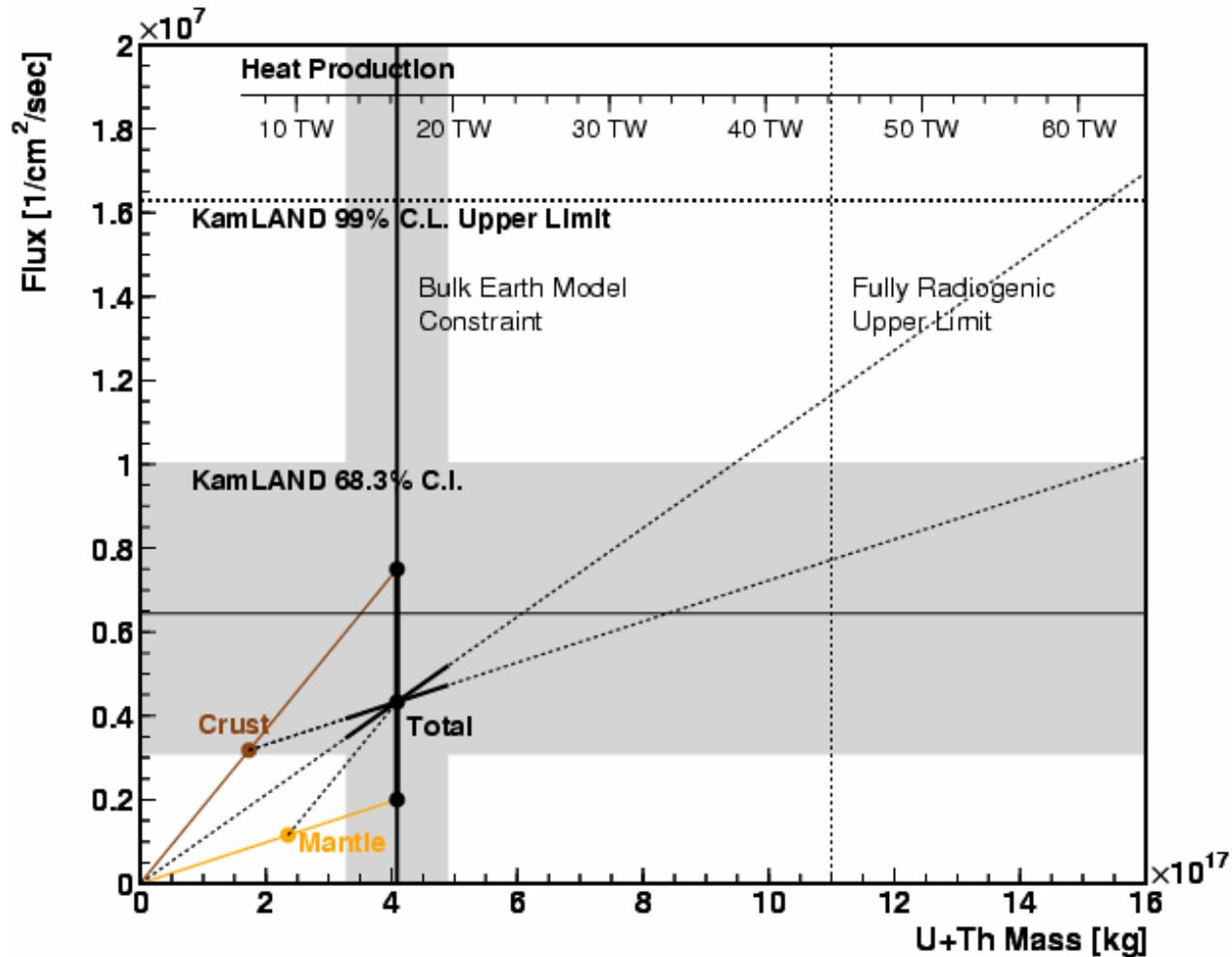
KamLAND の観測と地球化学モデル



地球全体を単純に
スケールした場合

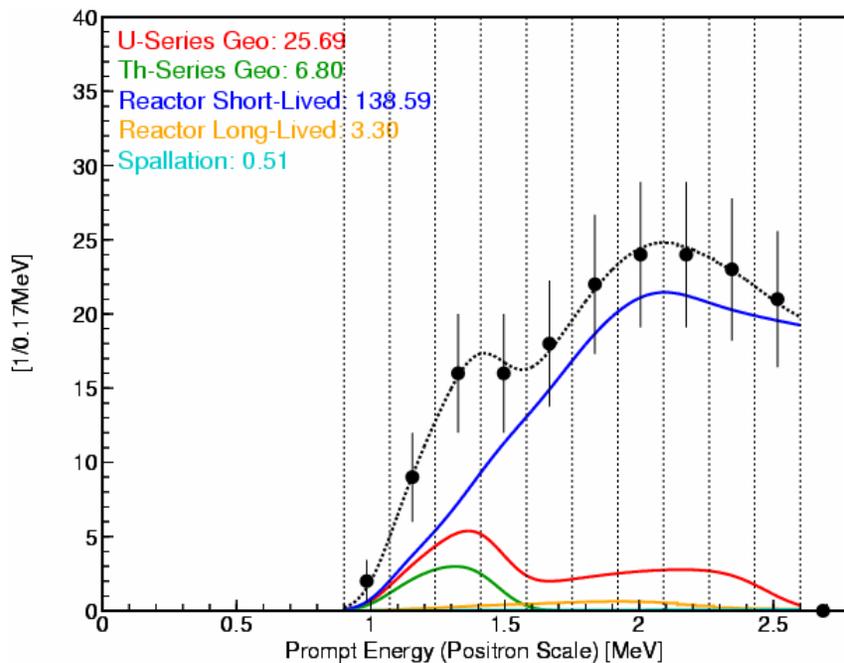
地殻の組成を変えず
マントルを変化させた
場合

KamLAND の観測と地球化学モデル

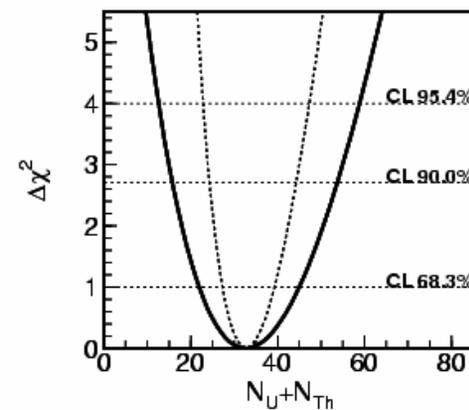
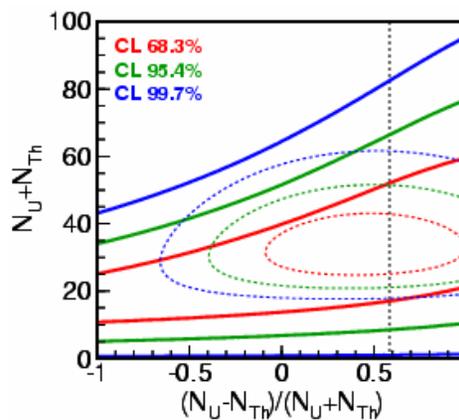


- KamLAND の結果は地球化学による予測と一致
- 99% C.L. 上限は 60 TW に相当

将来計画：KamLAND 再純化



210Pbを 10^{-5} にする純化を計画中
 ⇒ 放射性起源のバックグラウンドが
 無視できるレベルになる



10⁻⁵のバックグラウンドを想定し，749日のデータを解析

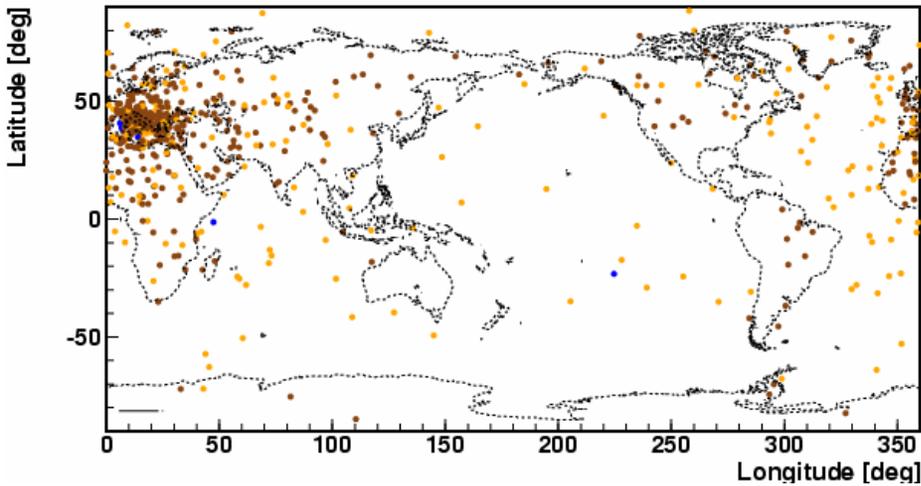
- 有効体積を半径5mから半径5.5mに
- 検出効率を90%に（偶発同時計数の基準を緩和）



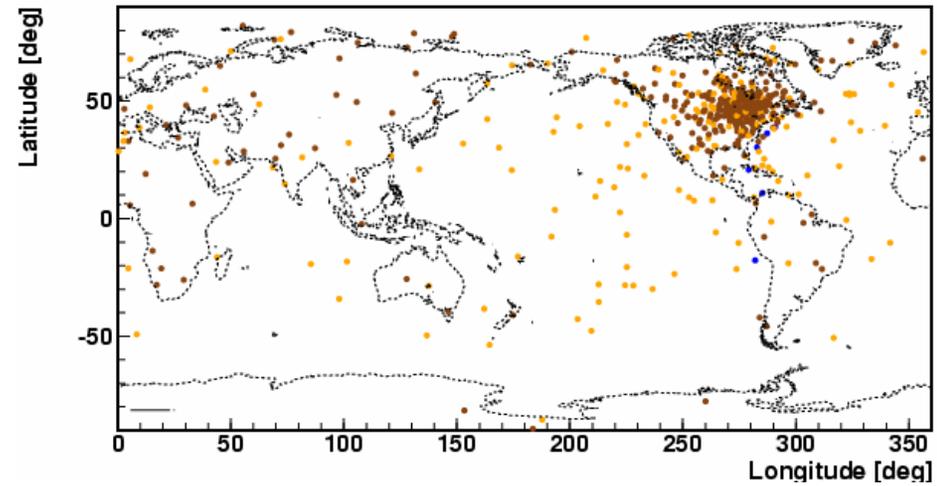
- エラー：54% → 28%，原子炉ニュートリノの統計エラーが支配的
- 有意度：99.96%
- 99% 上限：30TW 相当

次の地球ニュートリノ実験

Borexino @ Gran Sasso



SNO+ @ Sudbury

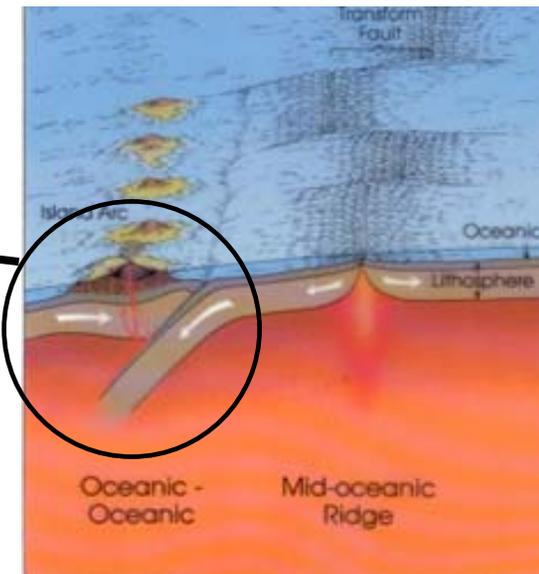
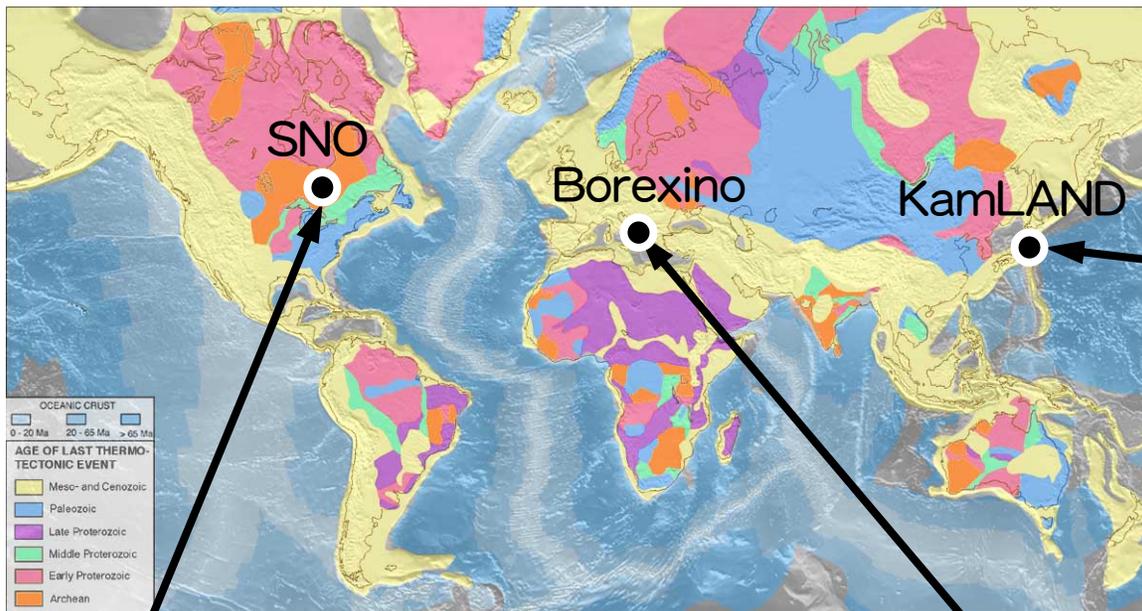


- フラックスの80%は大陸地殻由来
- 地球ニュートリノは半径 $\sim 500\text{km}$ を平均化する

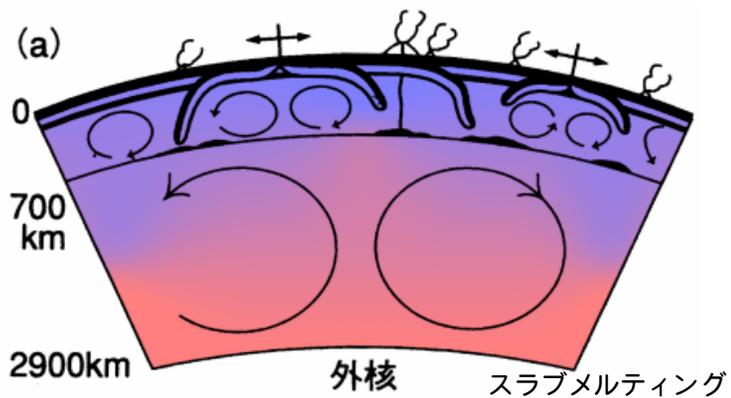


バイアス（サンプリング，縦方向）を受けない地殻平均組成

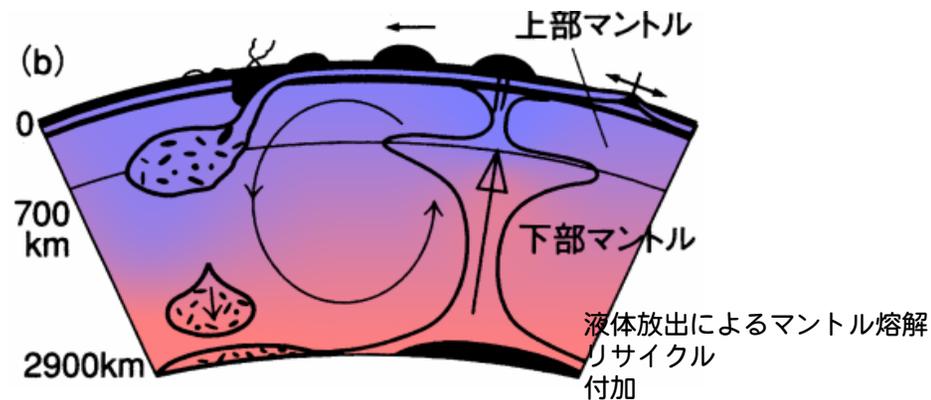
Borexino, SNO におけるニュートリノ地球科学



昔(原生代)のマンテル対流???



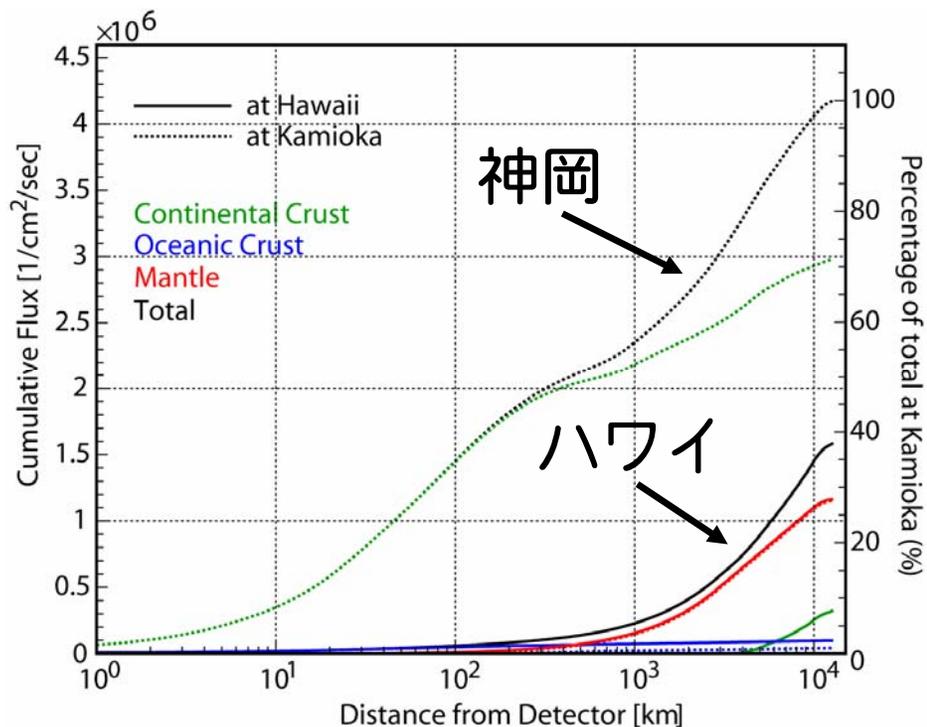
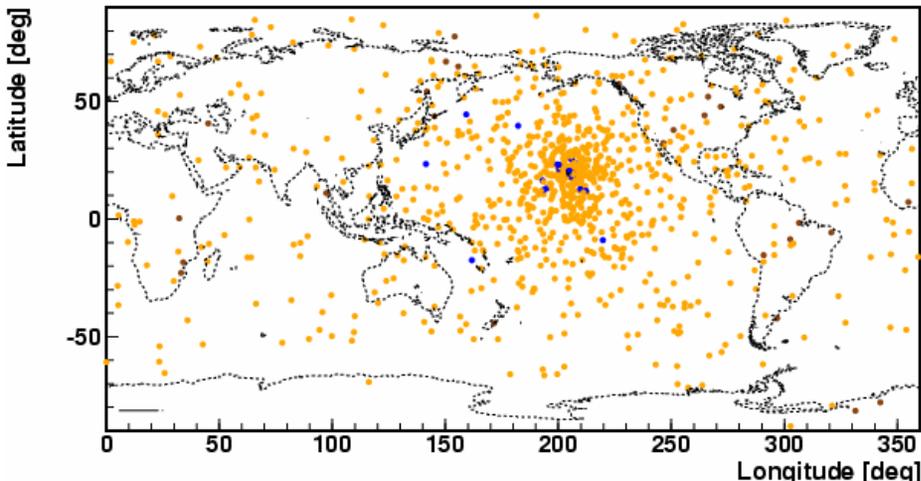
最近のマンテル対流???



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／日本	1.0	2700	2002
Borexino	Gran Sasso／イタリア	0.3	1500	200?
SNO+	Sudbury／カナダ	0.7	5400	検討中
Hano-hano	Hawaii／アメリカ	1.4 (?)	3000 (?)	計画中
BNO	Baksan／ロシア	1.0	4800	計画中
LENA	Phyasalm／フィンランド Nestor／ギリシャ	60	4000 4000	ゆめ
HSD	Kimballton／アメリカ Homestake／アメリカ Soudan／アメリカ	100	1850 4200 2070	ゆめ

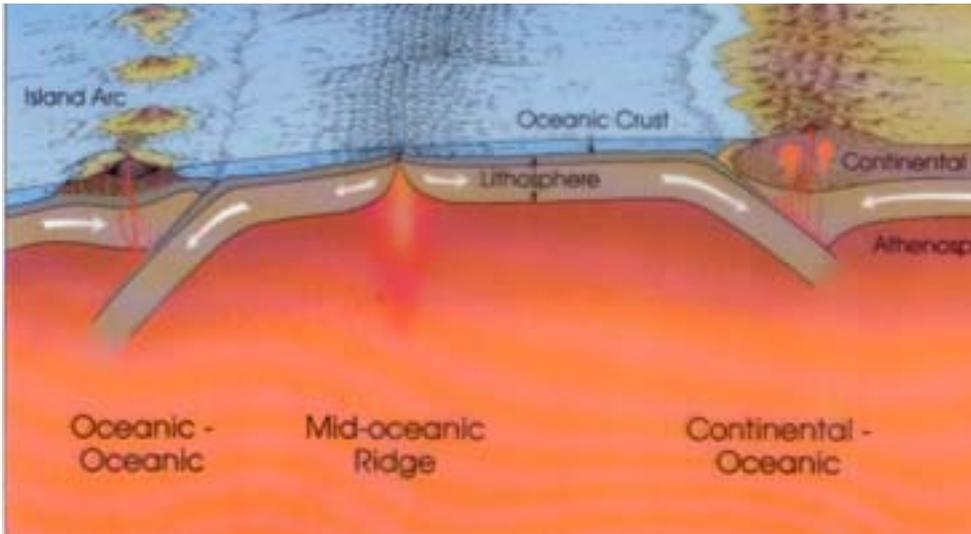
ハワイにおける地球ニュートリノ観測



- 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???)

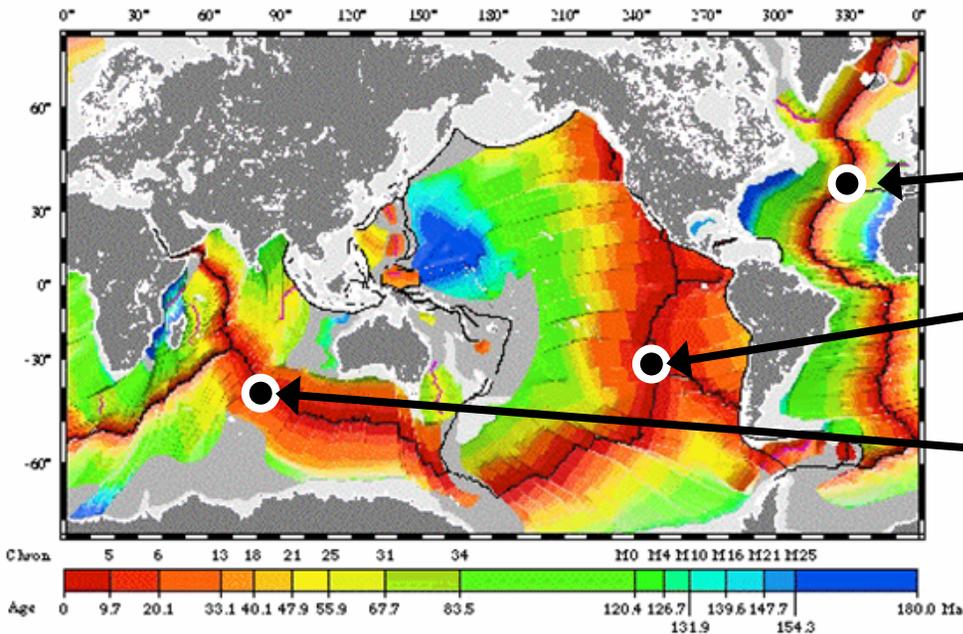


夢：海嶺上での観測

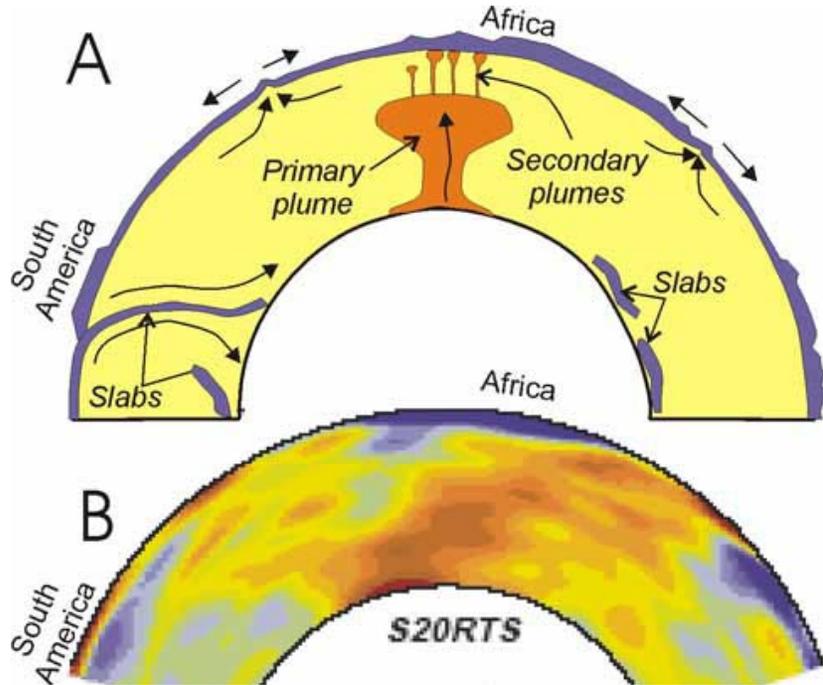


- 海嶺で新しい地殻が生成される
↓
- 海嶺下のマントルは不適合元素に欠乏している？

地球の進化過程理解への鍵

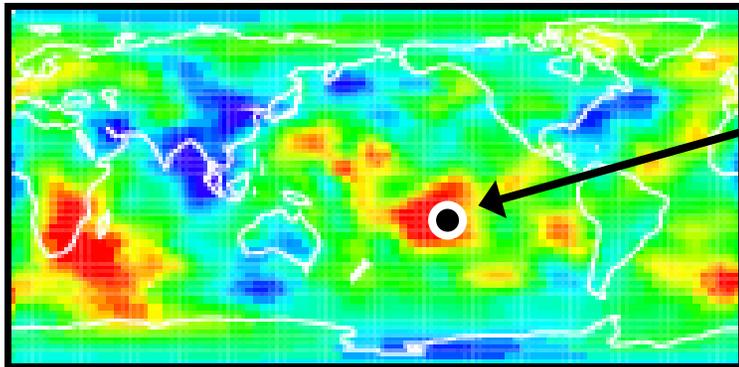


夢：マントルプルームを調べる



- 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



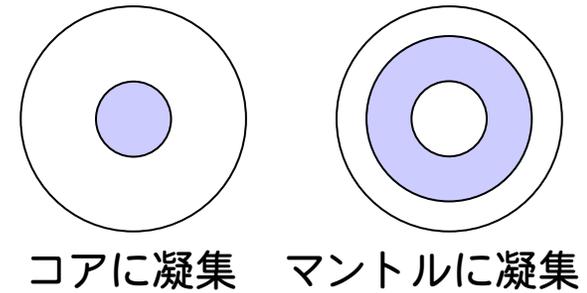
Tahiti



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

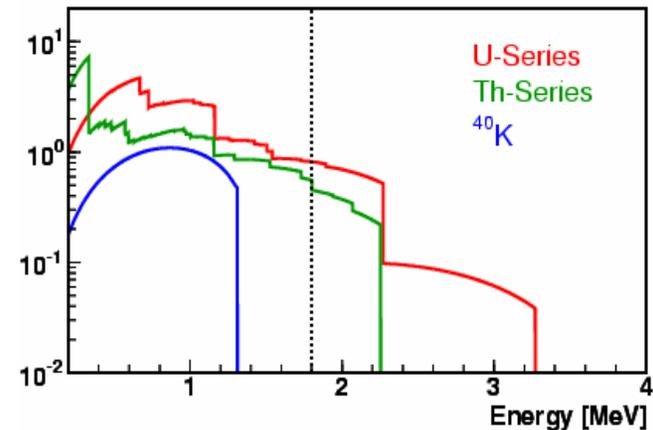


- ^{40}K ($E_{\text{max}}=1.3\text{MeV}$) ニュートリノの検出

- 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

- 地球ニュートリノは，地球内部の熱収支や化学組成に関する直接の情報をもたらす
- 1000ton のシンチレータを備えるKamLAND実験によって，**地球ニュートリノの観測が現実**になった。
- KamLANDでの749日の観測により。
 - ✓ 有意度：**91.4%** (rate-only), **95.3%** (rate+shape)
 - ✓ 54% のエラーがあるものの，**BSEに基づく予測と一致**
- 今後のKamLANDでの観測と，引き続き地球ニュートリノ実験により，さらに多くのユニークな知見が期待できる。

