

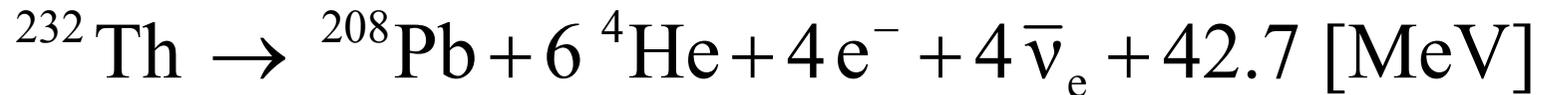
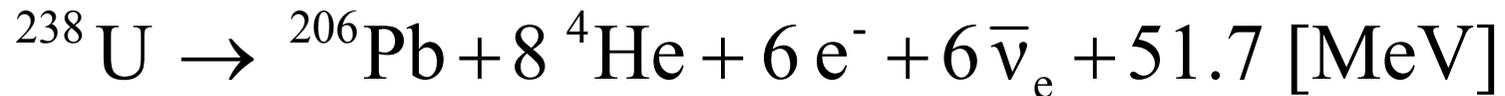
KamLAND実験における 地球ニュートリノ観測の最初の結果

1. ニュートリノと地球物理学
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

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



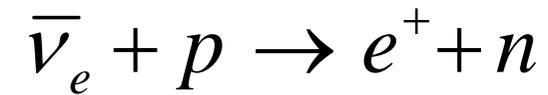
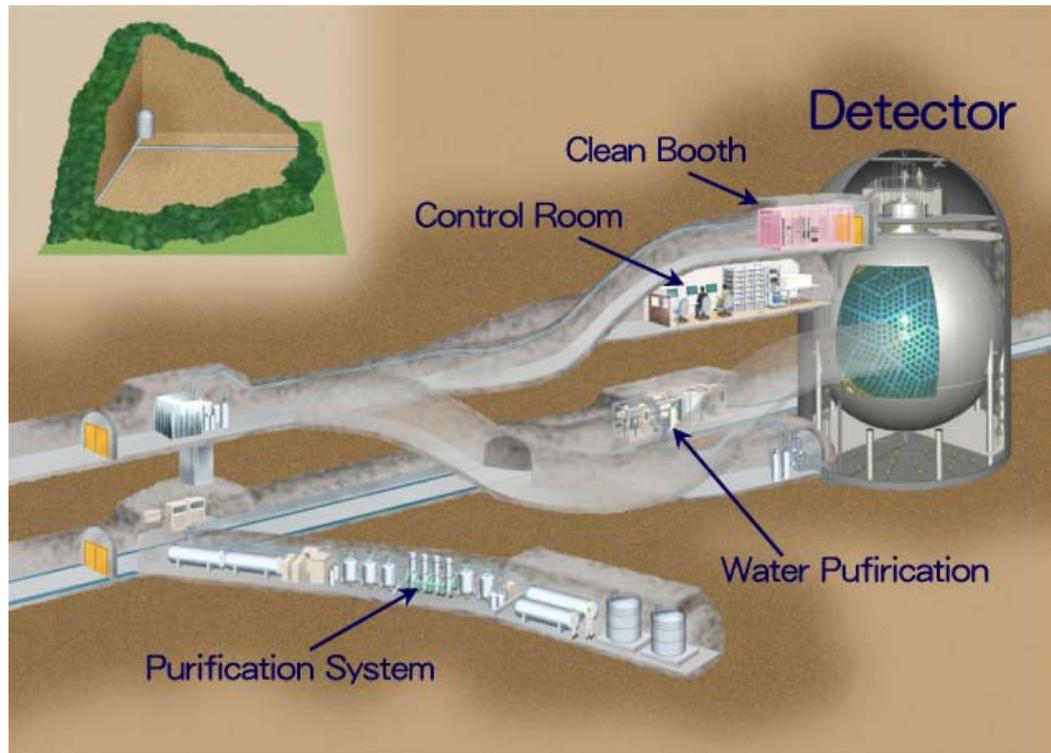
- 放射性熱源は地表熱流量のおよそ半分に寄与
 - 観測地殻熱流量 $\sim 44\text{TW}$ (31TW)
 - U系列 8TW / Th系列 8TW / ^{40}K 3TW ???
- 地球深部の化学組成に関する直接の情報
 - ボーリングによるサンプル採取は 12km 程度
 - 地上噴出岩石(捕獲岩)の最大生成深度は 200km 程度
 - 深部組成推定は主に隕石解析と高圧実験による

歴史

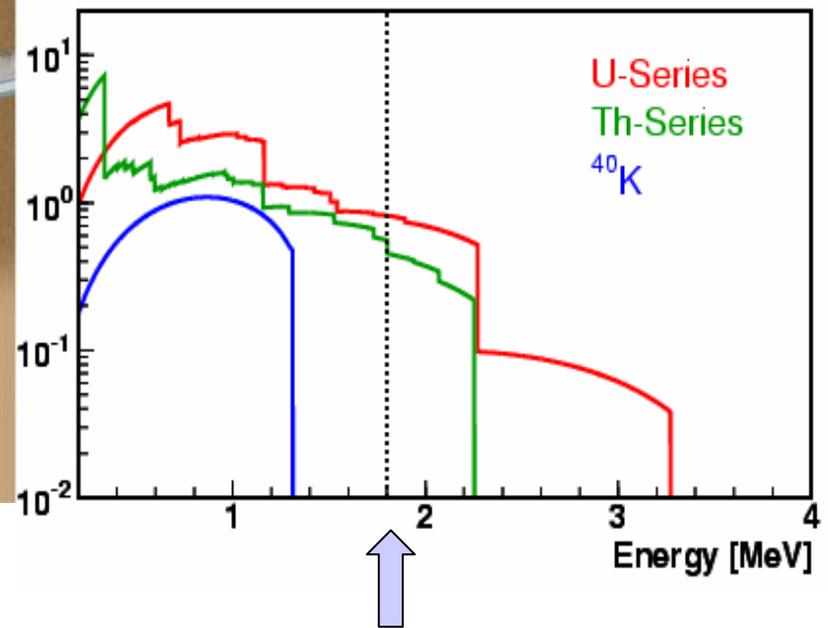
- G.Eder (1966)
- G.Marx (1969)
 - 地球ニュートリノに関する最初の言及
- C.Avilez et al. (1981)
- L.Krauss et al. (1984)
- M.Kobayashi, Y.Fukao (1991)
 - ニュートリノ観測による地球物理について
 - 現実の観測については「当面困難」
- R.Raghavan, S.Enomoto et al. (1998)
- C.Rothschild et al. (1998)
- G.Fiorentini et al. (2003)
 - KamLAND/Borexino により観測に現実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

KamLANDにおける地球ニュートリノ観測

大容量・高純度 液体シンチレータにより
低エネルギー反ニュートリノを観測



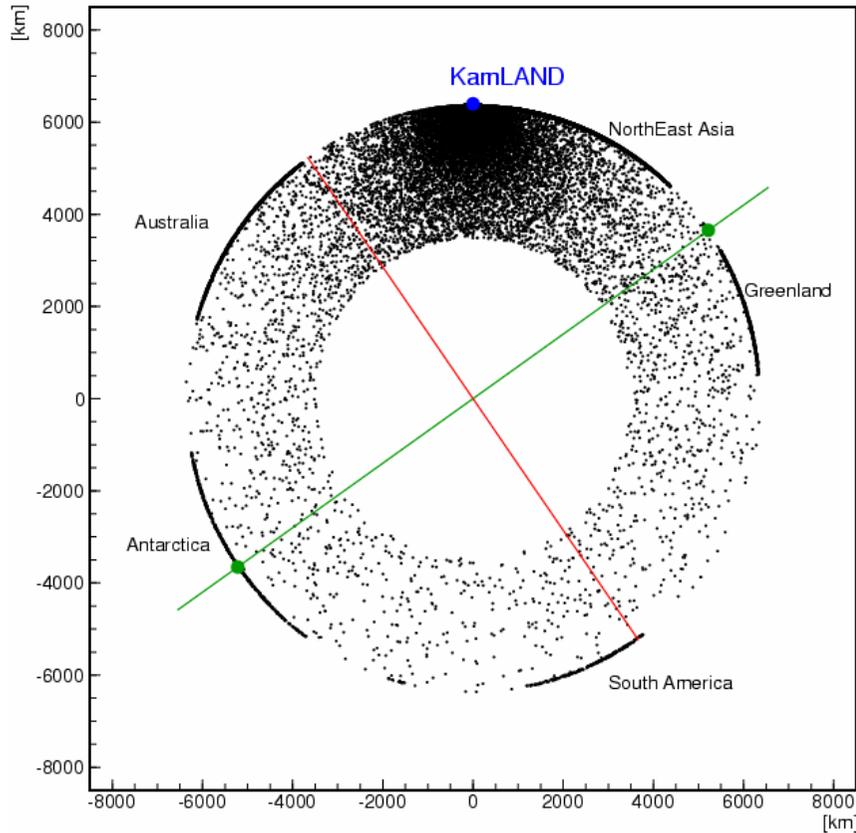
反応閾値：1.8MeV



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

KamLAND 閾値

参照地球モデルによるフラックス予想

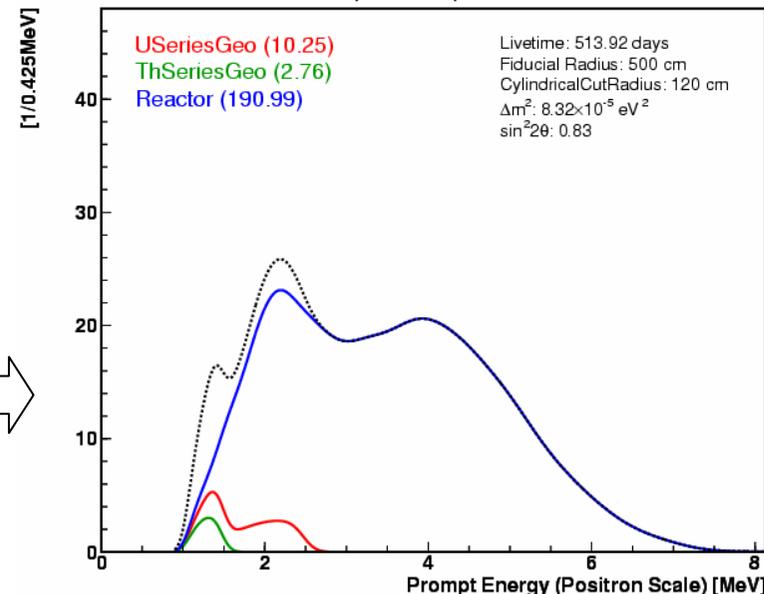
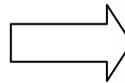


KamLANDにおける予想フラックス
(arXiv:hep-ph/0508048)

- U系列
 2.3×10^6 [$1/\text{cm}^2/\text{sec}$]
 30.5 [$\text{events}/10^{32}\text{protons}/\text{year}$]
- Th系列
 2.0×10^6 [$1/\text{cm}^2/\text{sec}$]
 8.0 [$\text{events}/10^{32}\text{protons}/\text{year}$]

期待されるニュートリノスペクトル

- 408ton CH_2 (半径5mの有効体積)
- 513日の観測
- 検出効率 69%



KamLAND 検出器

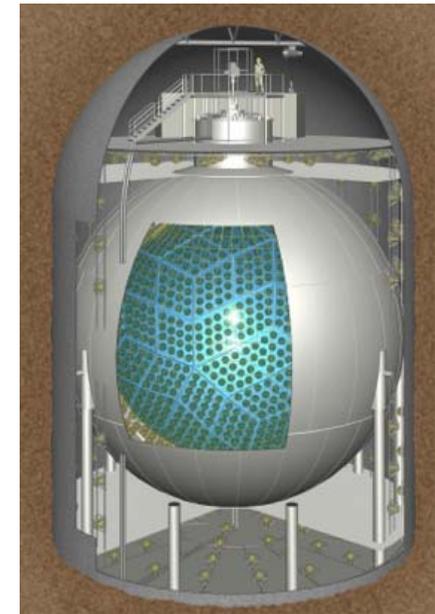
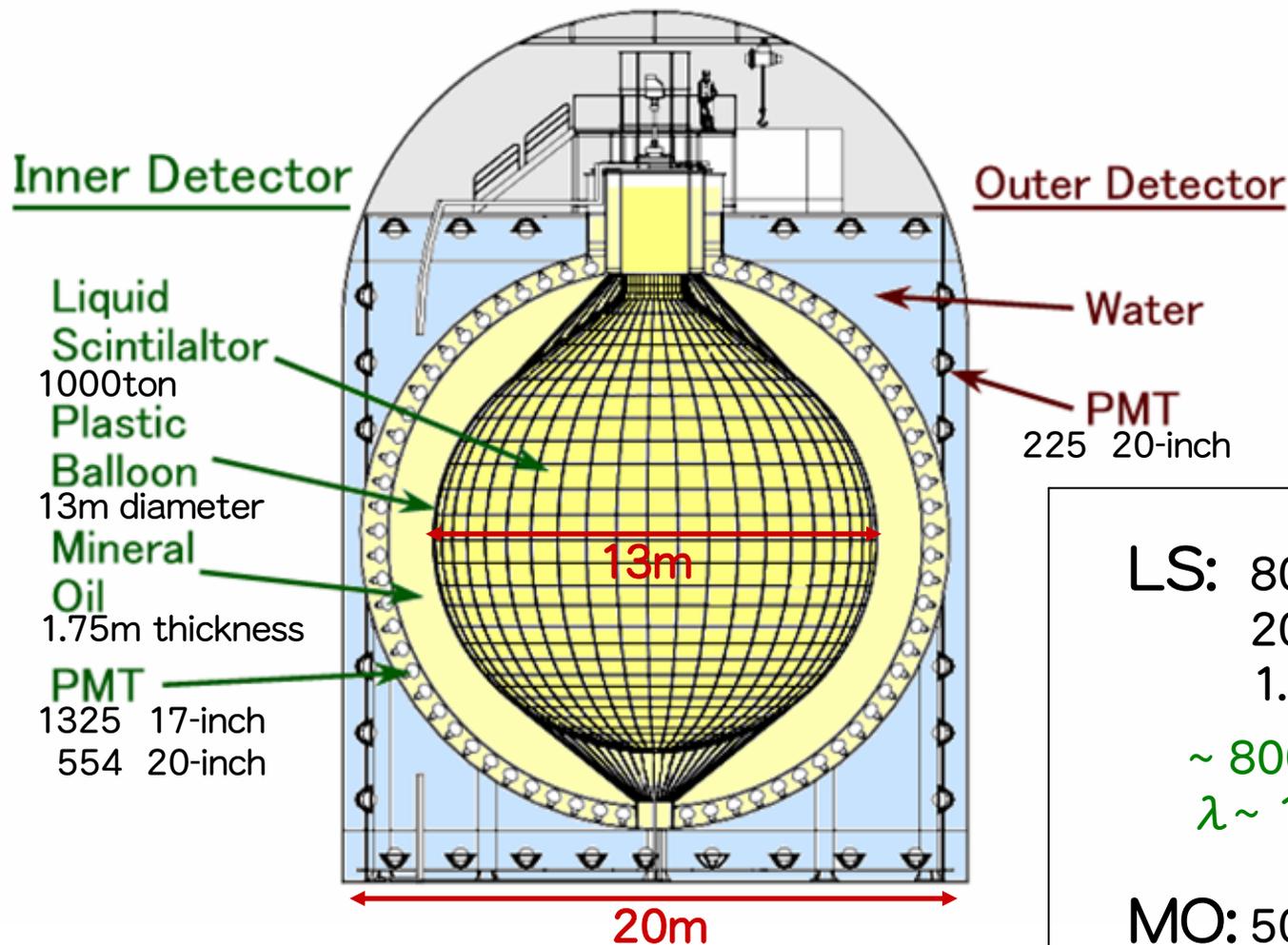


photo-coverage: 34%
 ~ 500 p.e. / MeV

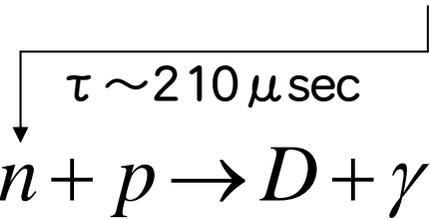
LS: 80%: dodecane
 20%: pseudocumene
 1.5g/l: PPO

~ 8000 photons/MeV
 $\lambda \sim 10m$

MO: 50%: dodecane
 50%: isoparaffin

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

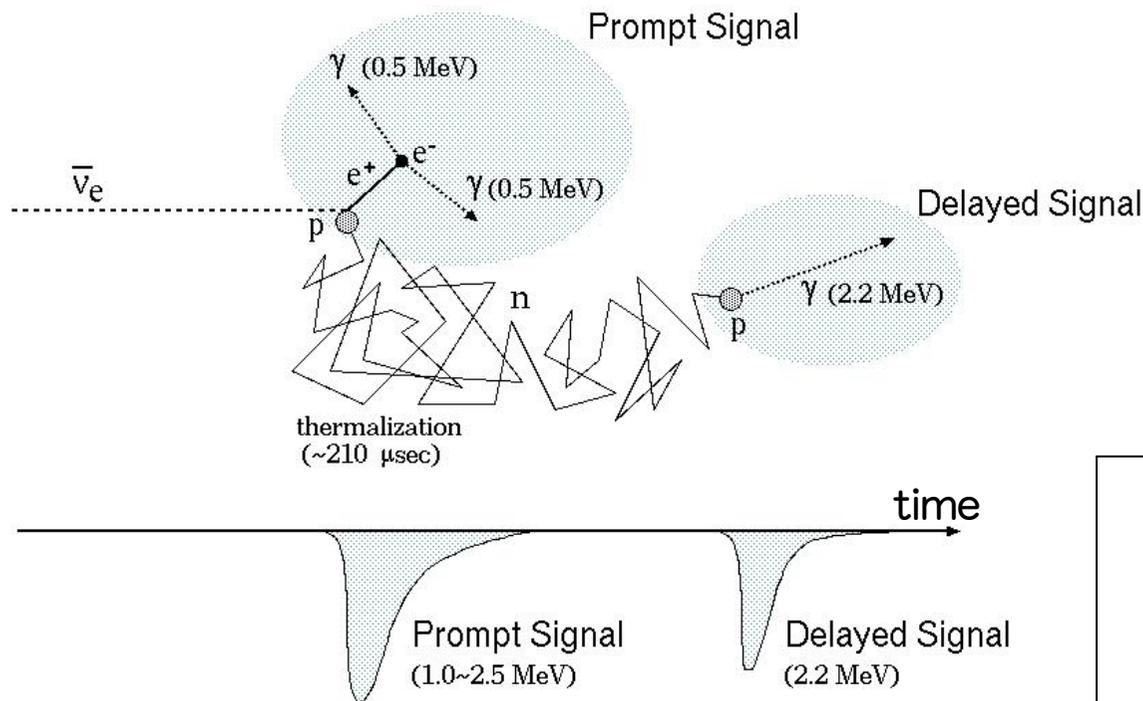
ニュートリノ検出原理



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

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

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

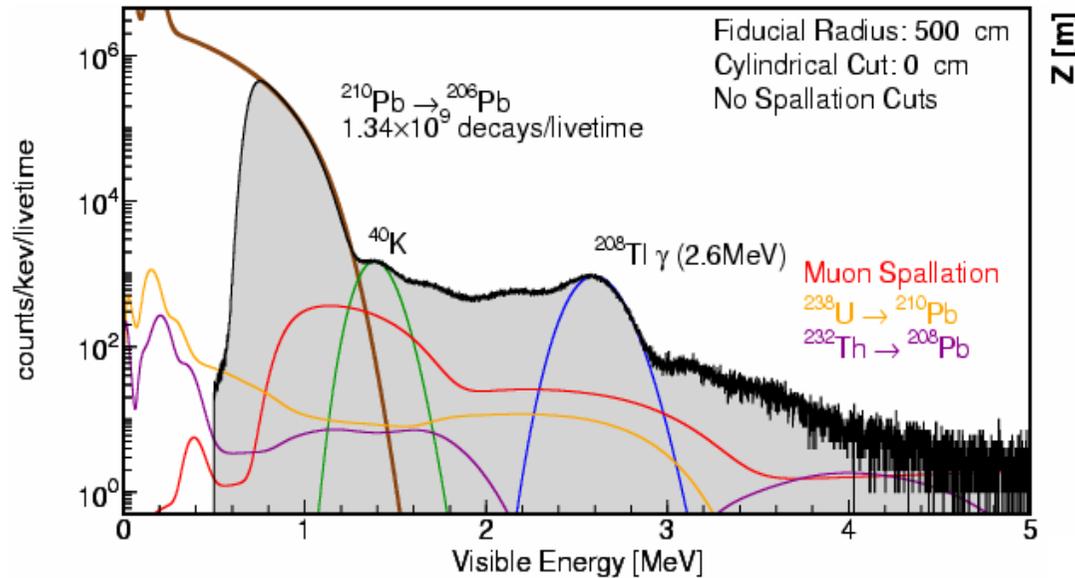


$$E_{\text{geo-}\nu_e} : 0 \text{ MeV} \sim 3.3 \text{ MeV}$$

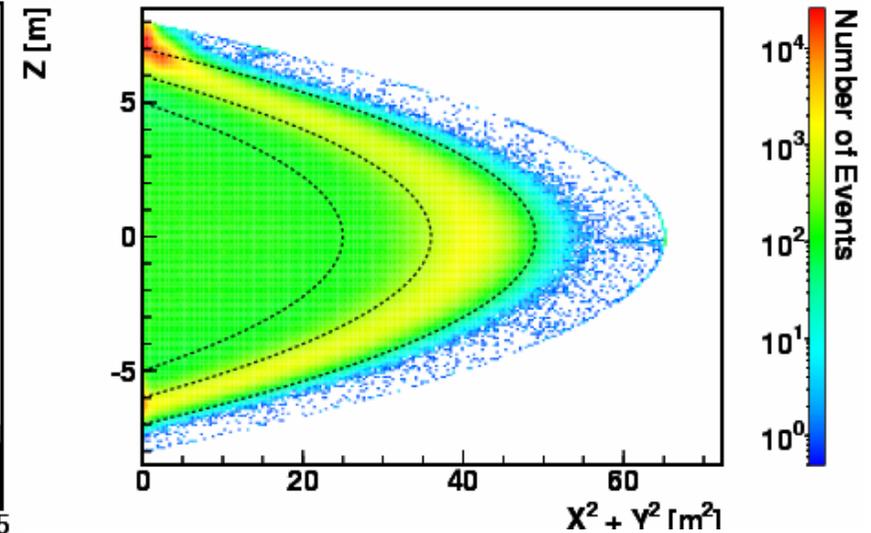
$$E_{\text{prompt}} : 1.0 \text{ MeV} \sim 2.5 \text{ MeV}$$

Detector Activity (Singles Spectrum)

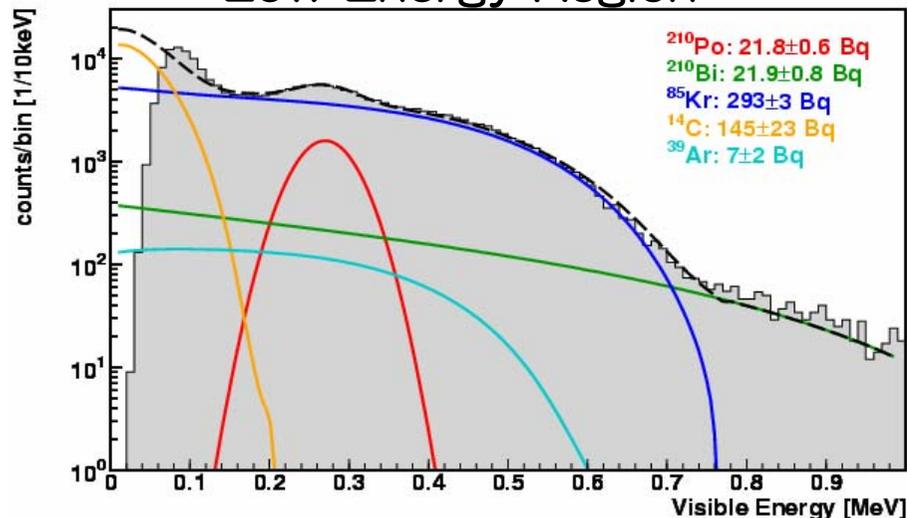
Normal Trigger Range



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

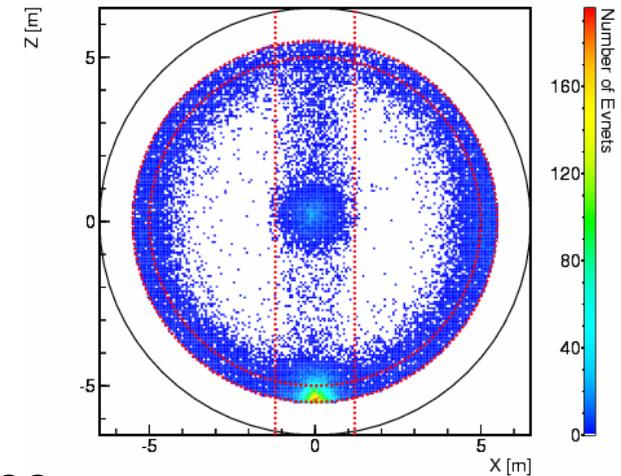
- 中心より半径 500 cm を選択
- 中心軸周辺半径 120 cm を除去

• ミューオン後の破砕原子核崩壊の除去

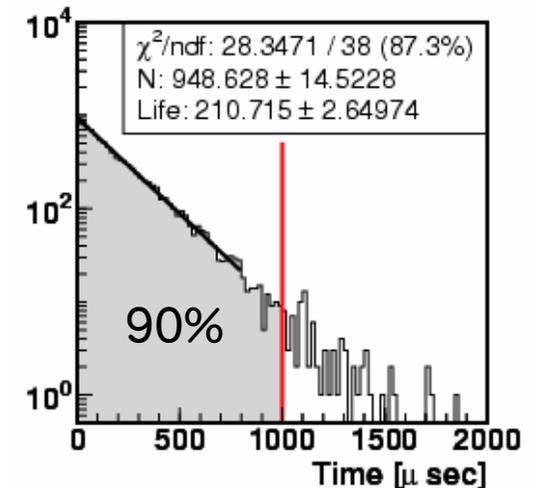
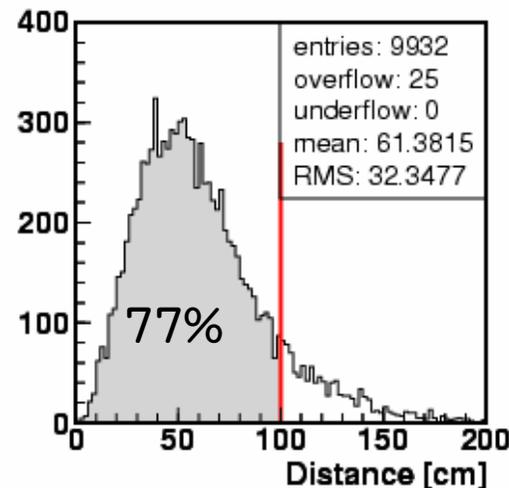
- シャワーミュオン後, 全ボリュームを 2 sec
- 非シャワーミュオン後, トラック沿い 3 m を 2 sec

• 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 : $1.8 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$



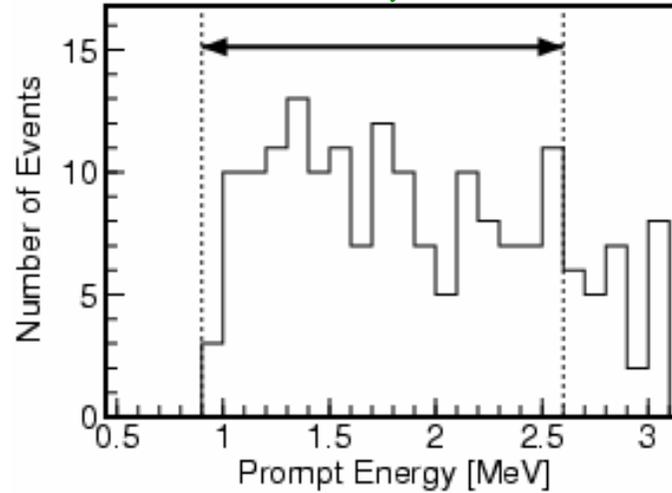
偶発同時計数を減らすため、
原子炉ニュートリノ解析より
厳しめのカット



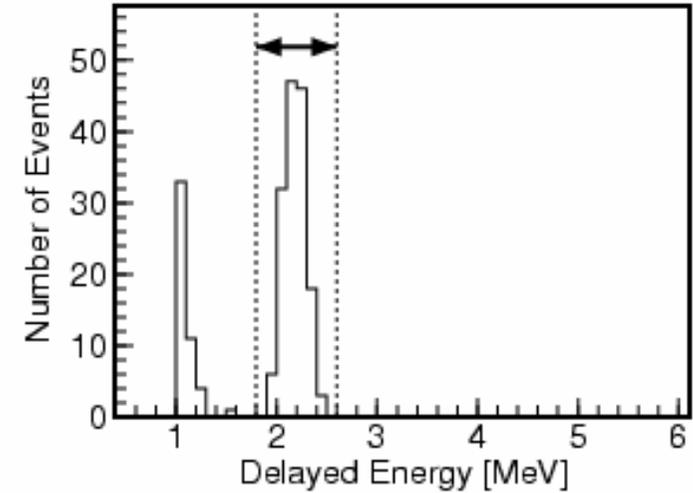
ニュートリノイベント候補

- 観測時間: 749.14 days
- 観測イベント数: 152
- ターゲット数: 3.459×10^{31}

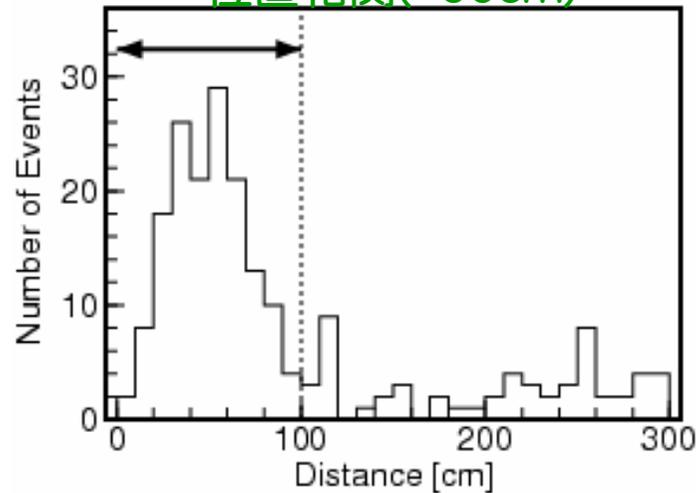
先発信号($E_\nu - 0.8\text{MeV}$)



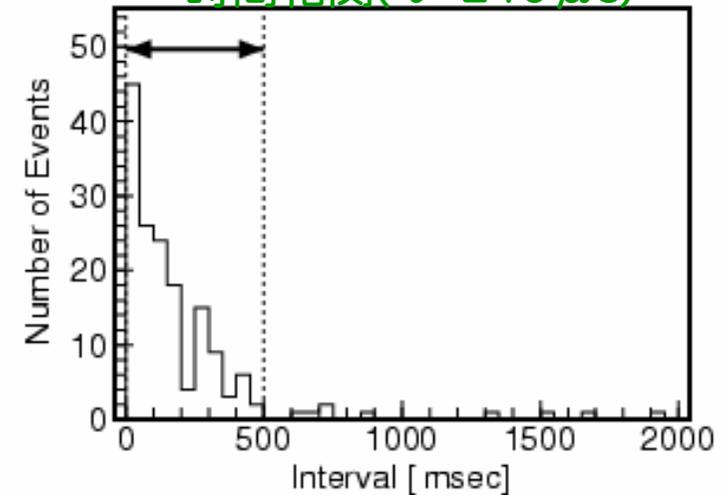
遅延信号(2.2MeV)



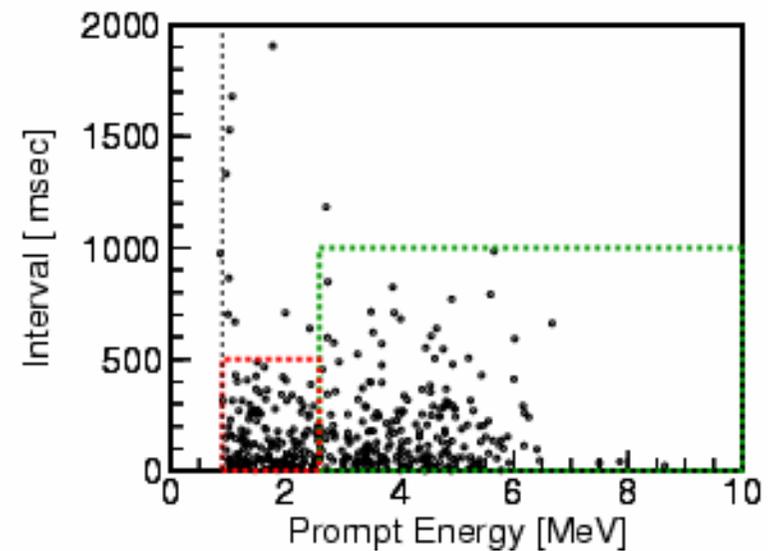
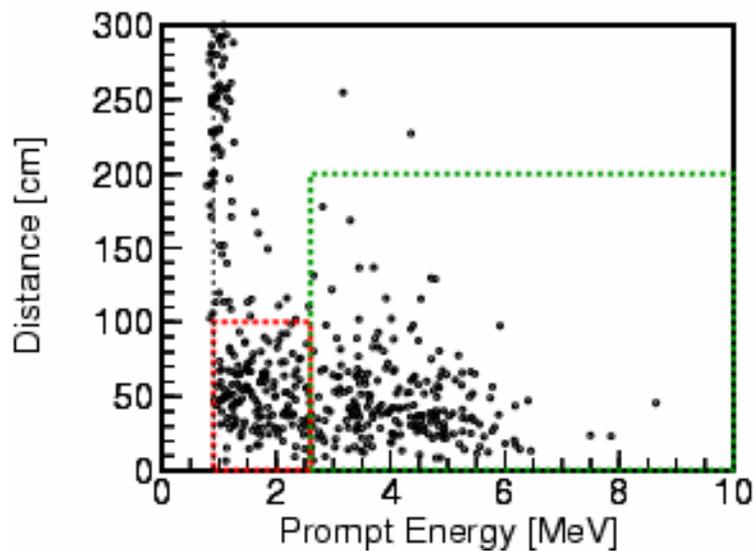
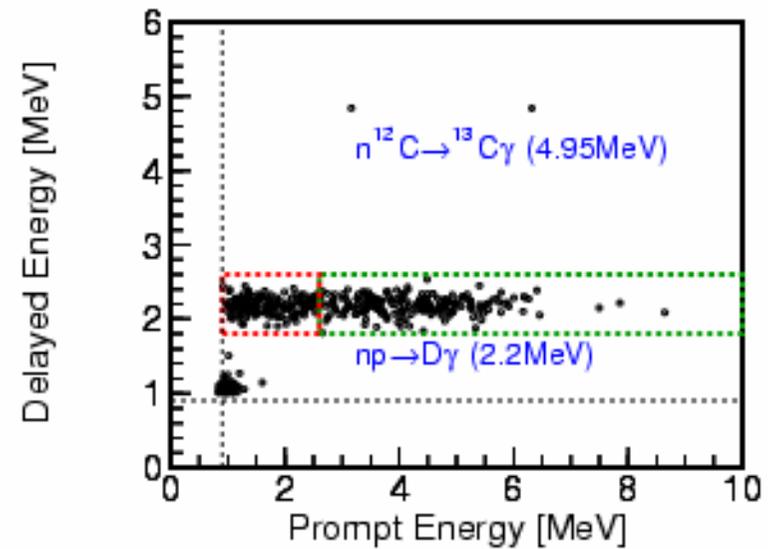
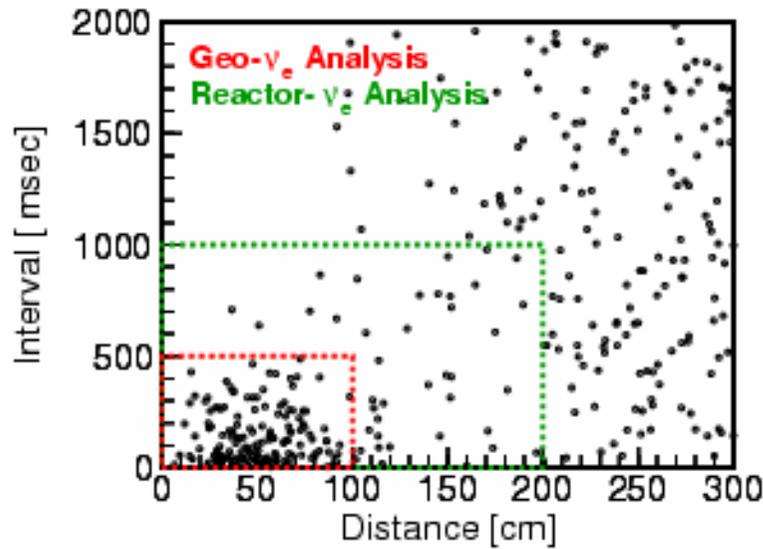
位置相関(~60cm)



時間相関($\tau = 210 \mu\text{s}$)



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

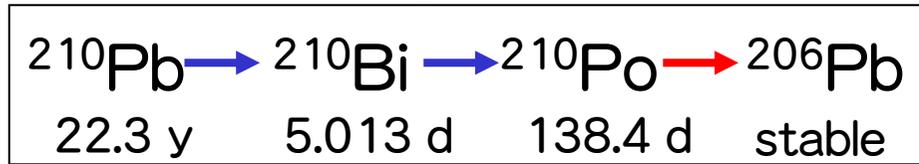
バックグラウンド概要

- 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

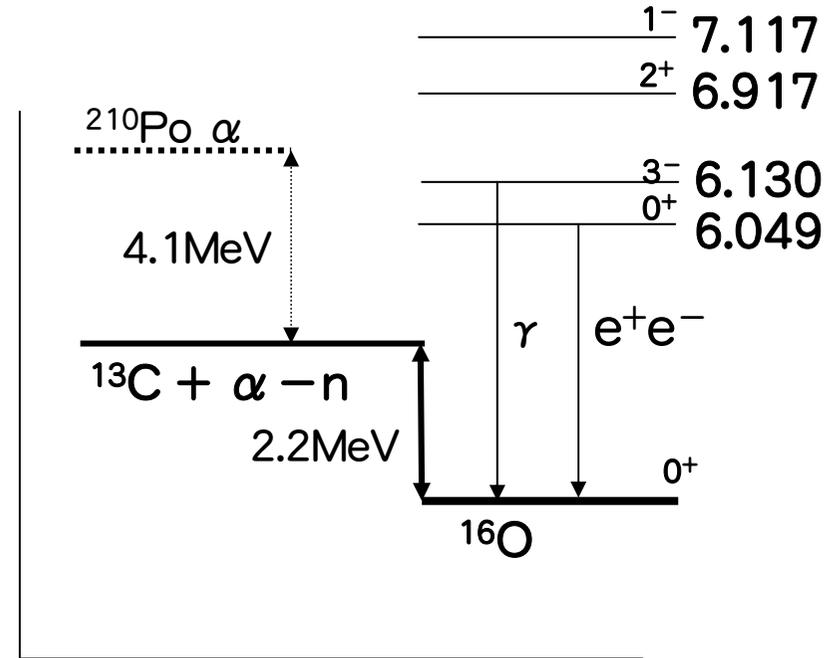
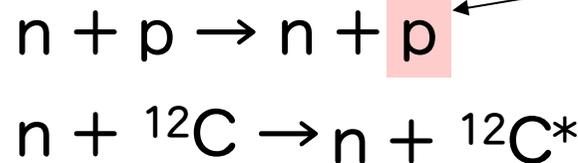
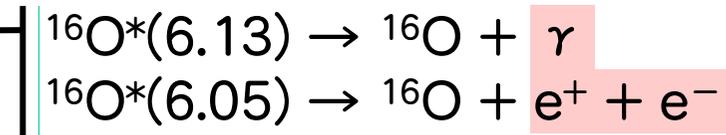
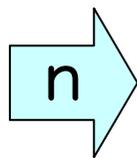
 - 短寿命核の崩壊連鎖
 - 自発核分裂 (${}^{238}\text{U}, \dots$)
 - 中性子放出核 (${}^{210}\text{Tl}, \dots$)
 - (α, n) 反応, (γ, n) 反応
 - 太陽ニュートリノによる重水素の分解 (disintegration)
 - 大気ニュートリノと ${}^{12}\text{C}$ の反応

(α, n) 反応概要

シンチレータ中不純物の α 崩壊

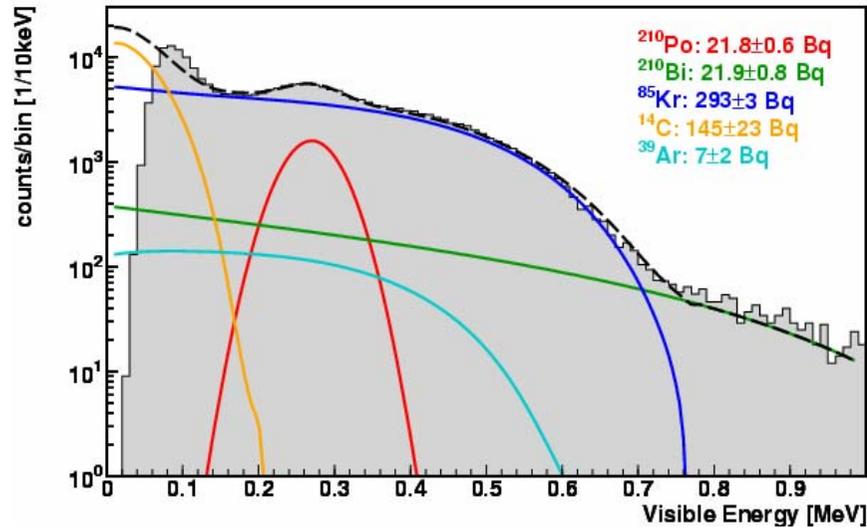


- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}$
- $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}^*$
- $^{14}\text{N} (\alpha, n) ^{17}\text{F}$
- $^{15}\text{N} (\alpha, n) ^{18}\text{F}$
- $^{17}\text{O} (\alpha, n) ^{20}\text{Ne}$
- $^{18}\text{O} (\alpha, n) ^{21}\text{Ne}$



先発信号

(α, n) 反応： ^{210}Po 崩壊数



^{210}Po 崩壊数:

21.1 Bq

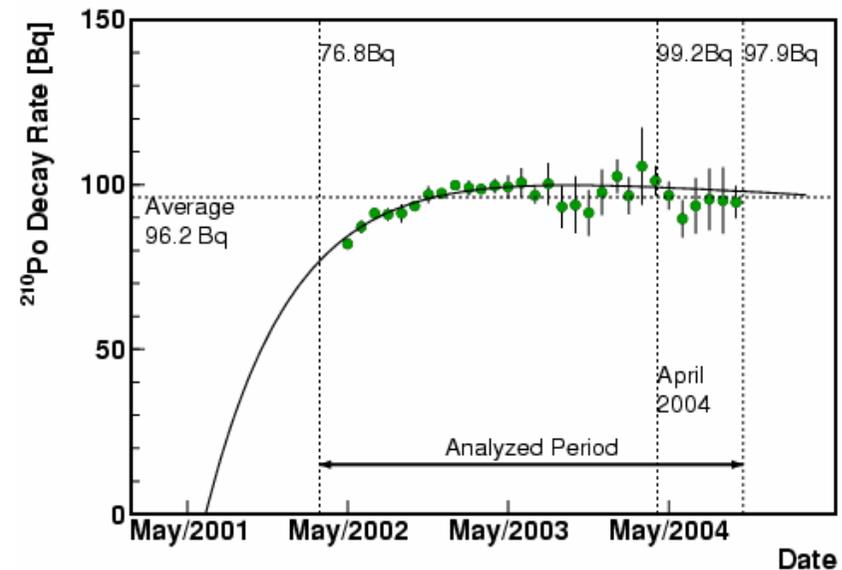
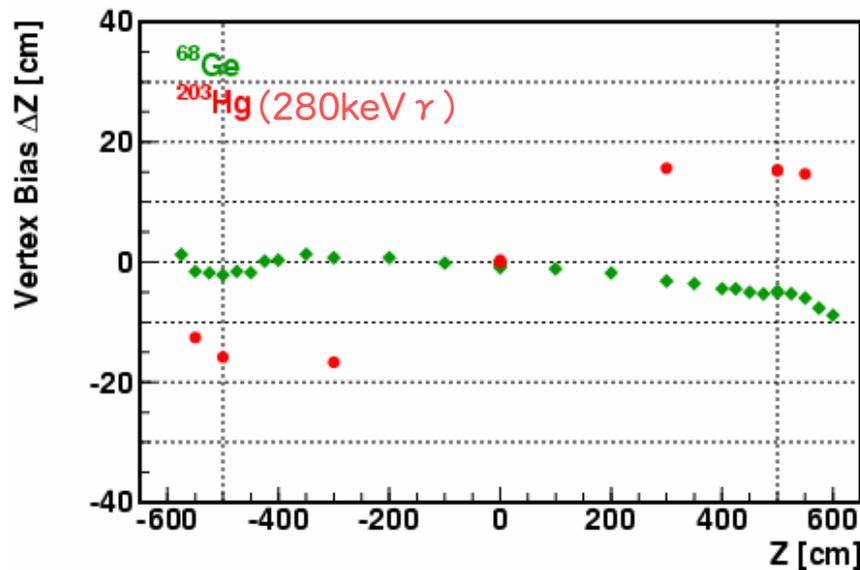
1.50×10^9 decays/lifetime

不定性:

低エネルギーでの Vertex Bias

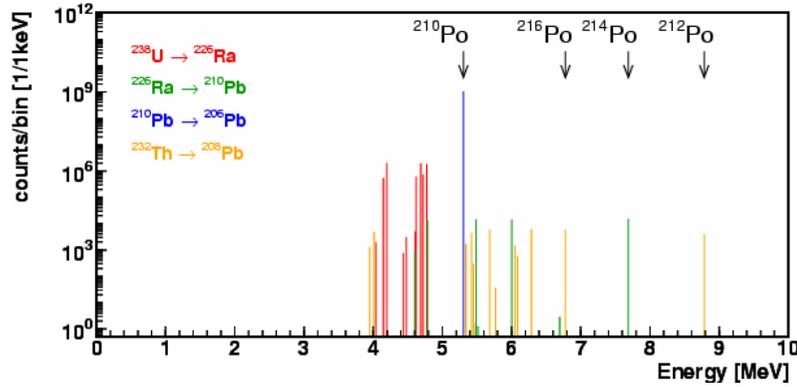
^{210}Po の崩壊非平衡

⇒ 10% のエラー

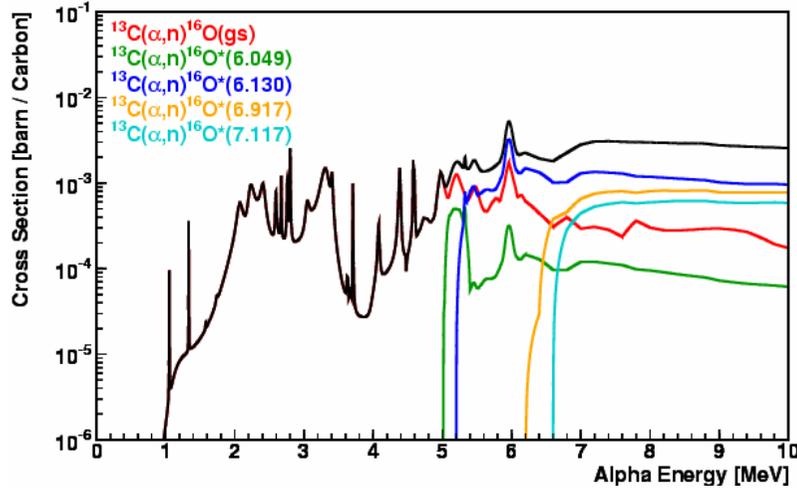


(α, n) 反応：中性子生成

シンチレータ不純物による α スペクトル



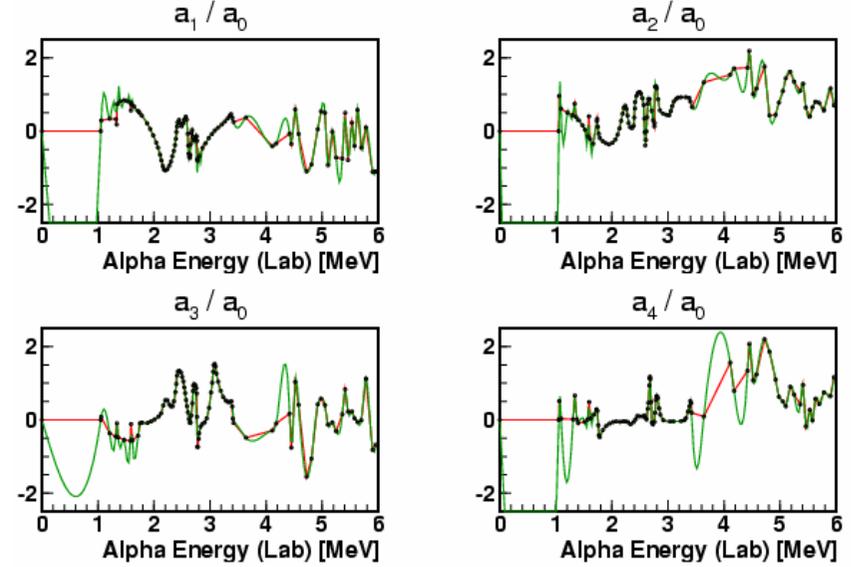
$^{13}\text{C}(\alpha, n)$ の反応断面積



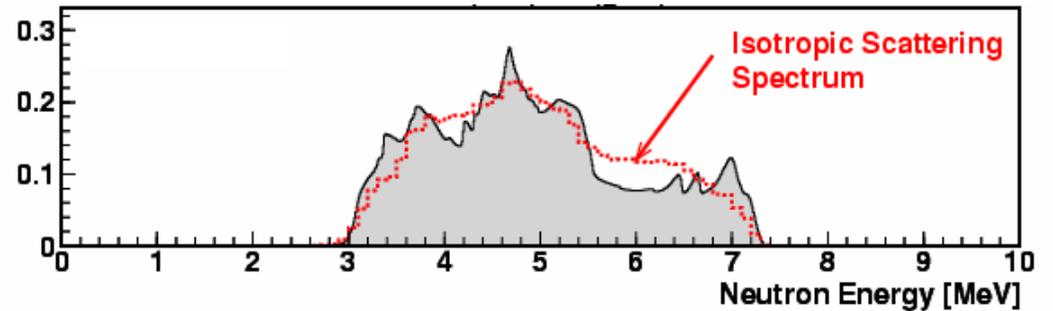
不定性：

反応断面積 \Rightarrow 20% のエラー

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

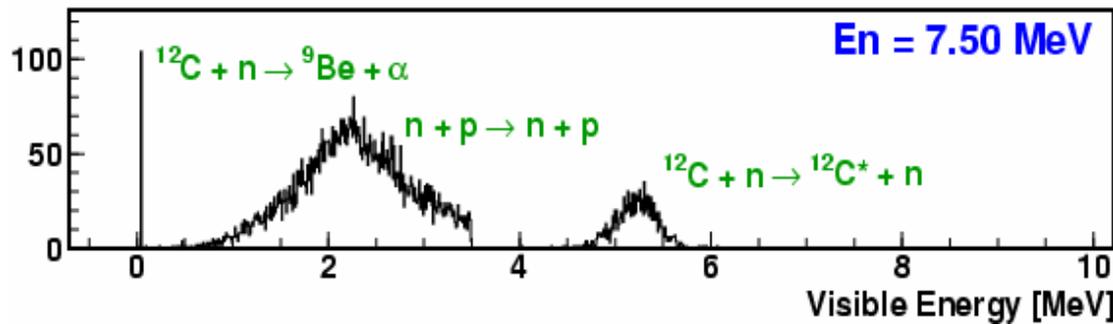


計算された中性子スペクトル



(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)

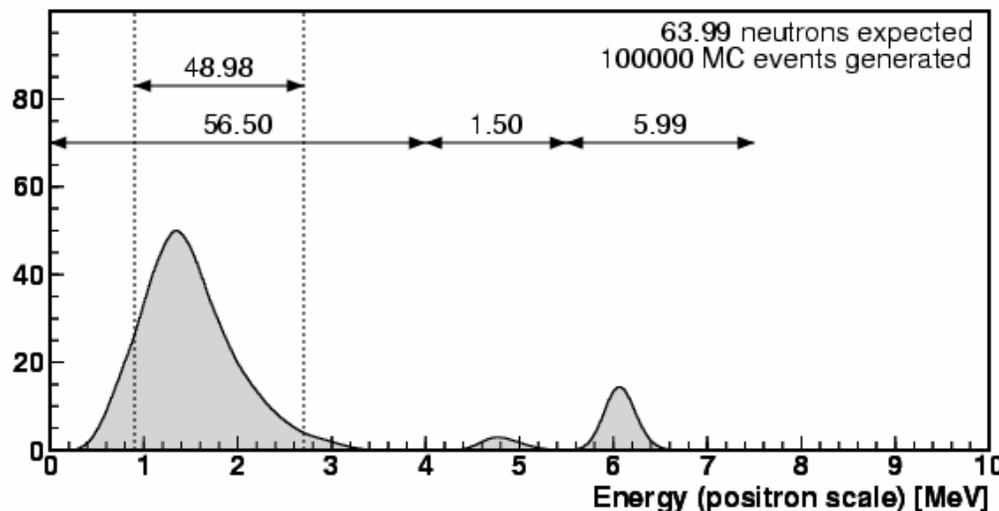


- 中性子-陽子散乱 (MC)
- 陽子のエネルギー損失
- シンチレーション光の生成

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

- 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

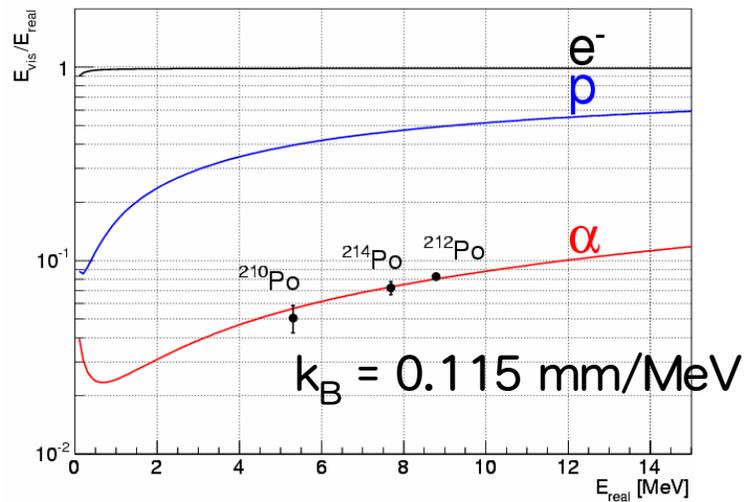


不定性：

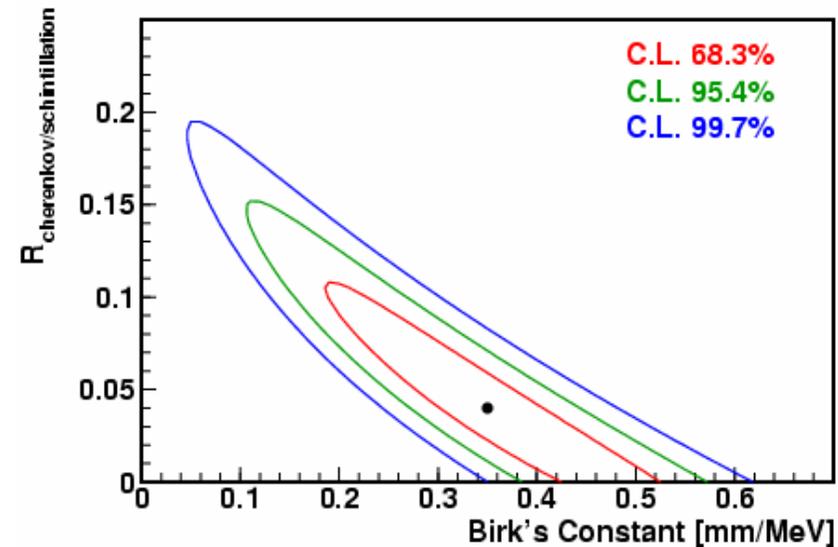
- クエンチング係数
- (α, n) 角分布
- ⇒ 横方向10%のエラー

(α, n) 反応：陽子クエンチング

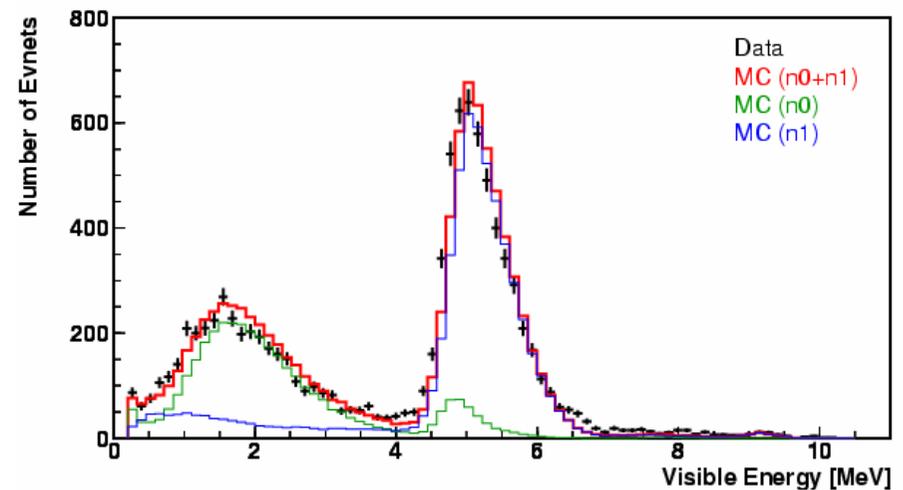
α による Birks 定数の決定



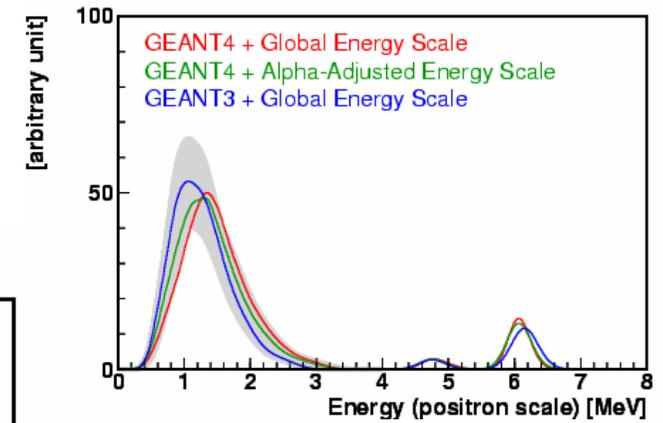
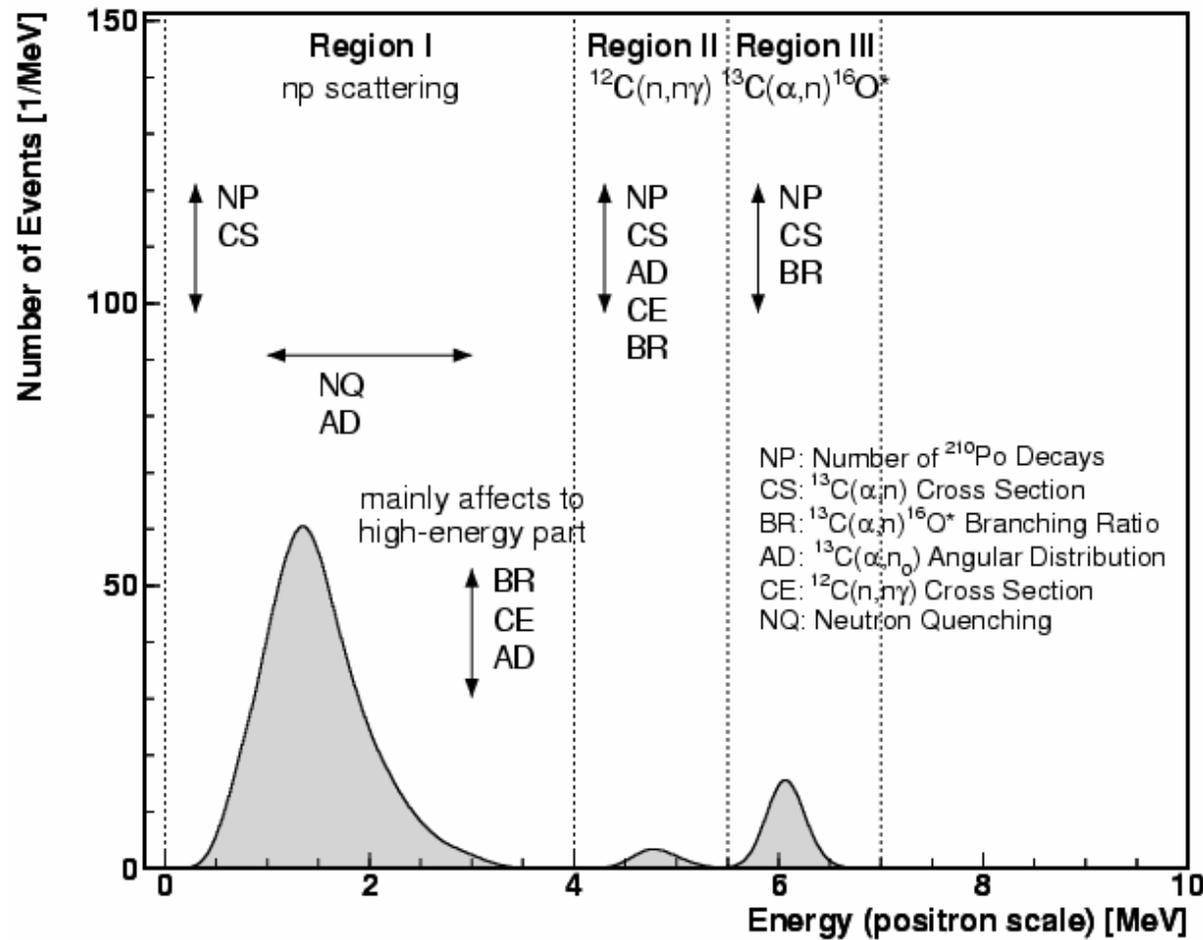
γ による Birks 定数の決定



Am/Be 信号との比較



(α, n) 反応：不定性のまとめ

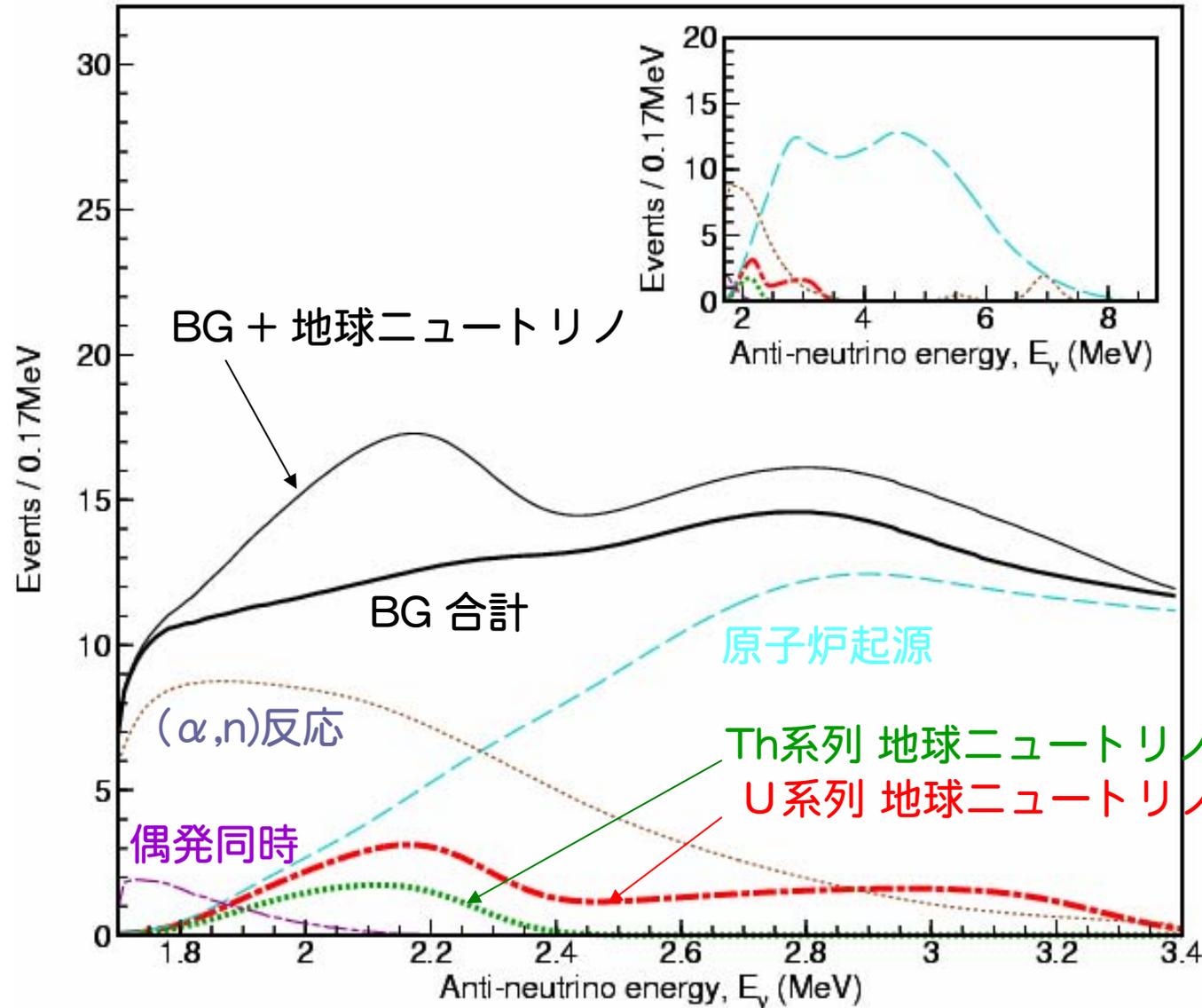


バックグラウンドのまとめ

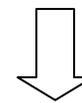
- 原子炉ニュートリノ起源
 - 短寿命核: 80.4 ± 7.2
 - 長寿命核 (使用済み燃料) : 1.9 ± 0.2
- 宇宙線ミュオン起源
 - 中性子 (検出器内) negligible
 - 高速中性子 (検出器外) < 0.1
 - 原子核破砕反応 (${}^9\text{Li}$) 0.30 ± 0.047
- 放射性不純物起源
 - 偶発同時計数 2.38 ± 0.0077
 - 崩壊連鎖 negligible
 - 自発核分裂 < 0.1
 - (α, n) 反応 42.4 ± 11.1
 - (γ, n) 反応 negligible

合計: 127.4 ± 13.3 (syst.) ± 11.3 (stat.)

予測スペクトル

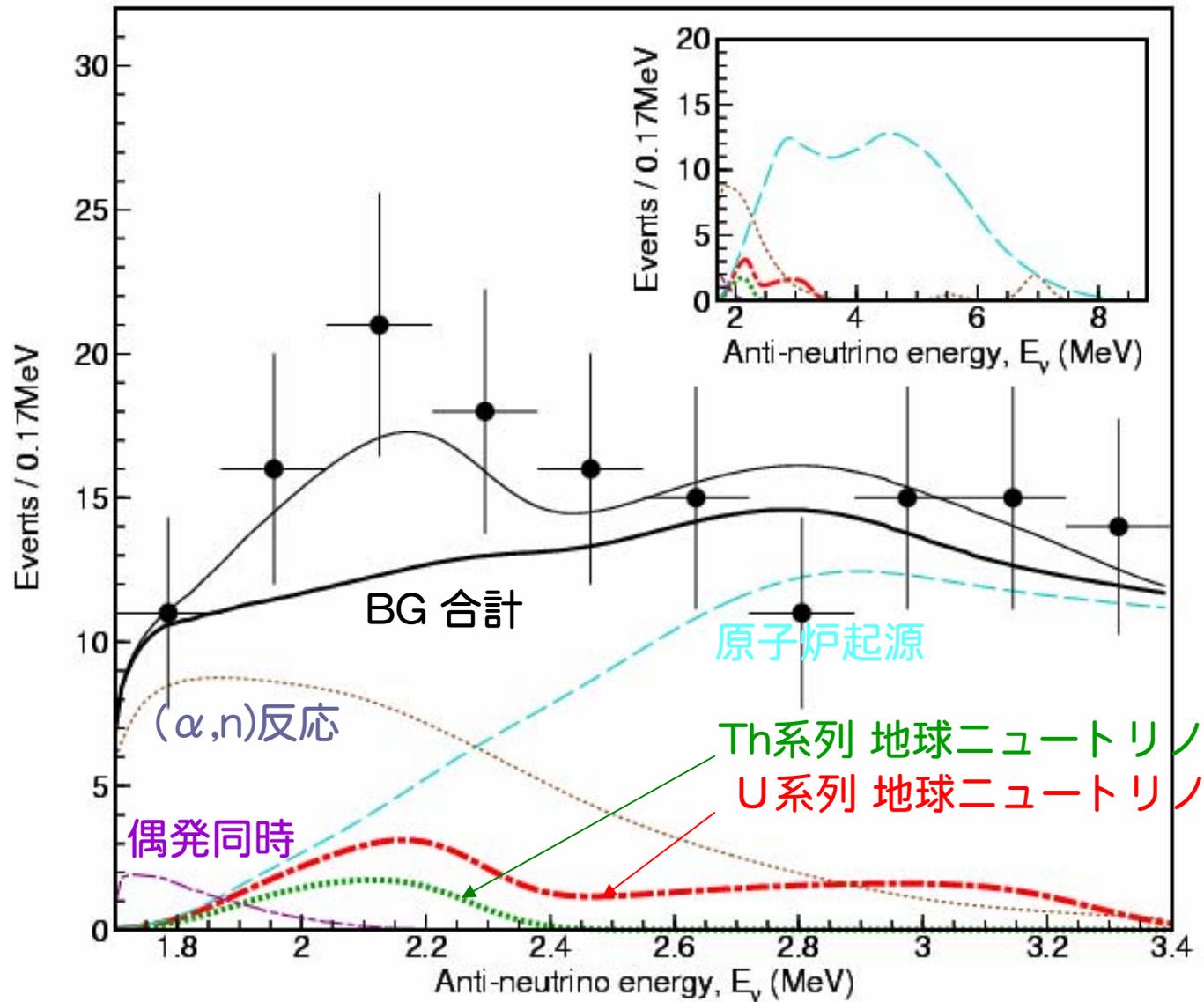


参照地球モデルによる
予測イベント数



(4.0 events)
(14.9 events)

観測データ

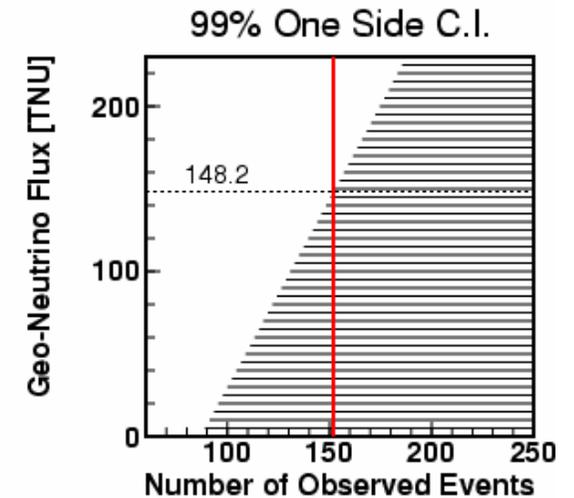
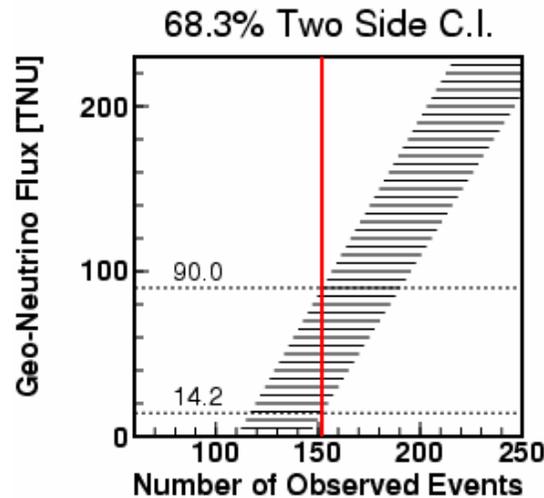
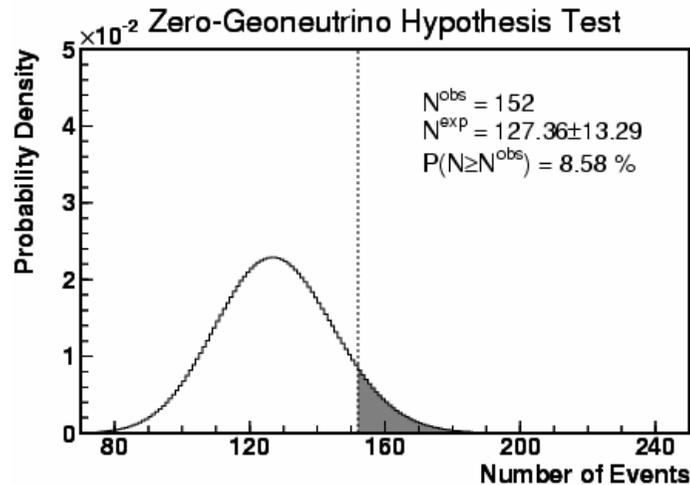


イベント数解析

- 観測数: 152
- バックグラウンド数: 127.4 ± 13.3 (syst.) ± 11.3 (stat.)
- 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)

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

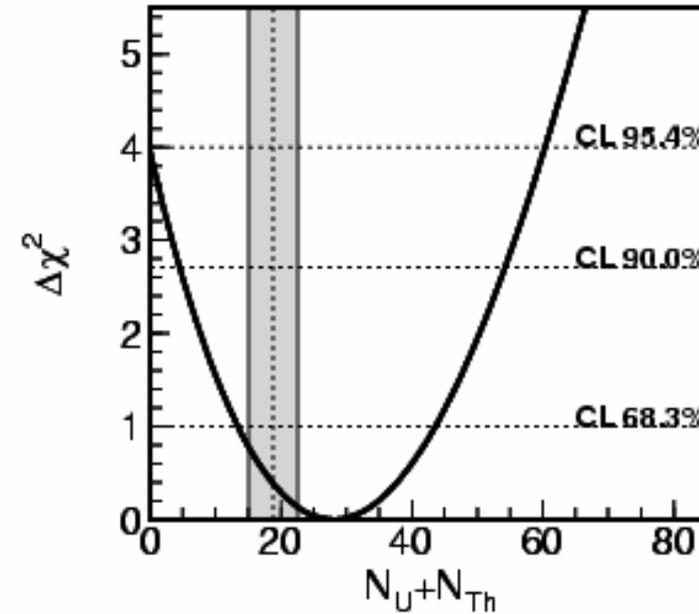
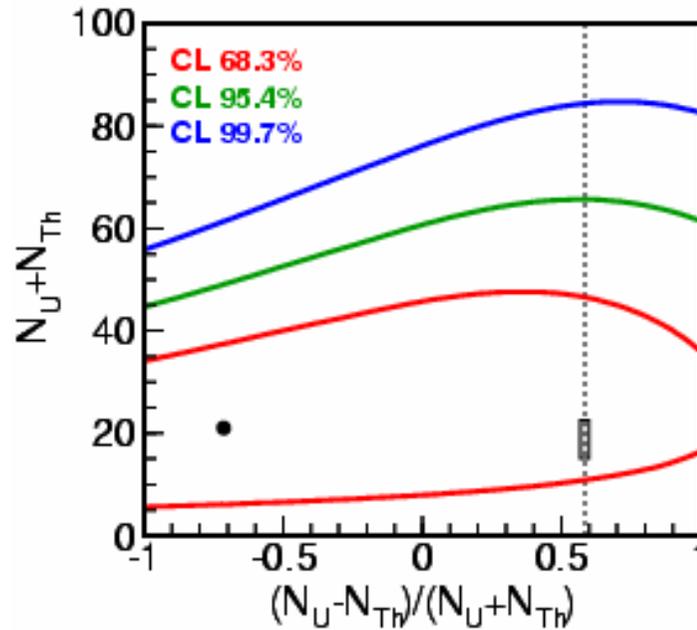
与えられたフラックス F_{geo} のもとで, N イベントを観測する確率



- 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

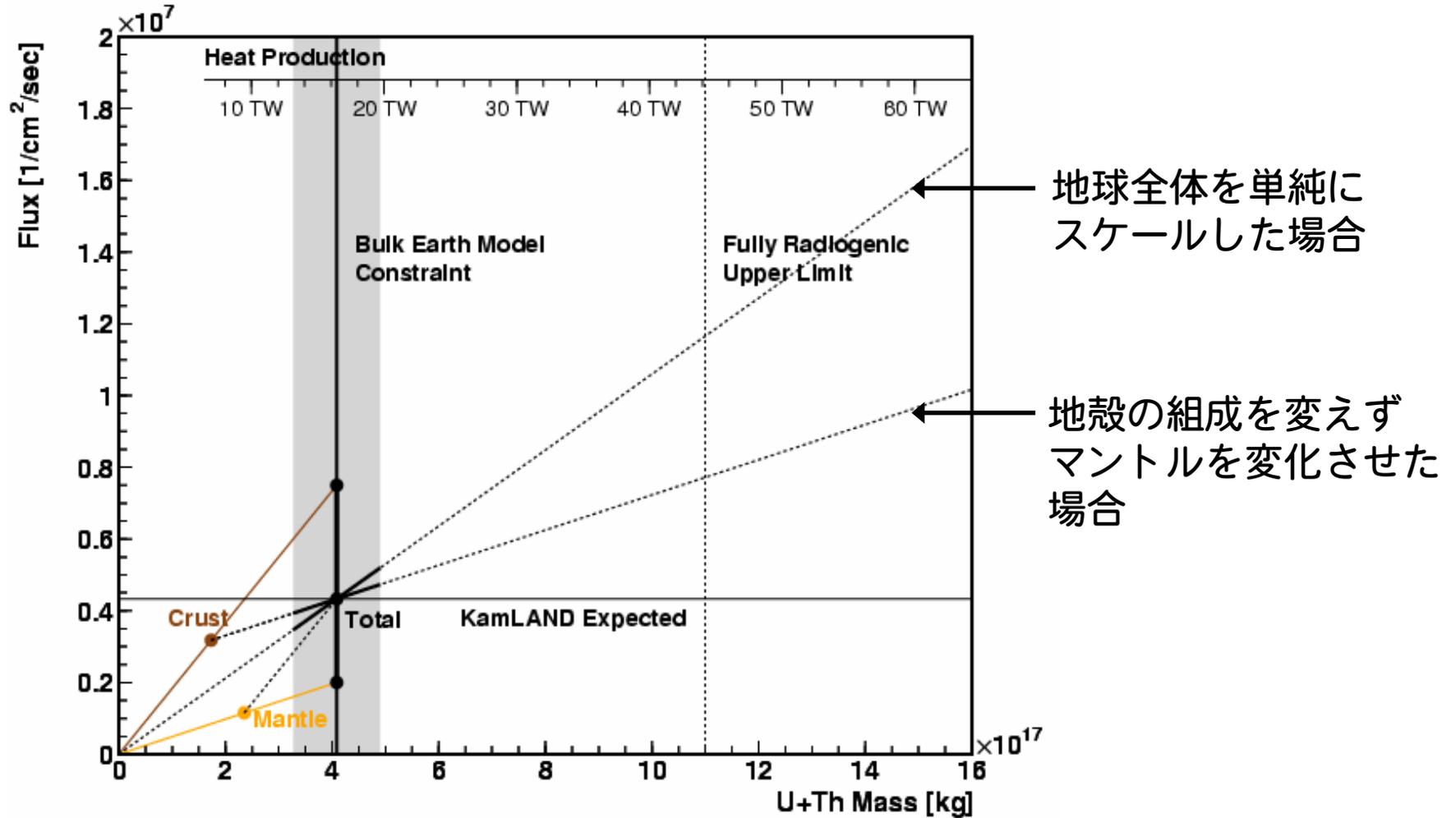
$$\chi_{\text{shape}}^2 = -2 \log \prod_k \frac{dP(E_k; N_U, N_{Th}, \text{BG-parameters})}{dE} + \chi_{\text{BG-parameters}}^2$$



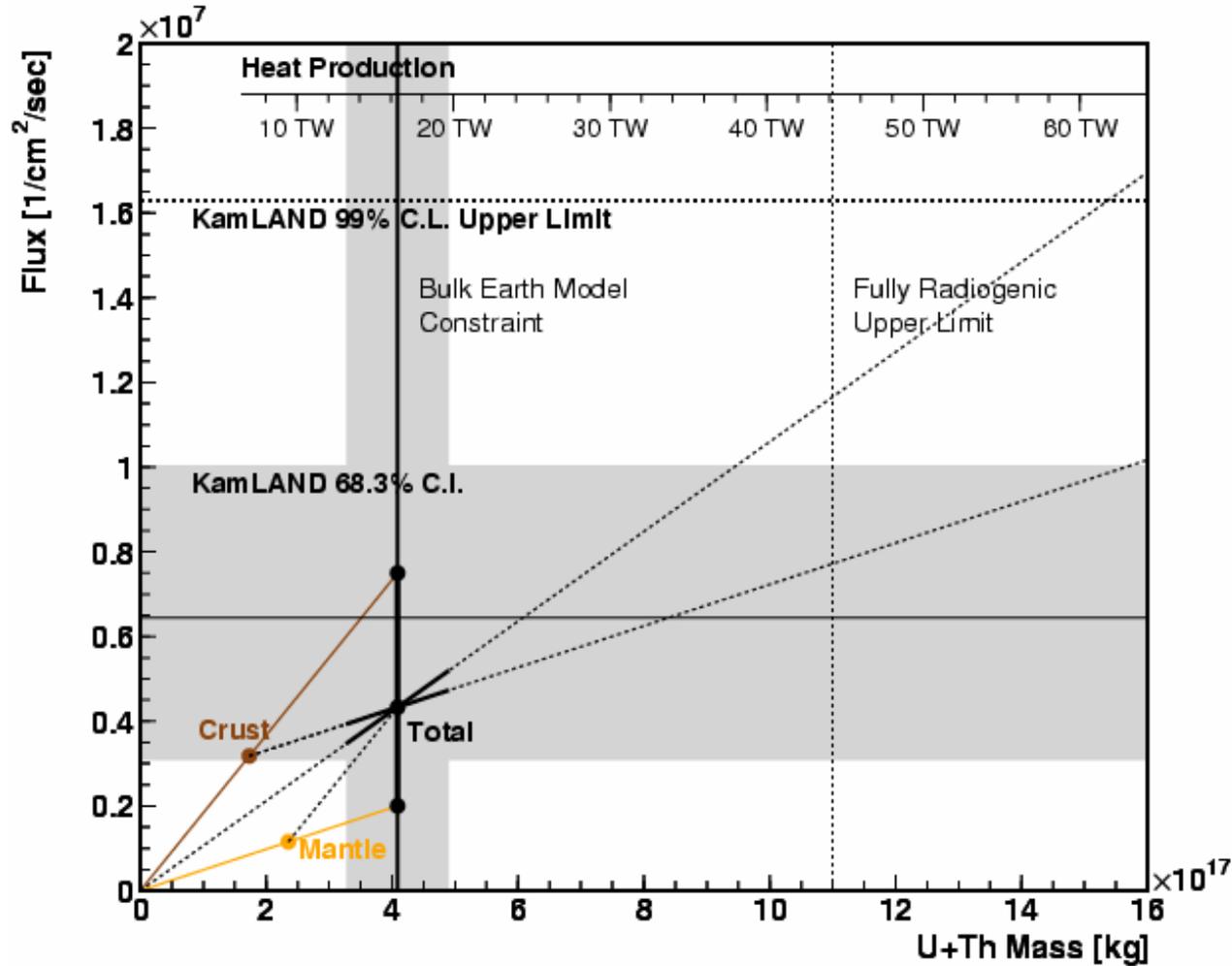
KamLAND データは U/Th 比には感度がない
 ⇒ 地球化学の予測比 Th/U=3.9 を使う

- 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

KamLAND の観測と地球化学モデル

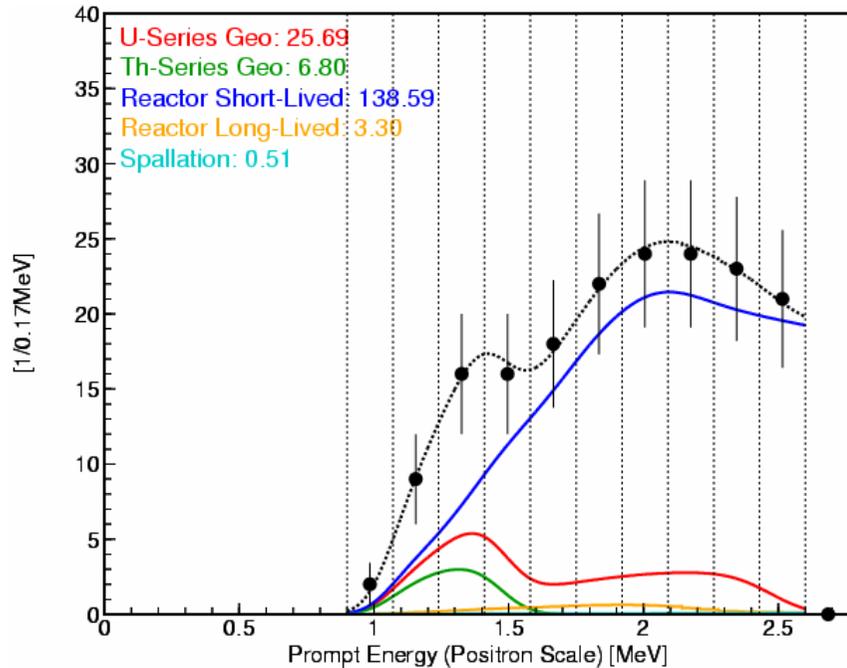


KamLAND の観測と地球化学モデル

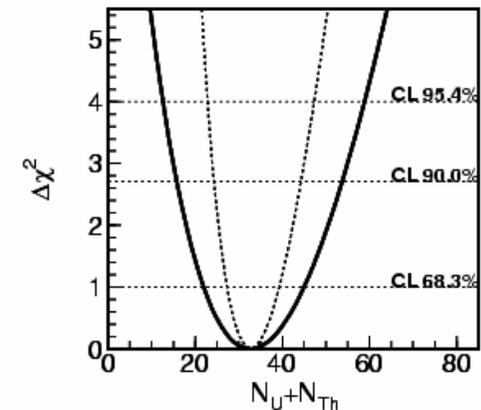
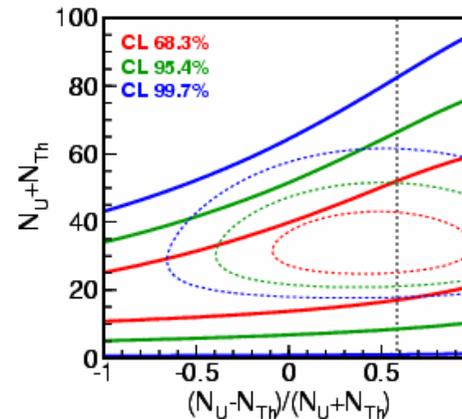


- KamLAND の結果は地球化学による予測と一致
- 99% C.L. 上限は 60 TW に相当

再純化後の KamLAND における観測



210Pbを 10^{-5} にする純化を計画中
 \Rightarrow 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

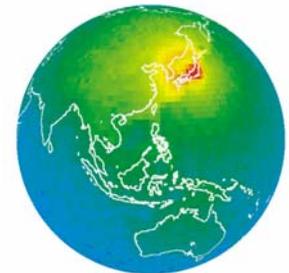
- 有効体積を半径5mから半径5.5mに
- 検出効率を90%に（偶発同時計数の基準を緩和）



- エラー：54% \rightarrow 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

まとめ

- 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、**地球科学モデルによる予測と一致**
 - ✓ 参照モデルより3.7倍以上多いフラックスを与えるモデルは99%C.L. で排除 (60TW相当)
- 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。



2005年7月：地球ニュートリノ観測結果発表



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