

第18回宇宙ニュートリノ研究会

カムランドにおける地球ニュートリノの観測と今後の見通し

(Geoneutrino detection in KamLAND and future Prospect)

October 11, 2005

Itaru Shimizu
Tohoku University

概要

1. ニュートリノと地球物理

- ニュートリノ伝搬理論
- 地球ニュートリノフラックス予測

2. 地球ニュートリノ観測

- 検出器キャリブレーション
- バックグラウンドイベントの見積り
- 観測結果

3. 将来の見通し

- 液体シンチレータ純化
- 有効体積拡大とCombined解析

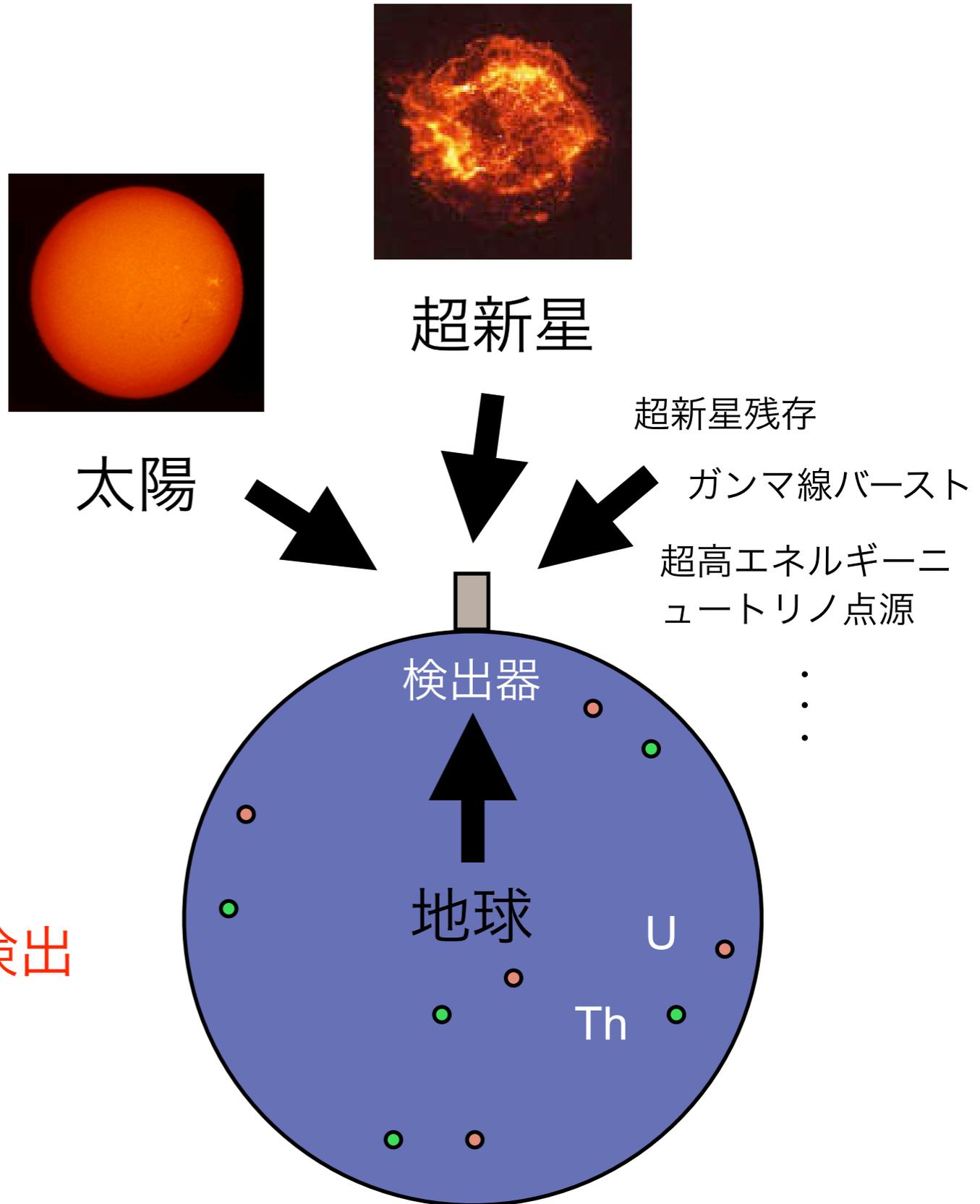
ニュートリノと地球物理

ニュートリノによる天体観測

ニュートリノは非常に透過力が強いので星の内部を見るのに適している

地球ニュートリノ

地球内部のU/Th系列の崩壊に伴って
放出される電子型反ニュートリノを検出



太陽ニュートリノ問題

Homestake

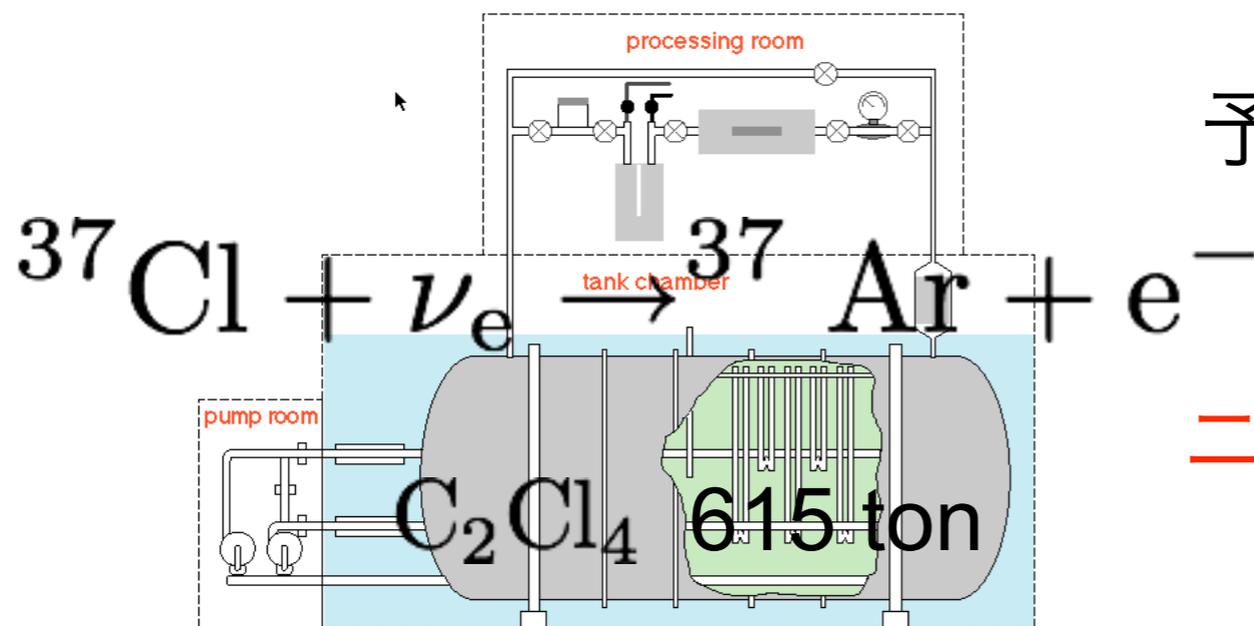
太陽ニュートリノ観測

予測する数よりもずっと少ない

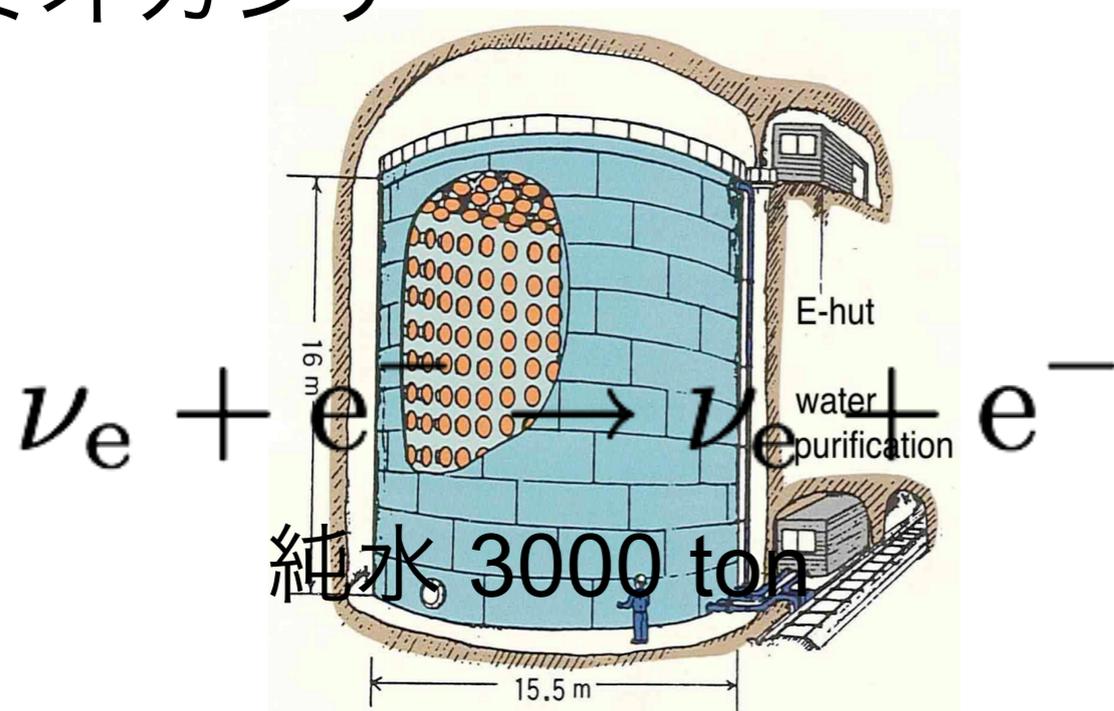


ニュートリノの伝搬の理論に問題？

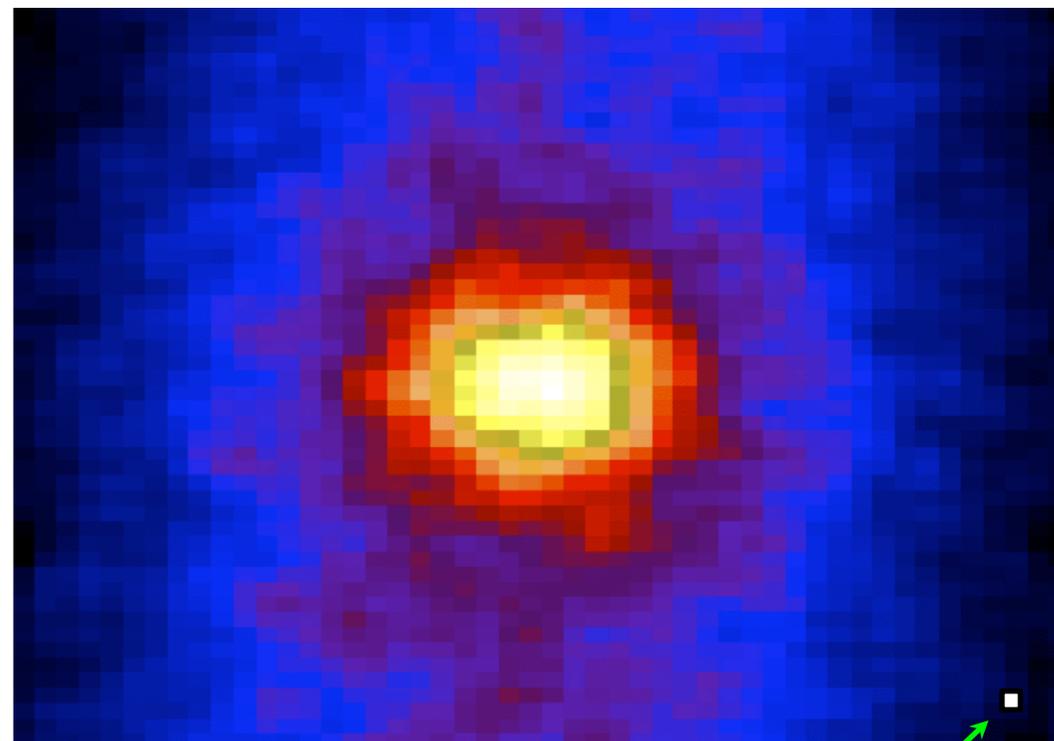
スーパーカミオカンデで
露出時間500日



カミオカンデ



ニュートリノの方向が分かる

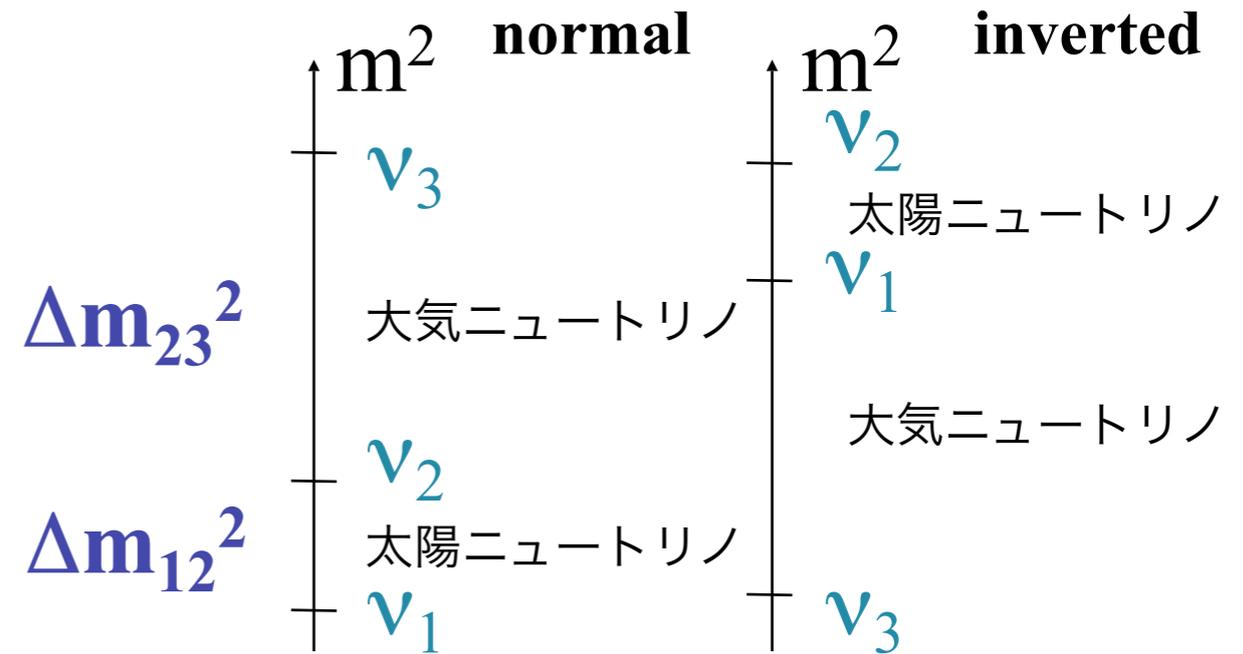


本当の太陽の大きさ

ニュートリノ振動

Maki-Nakagawa-Sakata 行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu1} & V_{\mu2} & V_{\mu3} \\ V_{\tau1} & V_{\tau2} & V_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



θ_{23}

$\theta_{13}, \text{CP位相}$

θ_{12}

マヨラナ位相

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & e^{-i\delta} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\rho} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

大気ニュートリノ

太陽ニュートリノ

6 パラメータ : 3 混合角, 2 質量差, 1 CP位相

+ 2 マヨラナ位相

ニュートリノ振動実験で測定している

ニュートリノ振動実験

自然のニュートリノ

- 太陽ニュートリノ

$$\nu_e \longrightarrow \nu_x$$

Homestake, SAGE, GALLEX, GNO, SNO, Super-Kamiokande

- 大気ニュートリノ

$$\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \longrightarrow \nu_x (\bar{\nu}_x)$$

Kamiokande, IMB, Super-Kamiokande, Soudan2 ...

人工のニュートリノ

- 加速器ニュートリノ

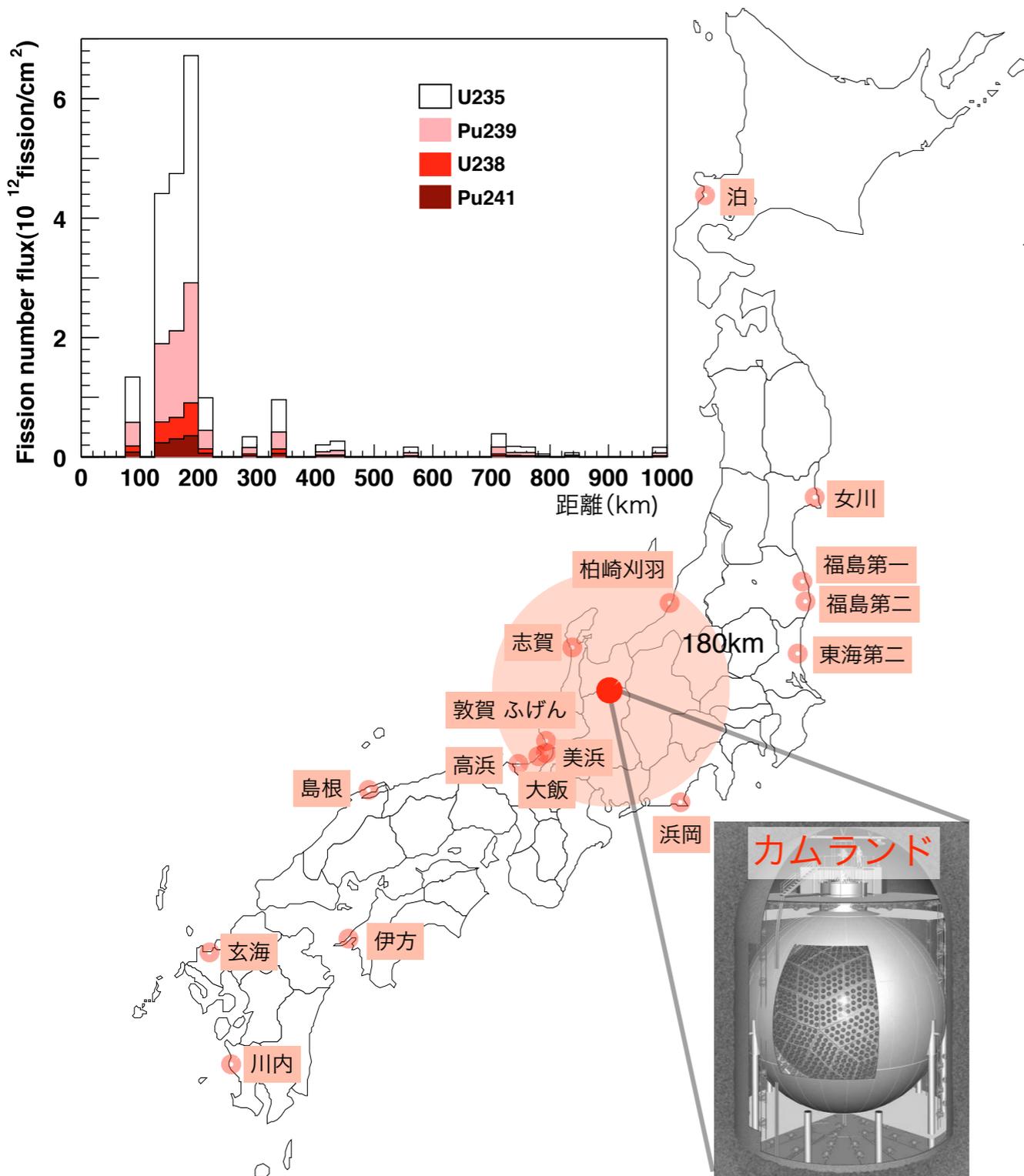
K2K, LSND, KARMEN, MiniBooNE ...

- 原子炉ニュートリノ

Bugey, CHOOZ, Palo Verde, KamLAND ...

K2KとKamLANDでニュートリノの消失を観測

原子炉ニュートリノ観測



2世代ニュートリノ振動

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 [\text{eV}^2] l [\text{m}]}{E [\text{MeV}]}\right)$$

最大感度領域

$$\Delta m^2 = (1/1.27) \cdot (E [\text{MeV}] / L [\text{m}]) \cdot (\pi/2) \\ \sim 3 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

→ LMA (大混合角解)

ΔL (原子炉からの距離分布)

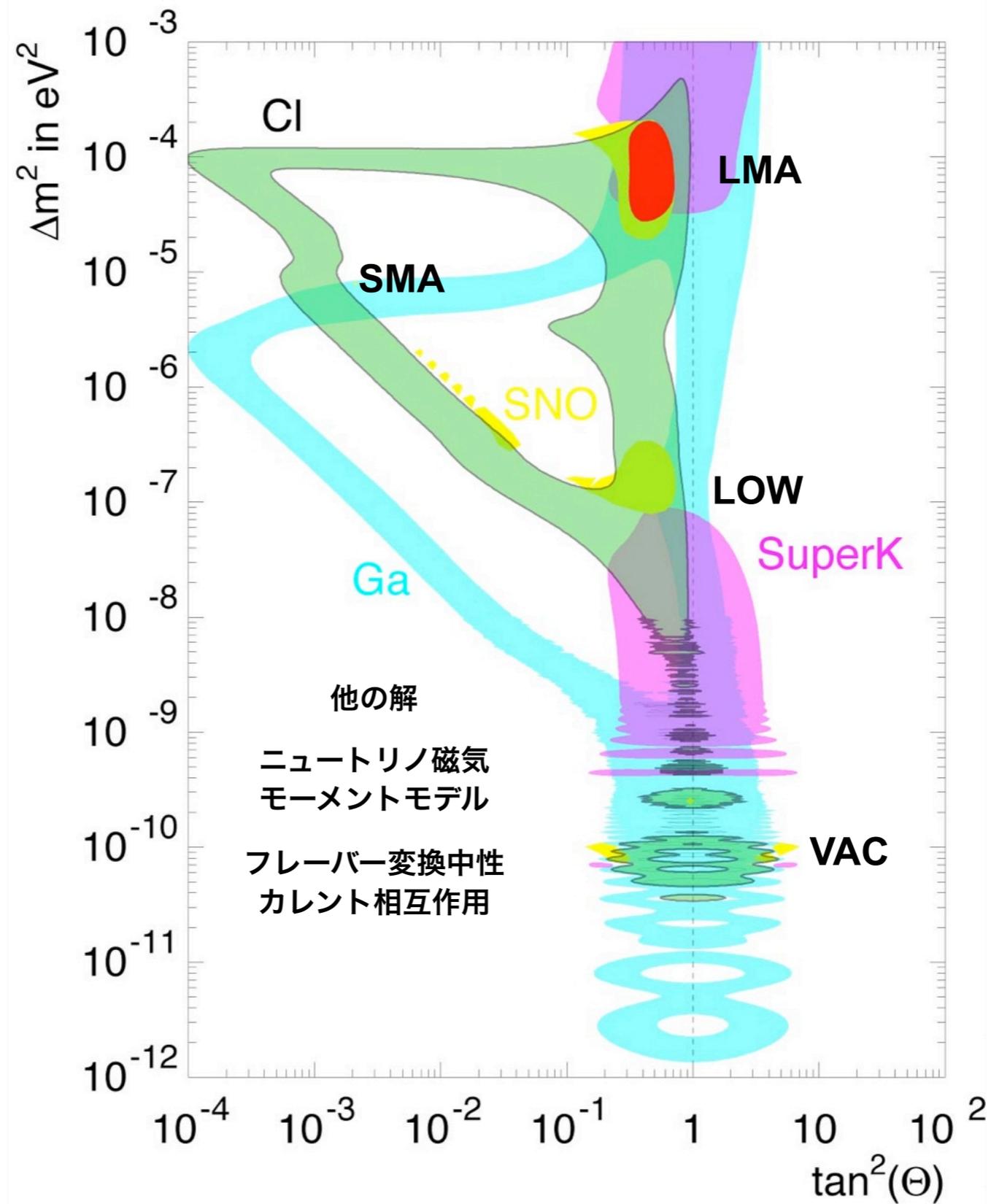
$175 \pm 35 \text{ km} \quad \sim 20\%$

ΔE (エネルギー分解能)

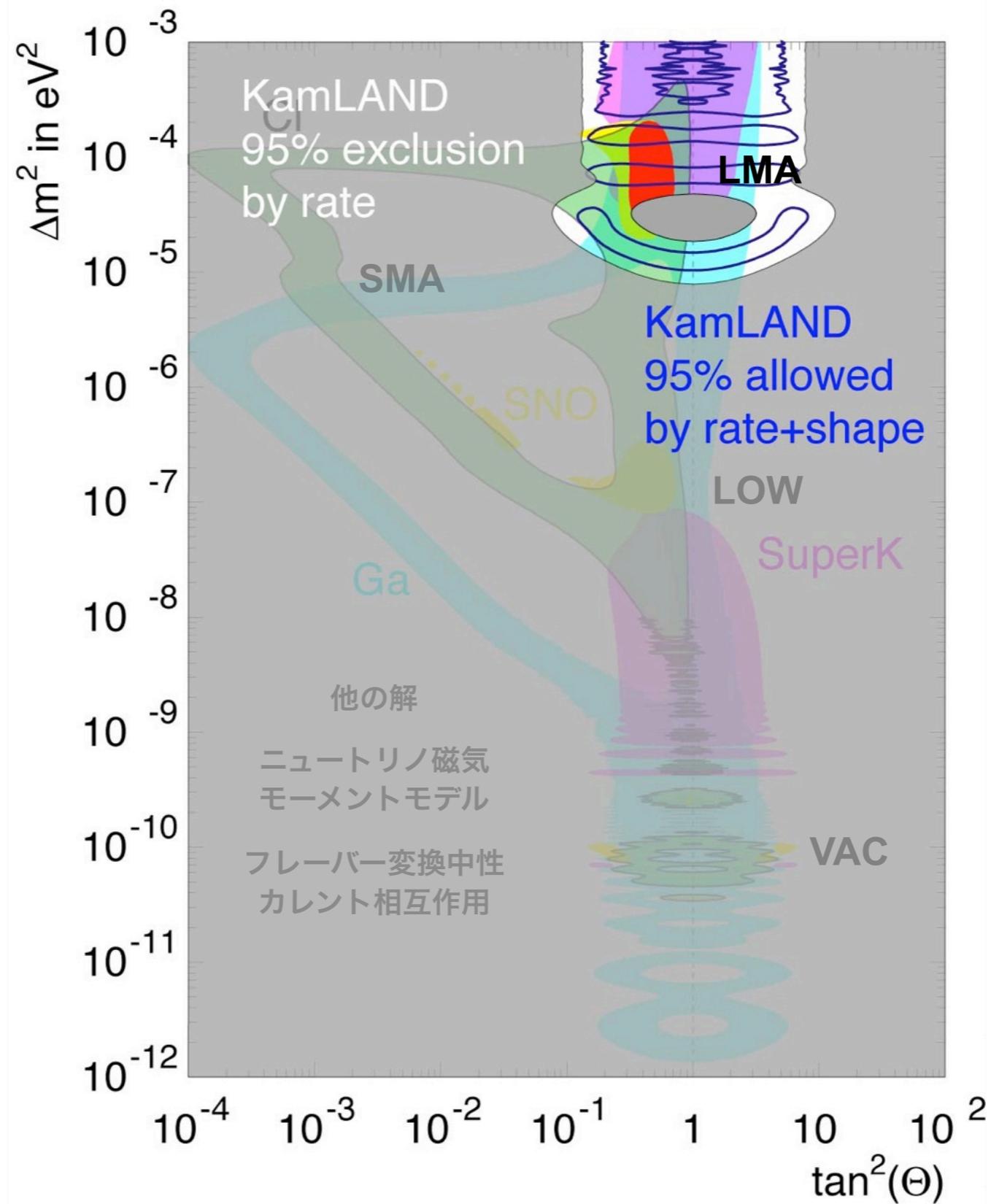
17 inch PMTs $7.3\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$
 17 inch + 20 inch $6.2\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$

ニュートリノ振動を見るのに適している

各太陽ニュートリノ実験を説明できる振動パラメータ



各太陽ニュートリノ実験を説明できる振動パラメータ



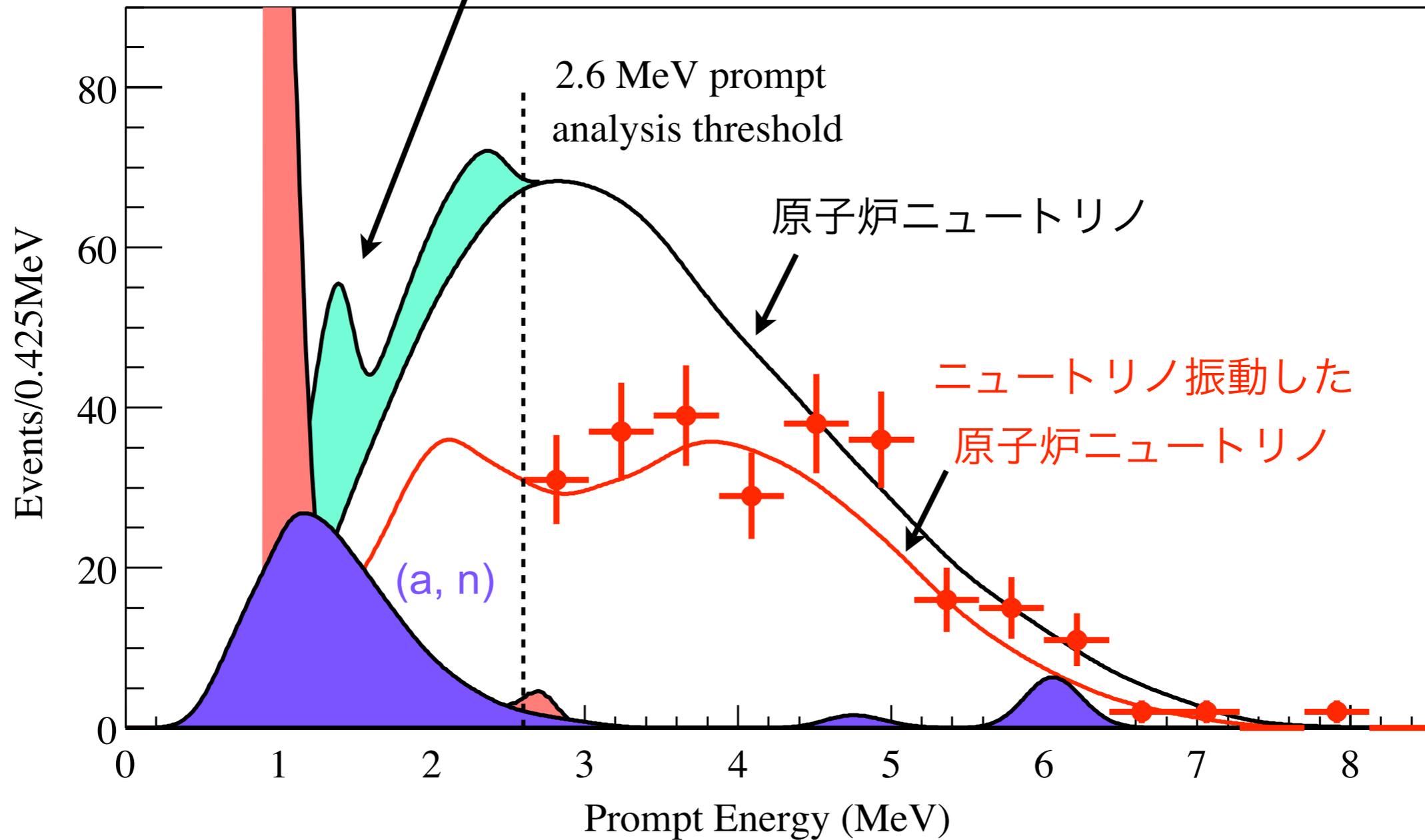
原子炉ニュートリノ観測

地球ニュートリノ

実測定時間 515.1日

偶発イベント

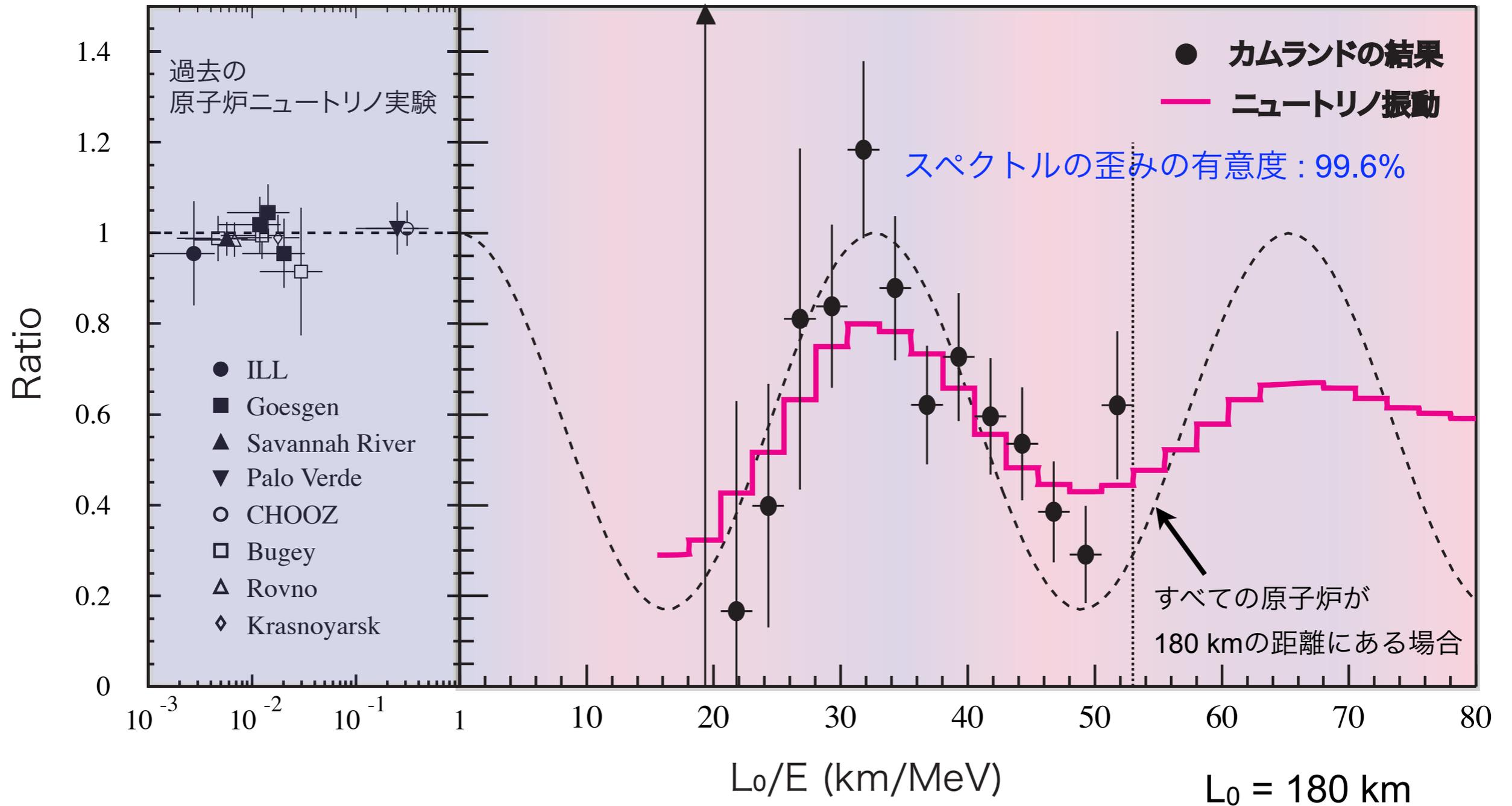
有効体積 543.3 ton (半径5.5 m球)



$E_{\text{prompt}} > 2.6 \text{ MeV}$ で原子炉ニュートリノ振動解析

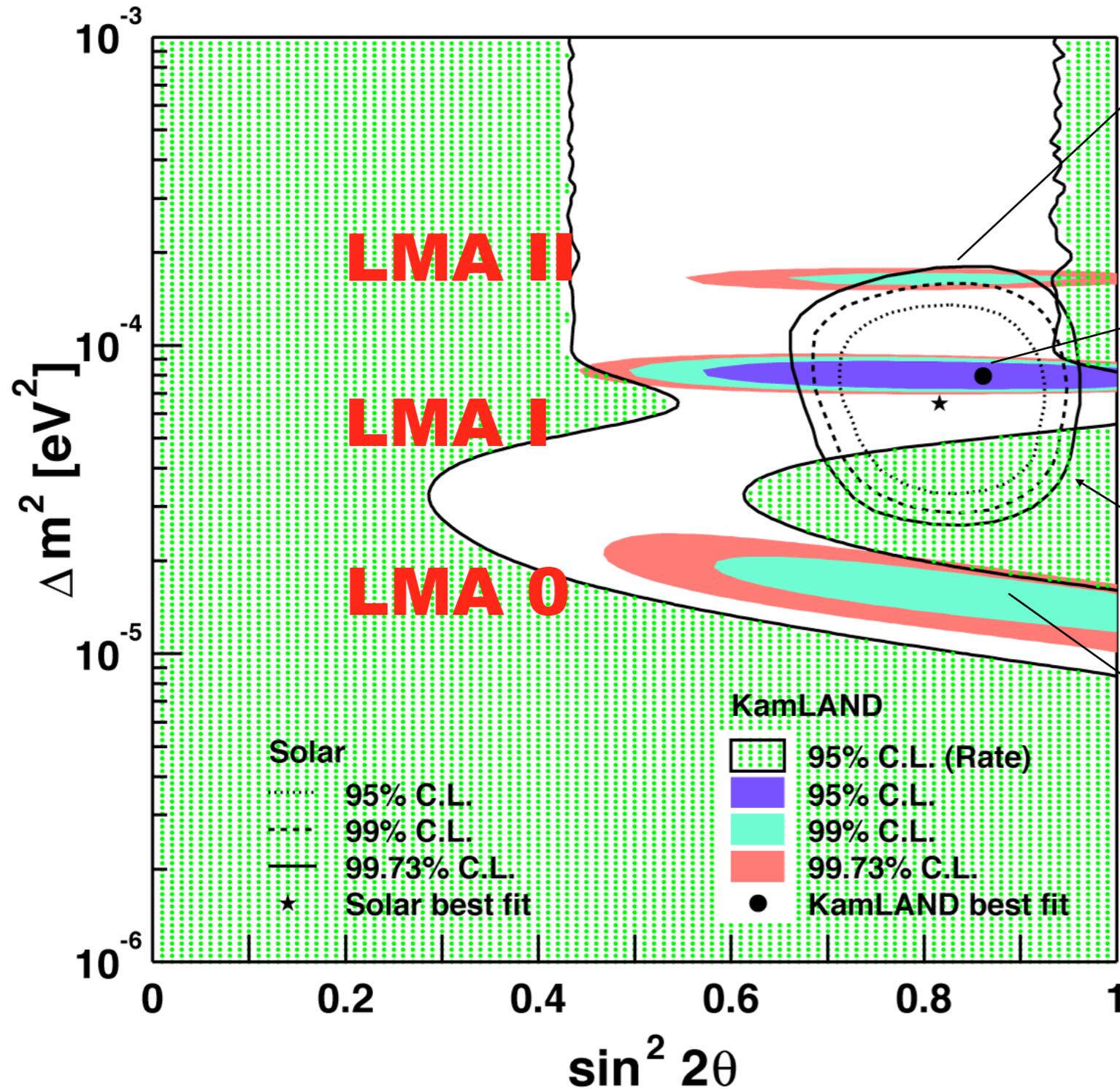
L/E プロット

約1周期分の振動パターンを観測



ニュートリノ振動が起きている強い証拠

ニュートリノ振動解析



LMA II は98.0%
の信頼度で排除

KamLAND (2-flavor)

best-fit

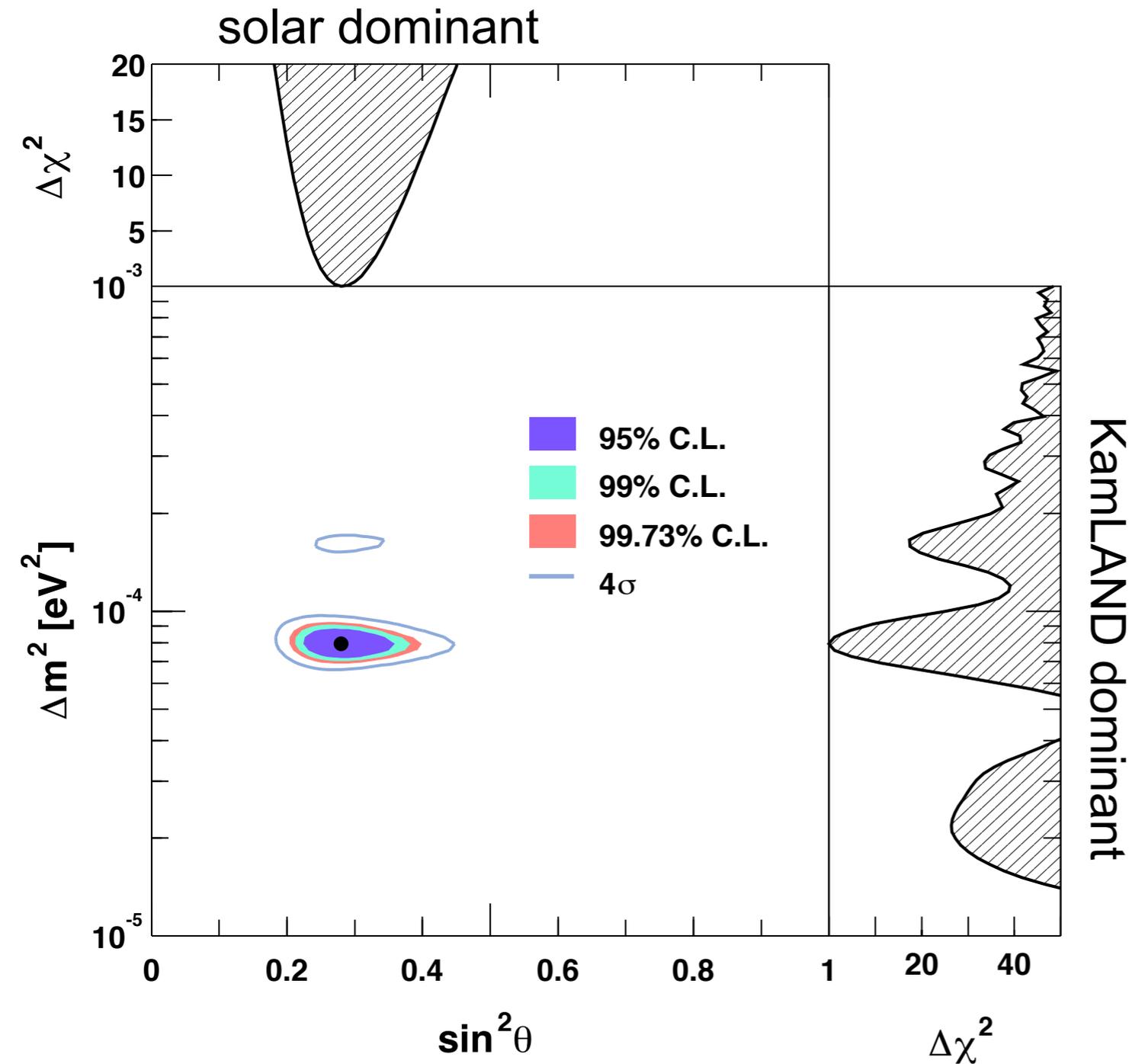
$$\sin^2 2\theta = 0.86$$

$$\Delta m^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

太陽ニュートリノの結果と一致

LMA 0 は97.5%
の信頼度で排除

太陽ニュートリノ実験 + KamLAND



グローバル解析

太陽ニュートリノ実験

Homestake, SAGE, GALLEX, GNO,
SNO, Super-Kamiokande

+

KamLAND

振動パラメータ

$$\tan^2\theta = 0.40^{+0.10}_{-0.07}$$

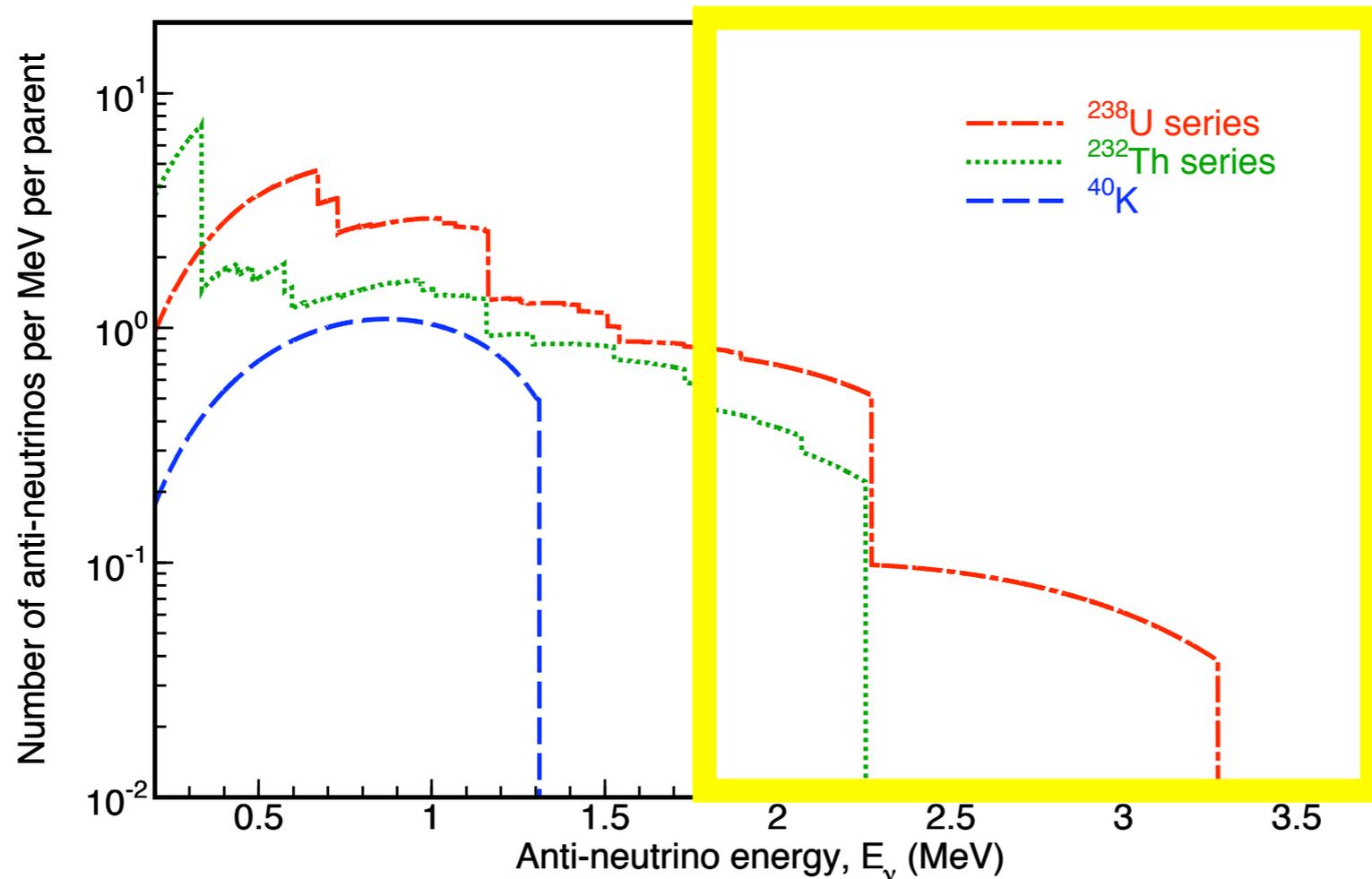
$$\Delta m^2 = 7.9^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

LMA II, LMA 0をそれぞれ > 3 σ , > 4 σ の信頼度で排除

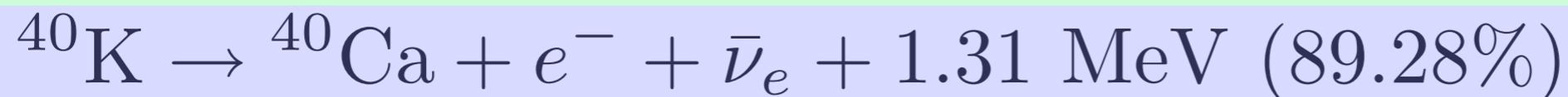
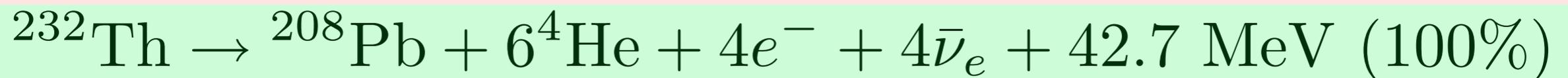
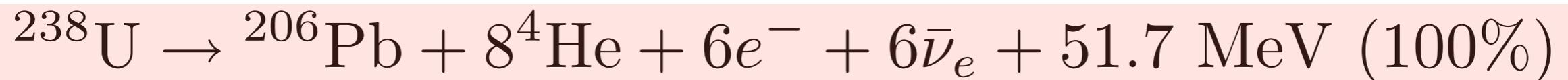
地球ニュートリノフラックス予測

地球内部起源ニュートリノ

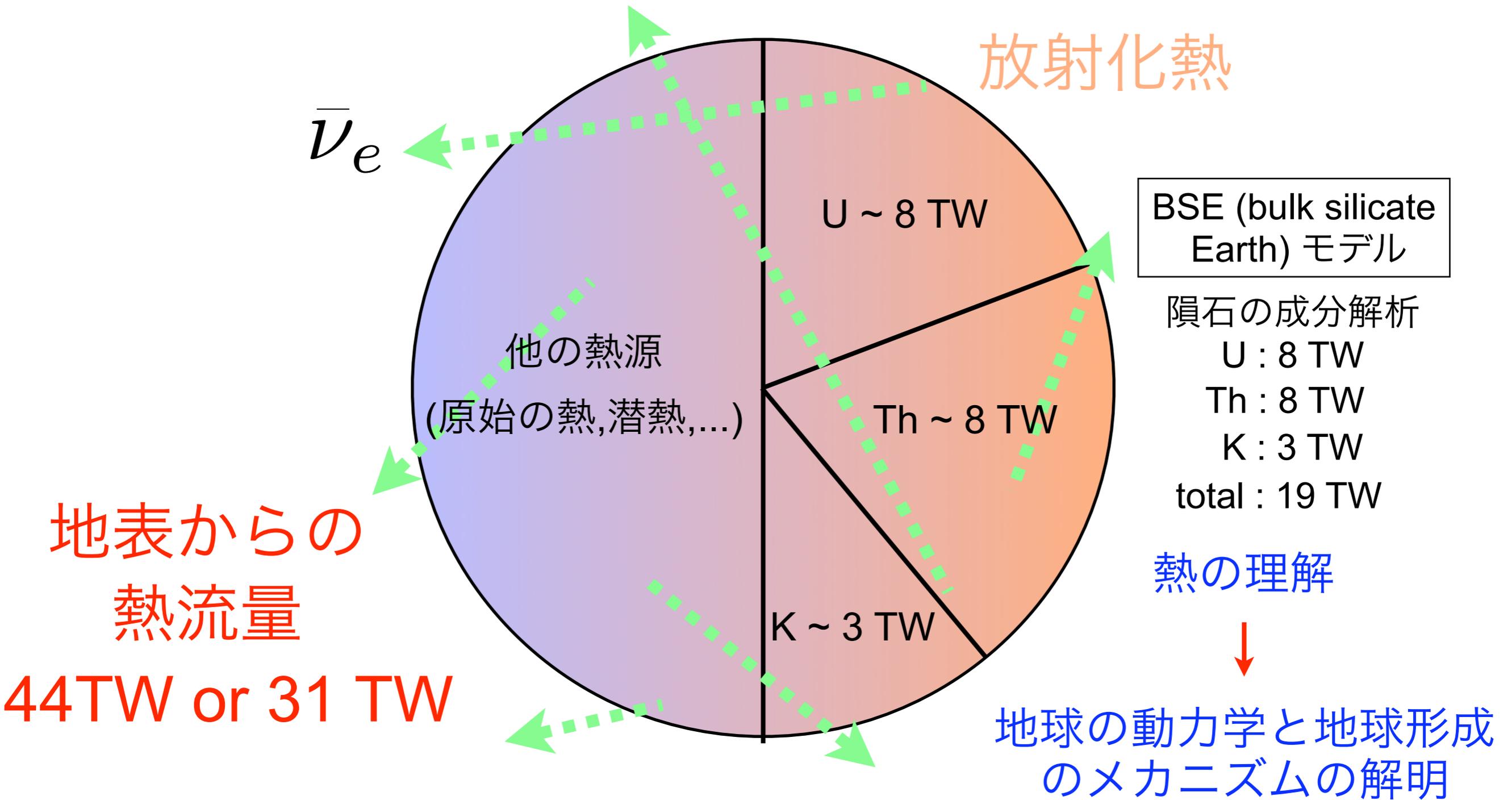
反ニュートリノフラックス



β崩壊



地球内部のエネルギー



地球ニュートリノ検出によって放射化熱を直接テストできる

地球化学参照モデル

大陸上部地殻 U : 2.8 ppm / Th : 10.7 ppm

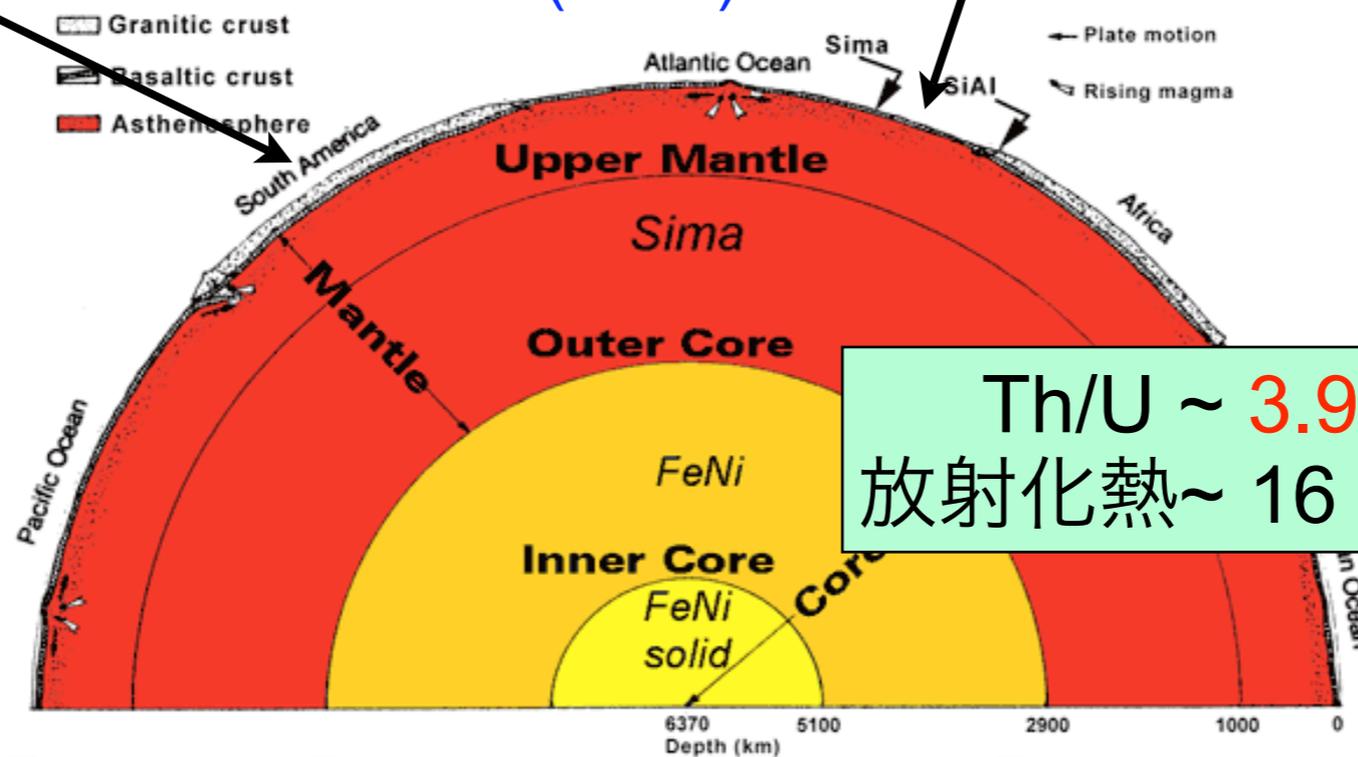
大陸中部地殻 U : 1.6 ppm / Th : 6.1 ppm

大陸下部地殻 U : 0.2 ppm / Th : 1.2 ppm

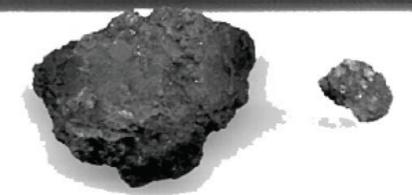
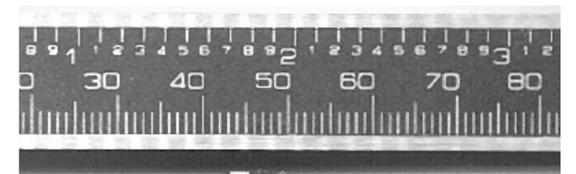
海洋地殻

U : 0.10 ppm / Th : 0.22 ppm

Rudnick et al. (1995)



コンドライト隕石



Th/U ~ 3.9
放射化熱 ~ 16 TW

UとThの濃度よりもその比のほうが良く理解されている

マントル

U : 0.012 ppm / Th : 0.048 ppm

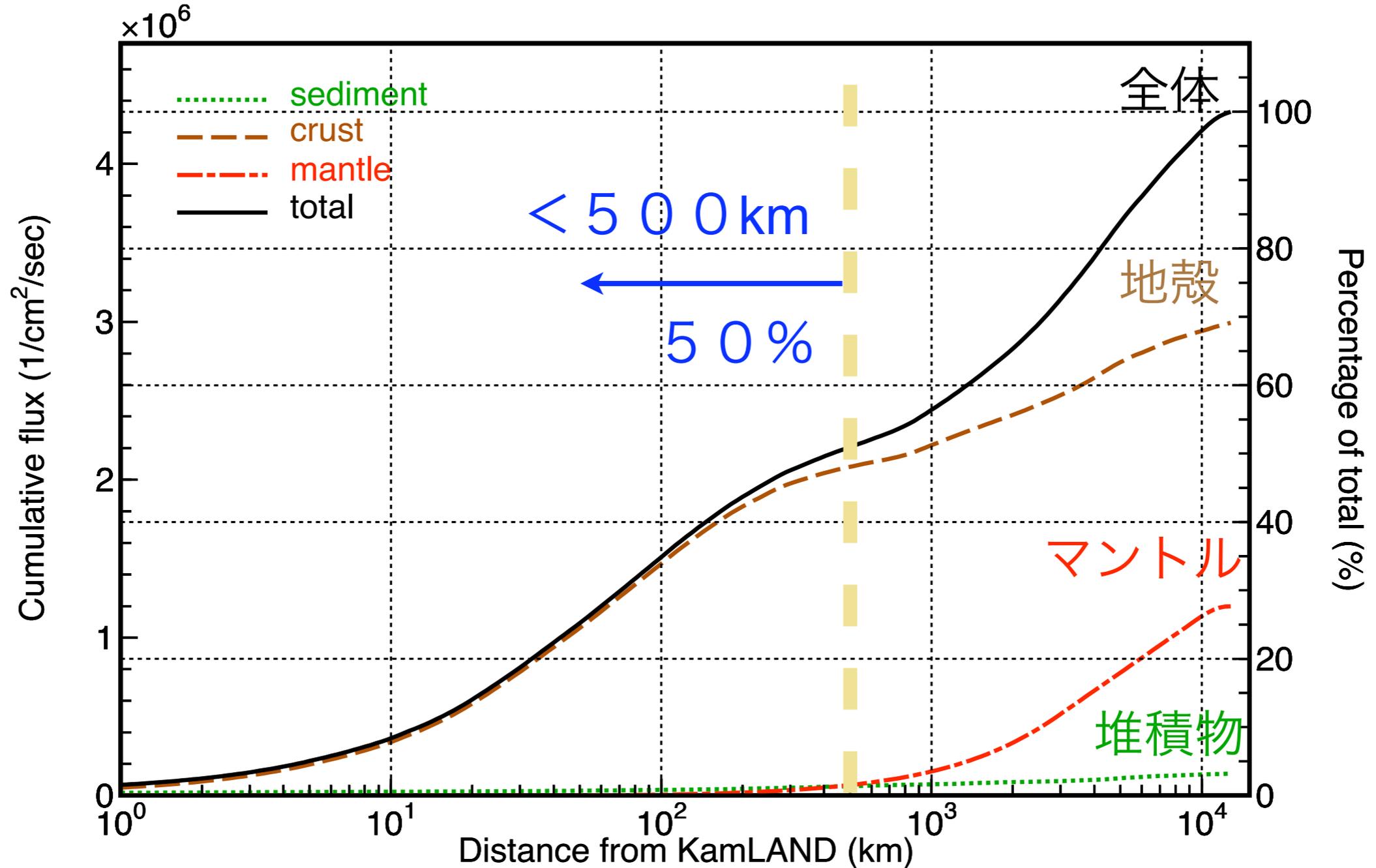
外核・内核

U : 0 ppm / Th : 0 ppm

(核にU/Thはないとされている)

マントルの組成 = BSEモデル - 地殻の組成

距離と累積フラックス



ニュートリノ振動

$$P(E, L) \sim 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{12} \quad (\text{constant suppression})$$

距離 500 km 以内からの寄与が全体の約 50%

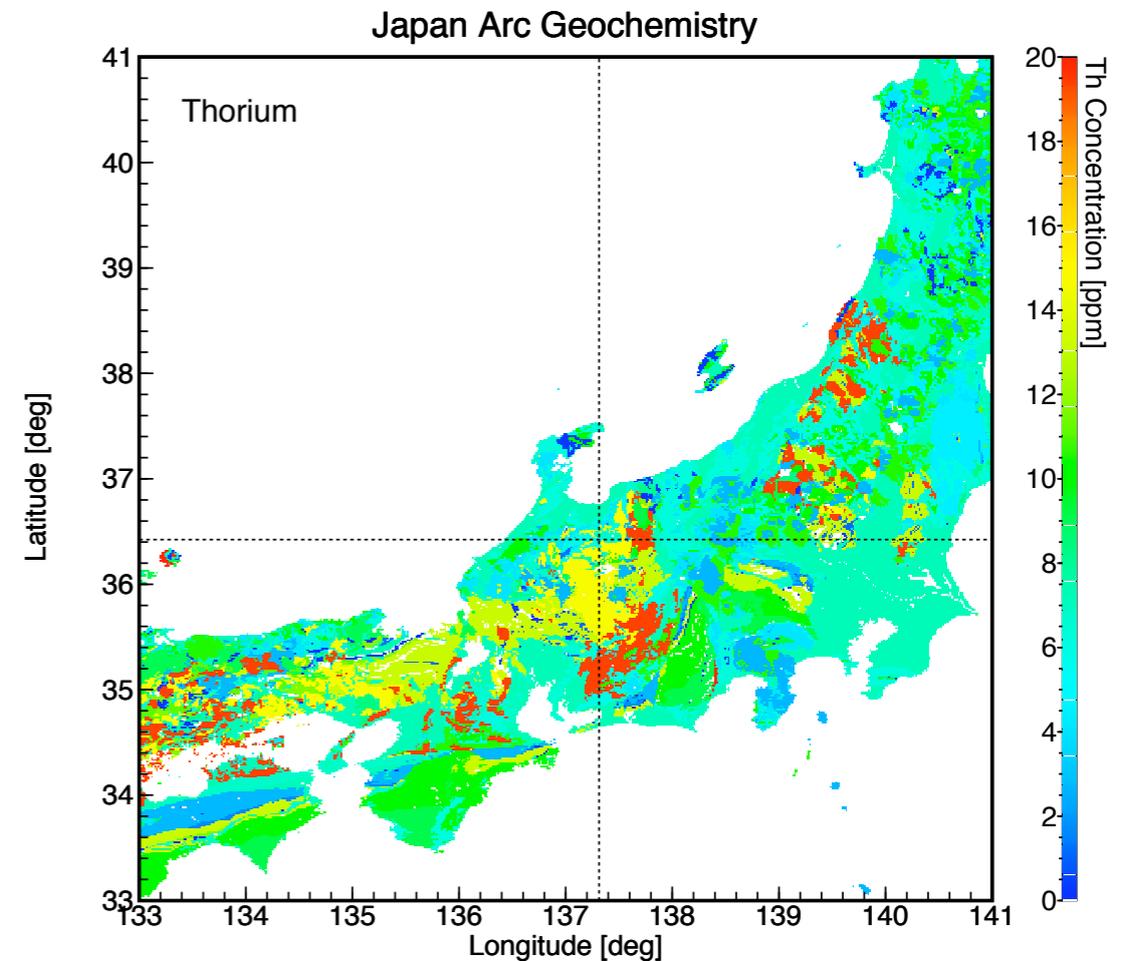
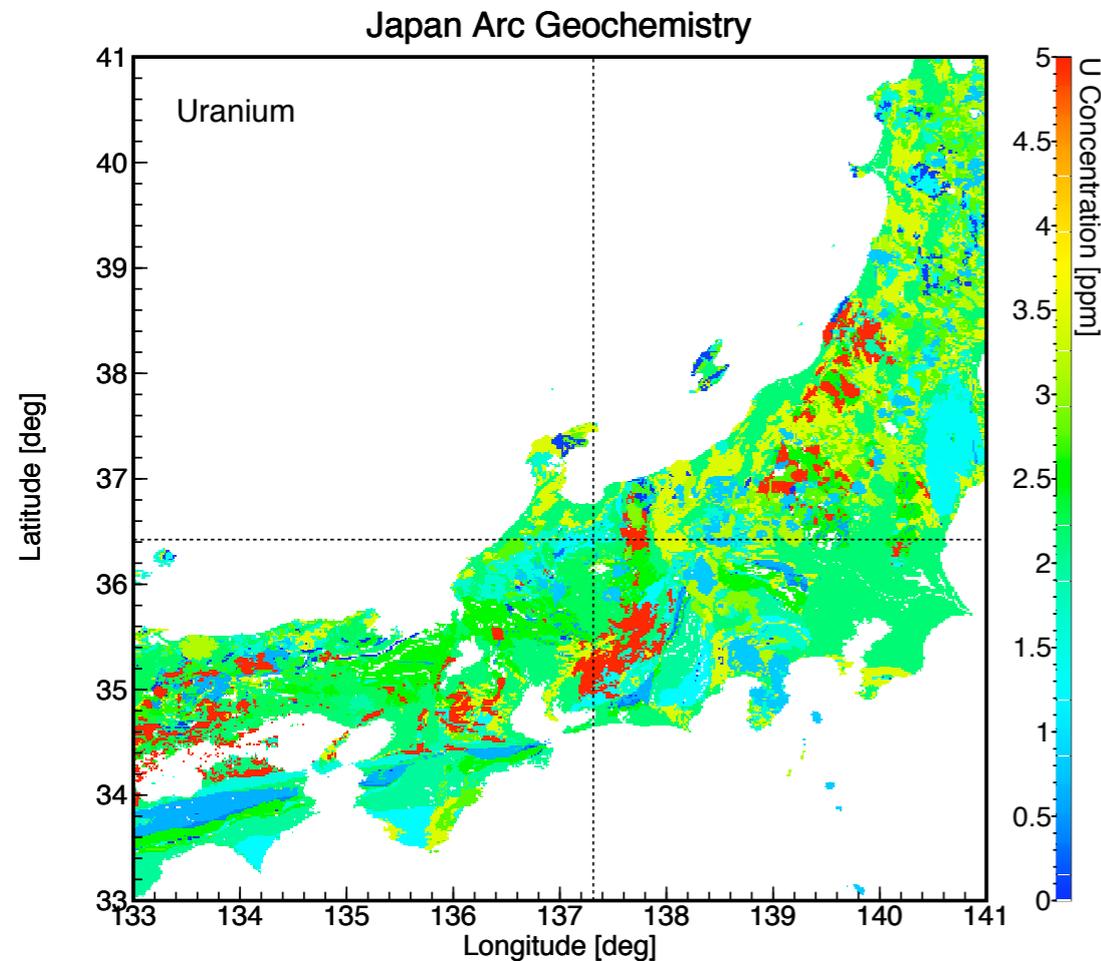
日本のU/Thの分布地図

上部地殻の平均組成

地質図+岩石標本分析値
(Togashi et al.)

U : 2.32 ppm

Th : 8.3 ppm



表層のU/Th分布が深さ 5 kmまで続いていると仮定



周辺地質の影響は全フラックスに対して3%程度

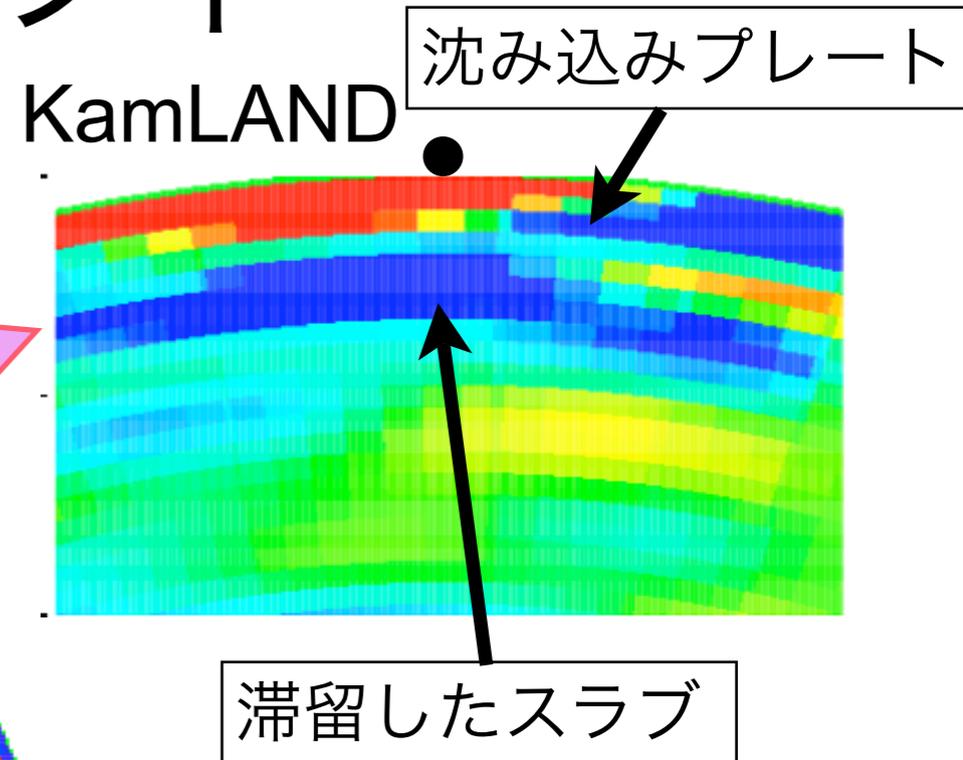
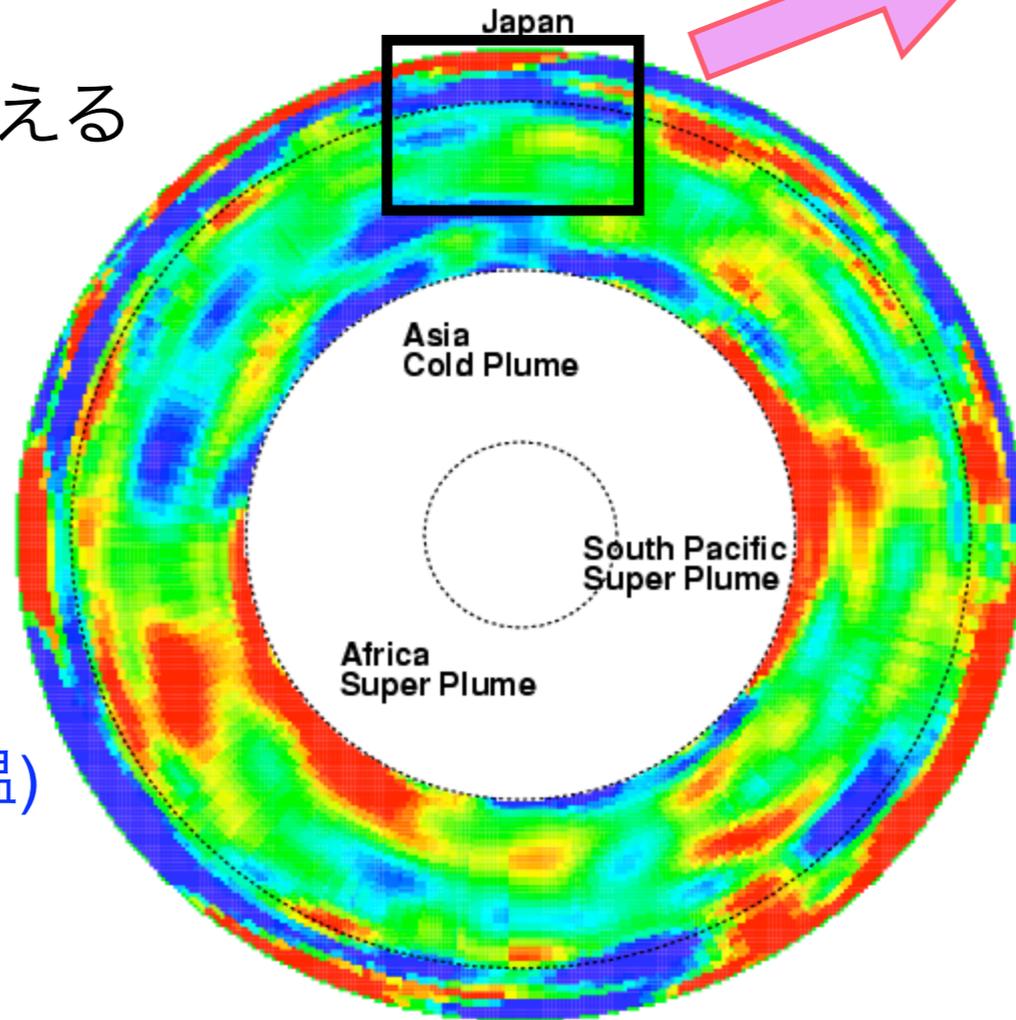
マントルトモグラフィ

地震波速度異常

速度異常が+1%を超える部分からのフラックスへの寄与は、マントル全体の10.9%

低速 (高温)

高速 (低温)



高速 (低温) 部分の集中沈み込みプレートの厚さ
~ 50 km

(海洋地殻 : ~ 6 km)

U/Th濃度は海洋地殻に近い可能性も?

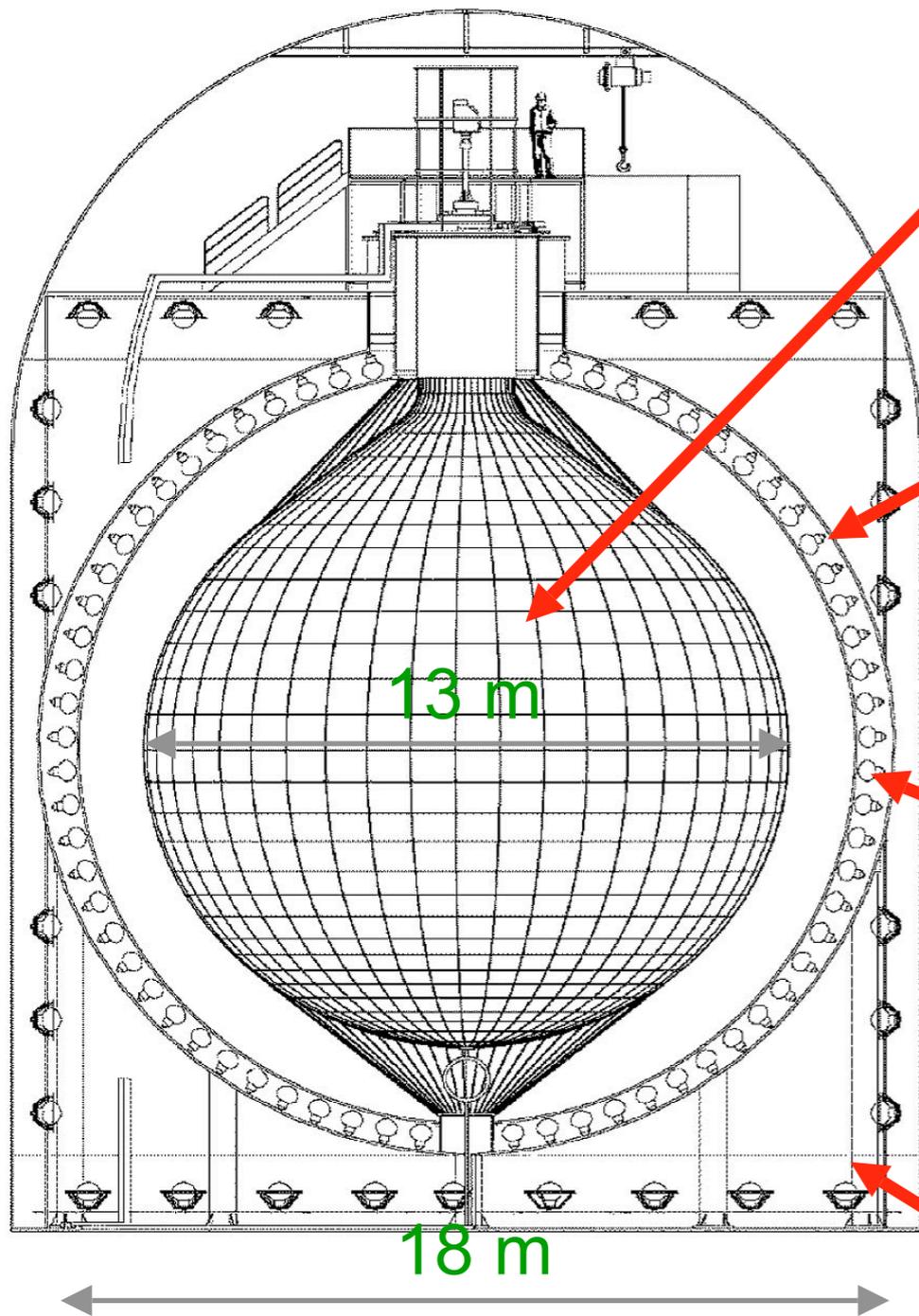
スラブ・沈み込みプレートの組成 (海洋地殻 : マントル = 1 : 9)

高速部分の影響は全フラックスに対して2%程度

地球ニュートリノ観測

KamLAND検出器

Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector



1,000トン液体シンチレータ

80% (ドデカン) + 20% (プソイドクメン)
+ 1.52 g/l PPO

3,000 m³ ステンレスタンク

パラフィンオイルとドデカンの
混合物を封入

1325 17-inch + 554 20-inch PMTs

2003年2月に稼働
光電面占有率 : 22% → 34%

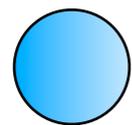
水チェレンコフ外部検出器

電子型反ニュートリノ検出

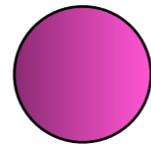
シンチレーション光

先発信号

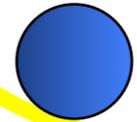
電子型反ニュートリノ



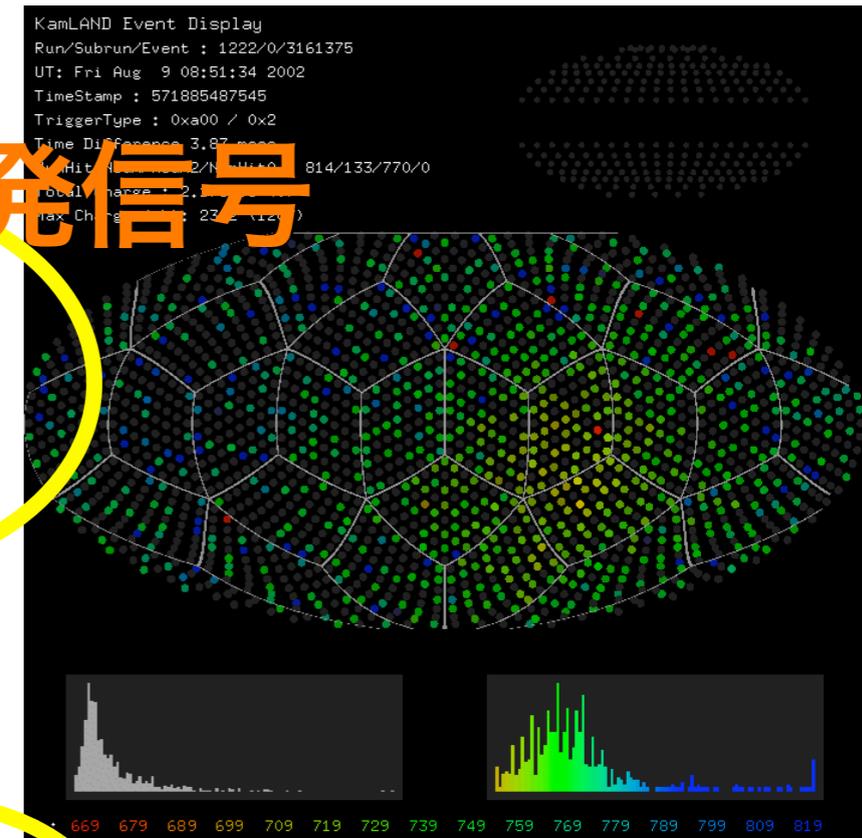
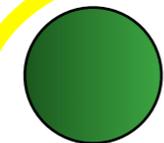
陽子



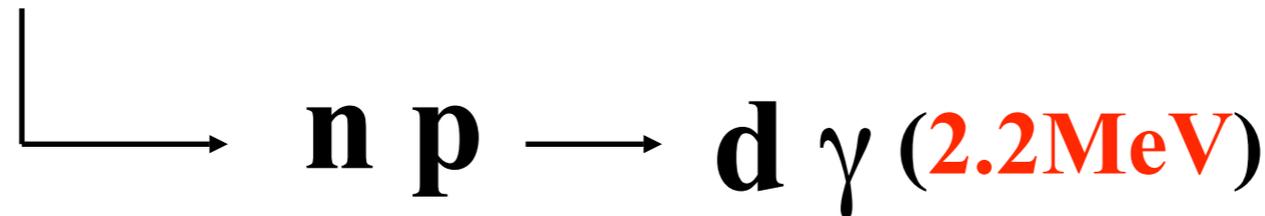
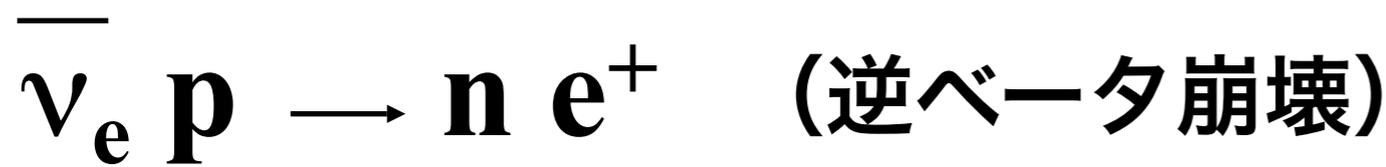
陽電子



中性子

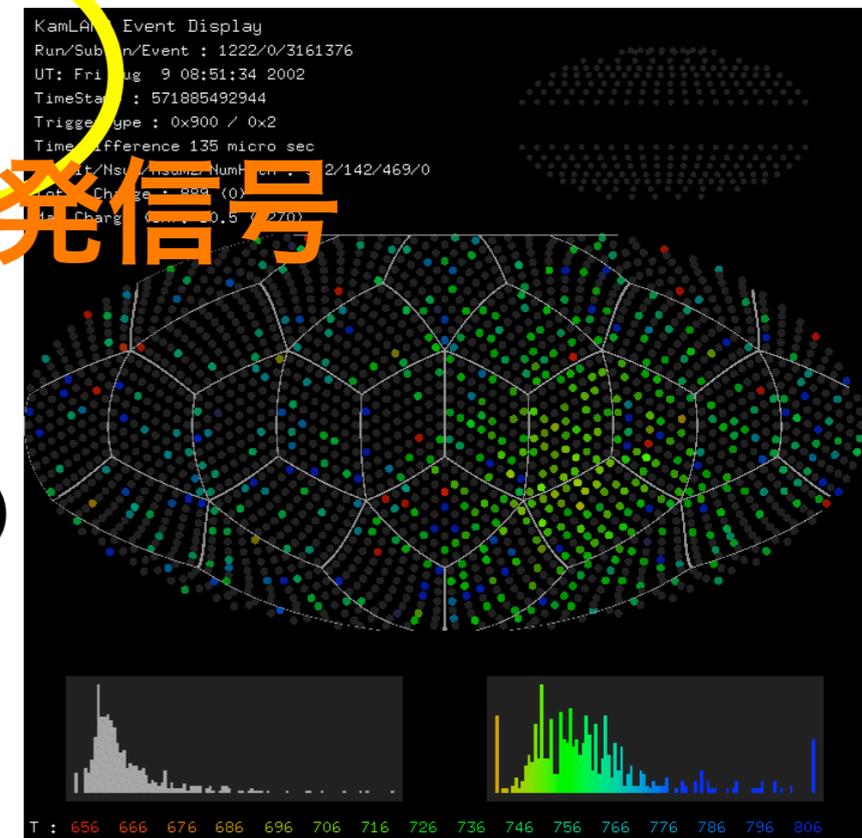


後発信号



(熱中性子化 ~ 陽子による捕獲)

$\tau \sim 200 \mu\text{sec}$



イベント選定条件

primary cuts

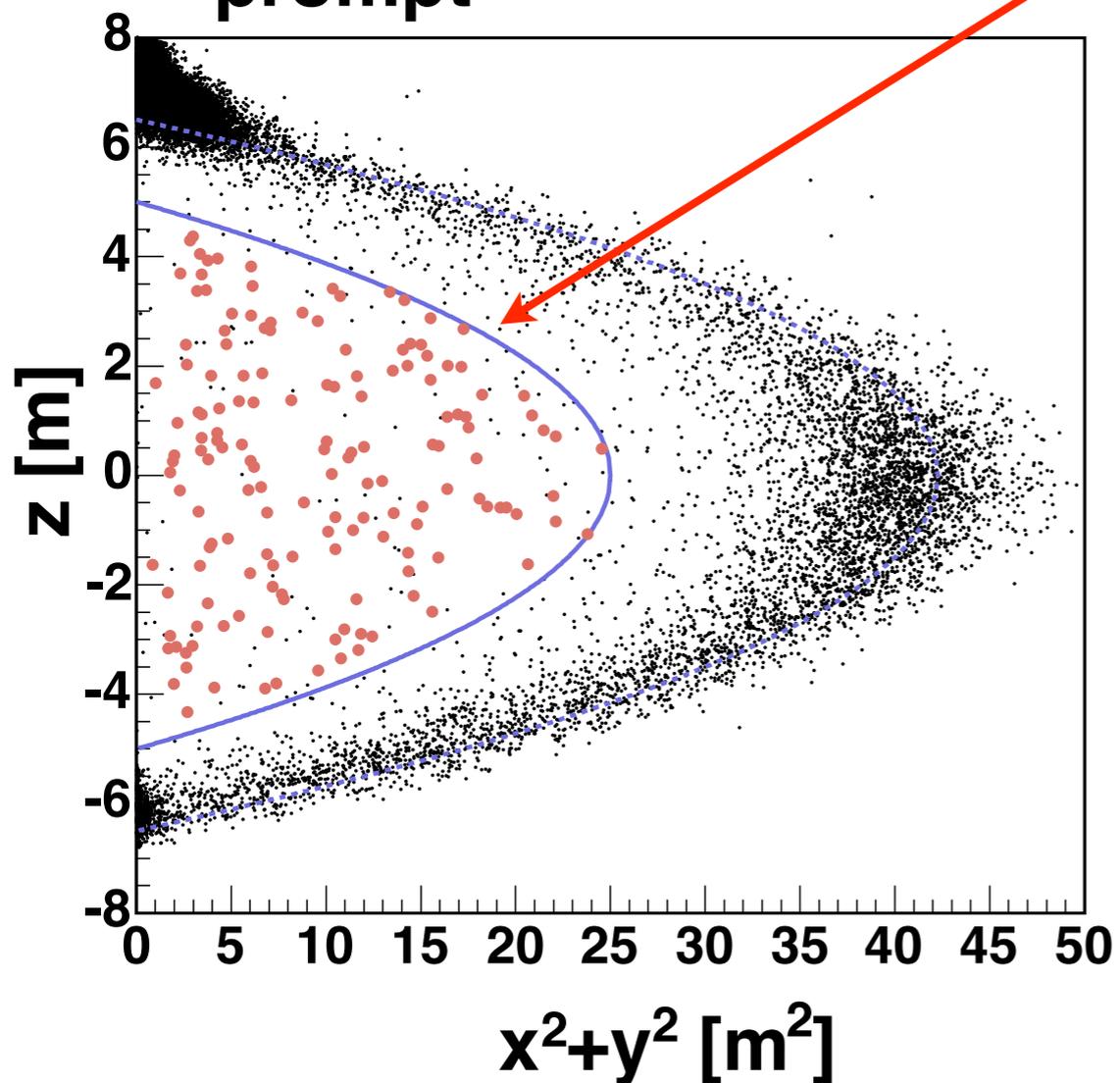
- $0.5 \mu\text{sec} < \Delta T < 500 \mu\text{sec}$
- $\Delta R < 1.0 \text{ m}$
- $1.8 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$
- $0.9 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}} < 2.6 \text{ MeV}$

fiducial cut + μ spallation cut

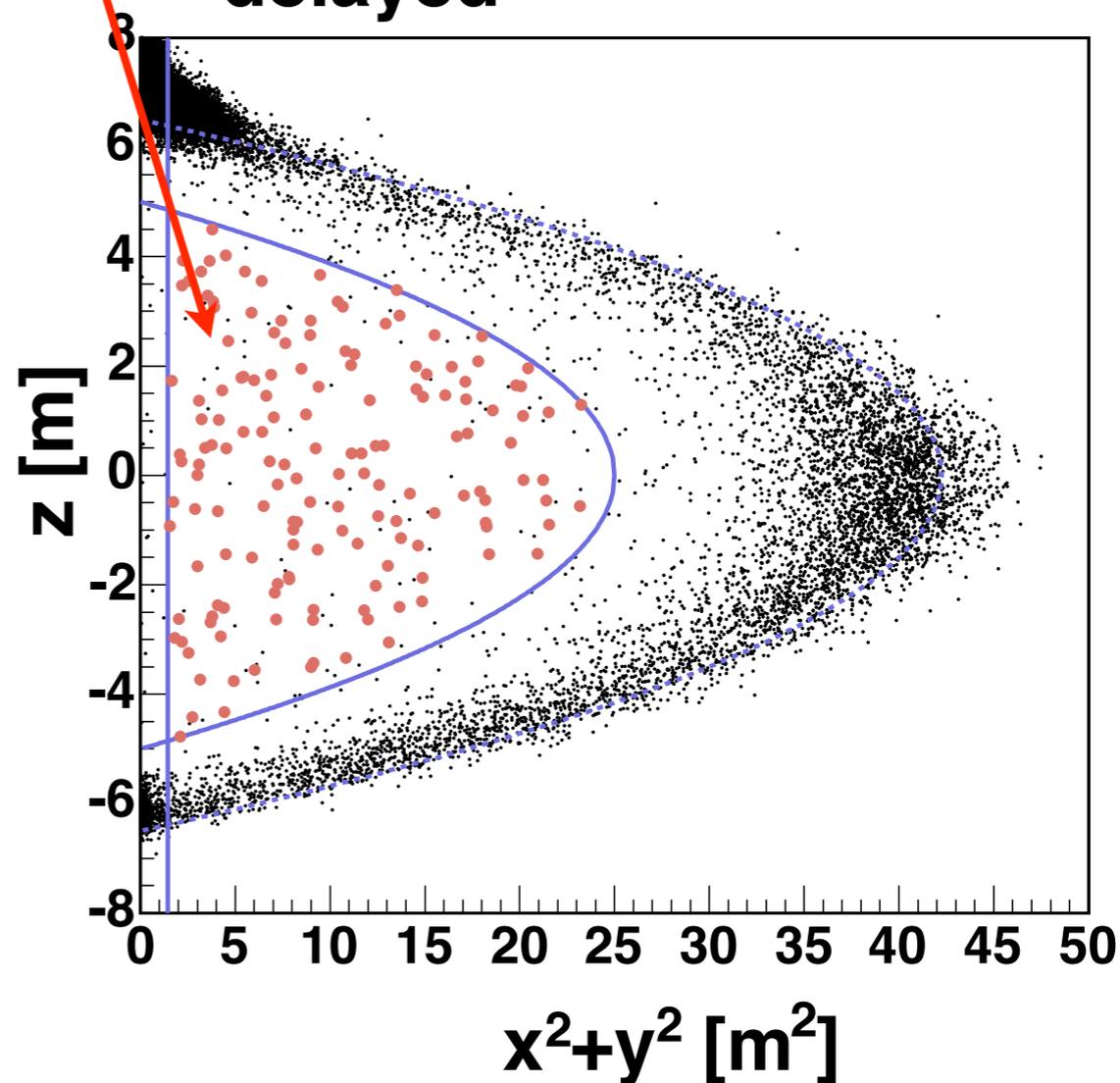
- $R_{\text{prompt}}, R_{\text{delayed}} < 5.0 \text{ m}$
- 2 sec veto after showering μ
- 2 sec veto after non-showering μ in 3m cylinder

efficiency 69.2% (U-series)
68.0% (Th-series)

prompt



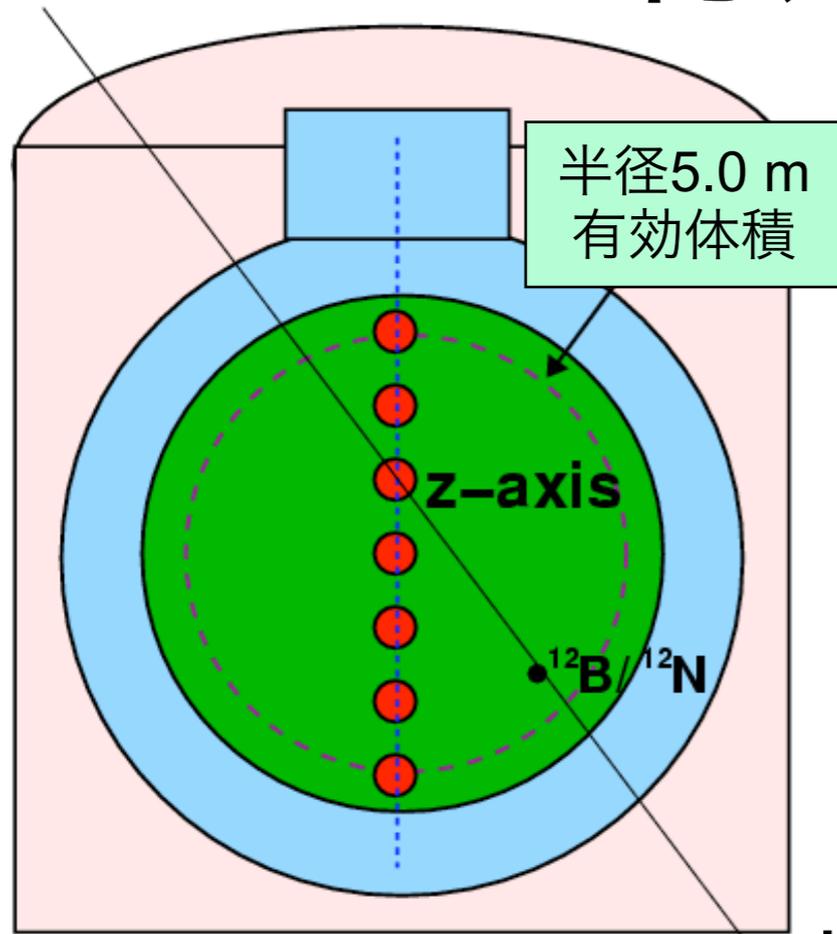
delayed



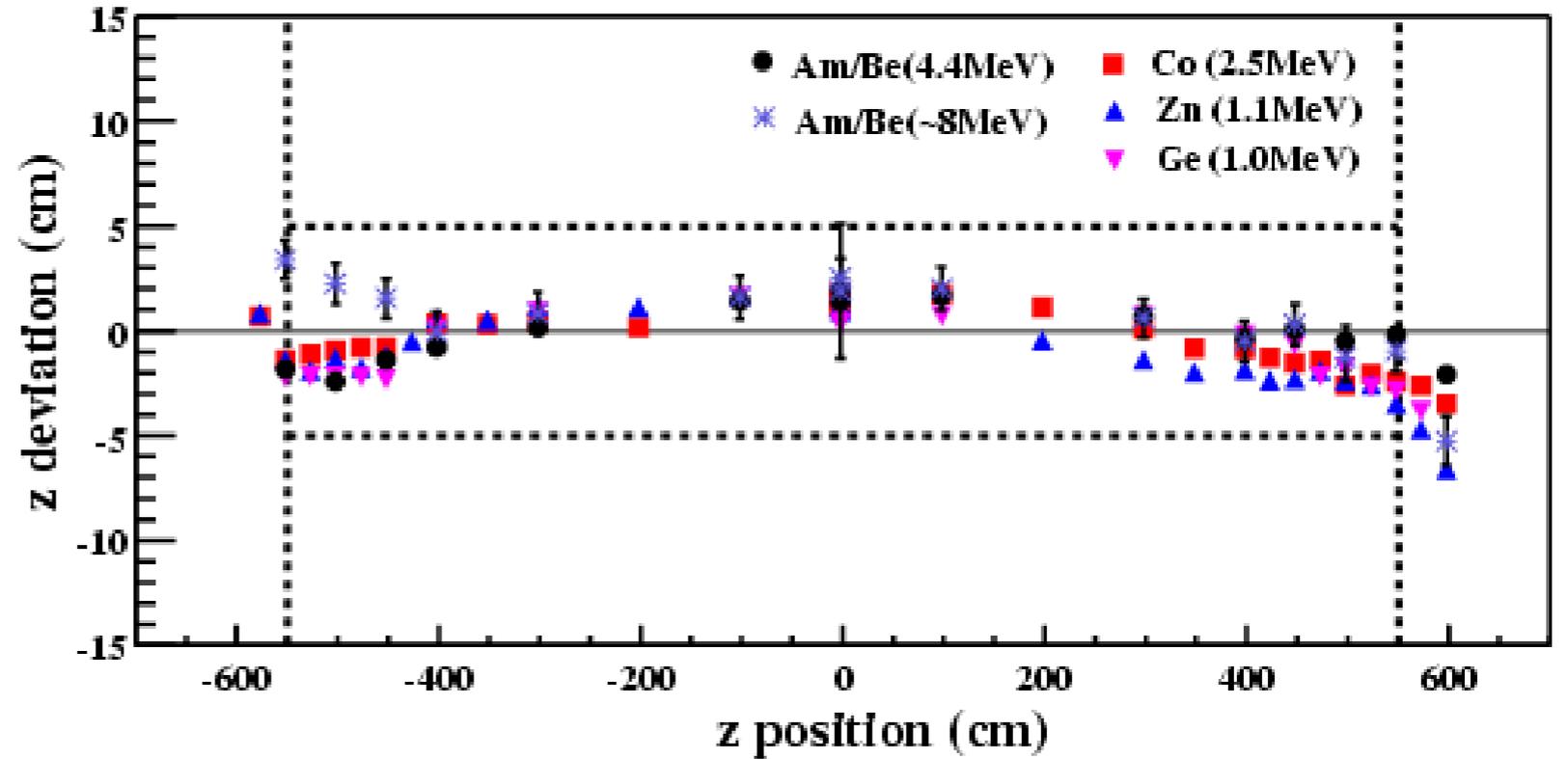
地球ニュートリノ検出の系統誤差

Systematic error	Error (%)
cross section	0.2
lifetime	0.06
fiducial volume	4.91
spatial cut efficiency	1.0
timing cut efficiency	0.3
total	5.0

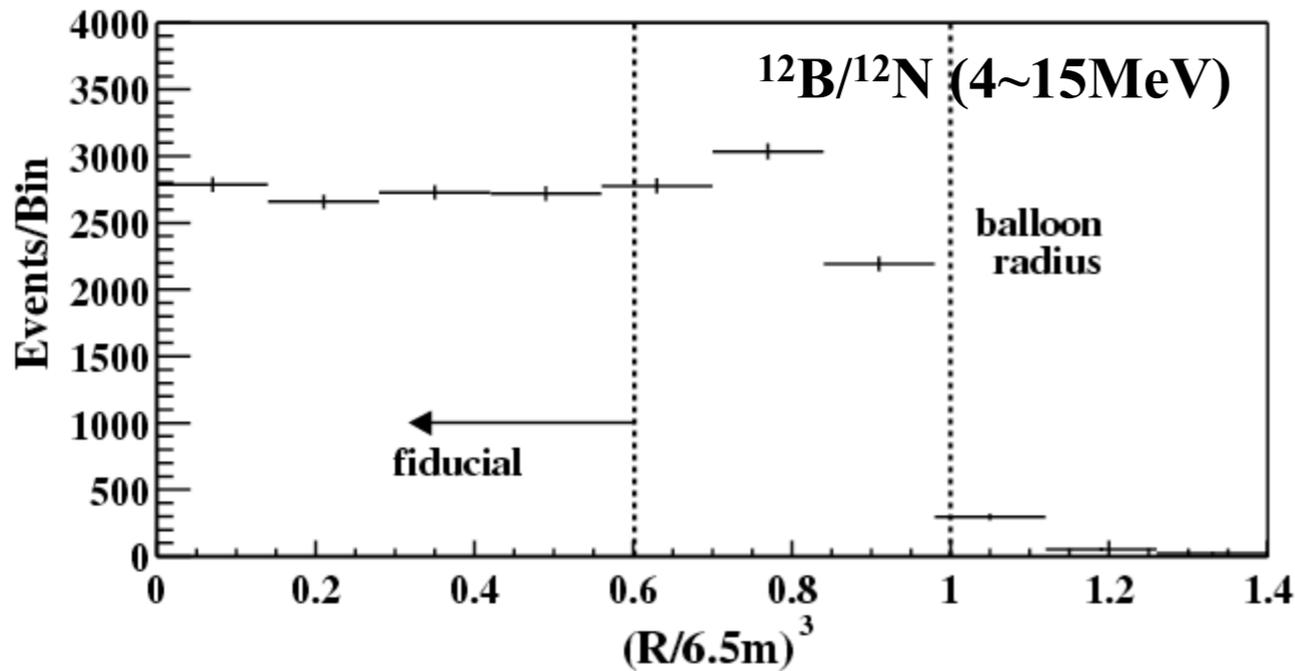
有効体積のエラー



z-axis



off-axis



volume ratio

$$0.447 \pm 0.010$$

$^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$ event ratio

$$0.456 \pm 0.005(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$

energy dependence error

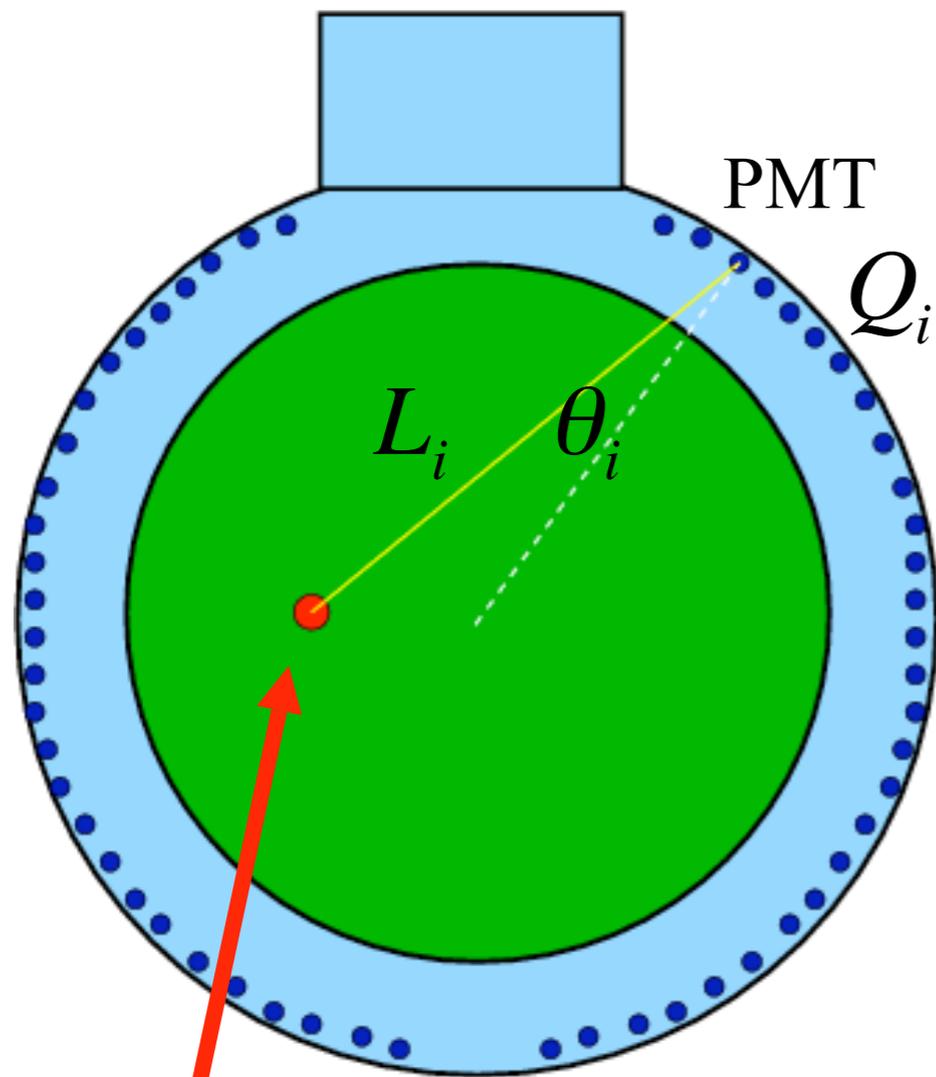
$$< 2.7\%$$

(from $^8\text{He}/^9\text{Li}$ delayed coincidence)

total error 4.91%

エネルギーキャリブレーション

位置依存性に対する校正



reconstructed position
by vertex fitter

$$E = (const) \times \frac{\sum_i Q_i^{Observed}}{\sum_i Q_i^{Expected}}$$

$$Q_i^{Expected} = \frac{\eta_i e^{-L_i/\lambda} \cos \theta_i}{L_i^2} \cdot \xi_i$$

$Q_i^{Observed}$: observed PMTs charge (p.e.)

$Q_i^{Expected}$: expected PMTs charge (arbitrary)

η_i : light loss by balloon shadow

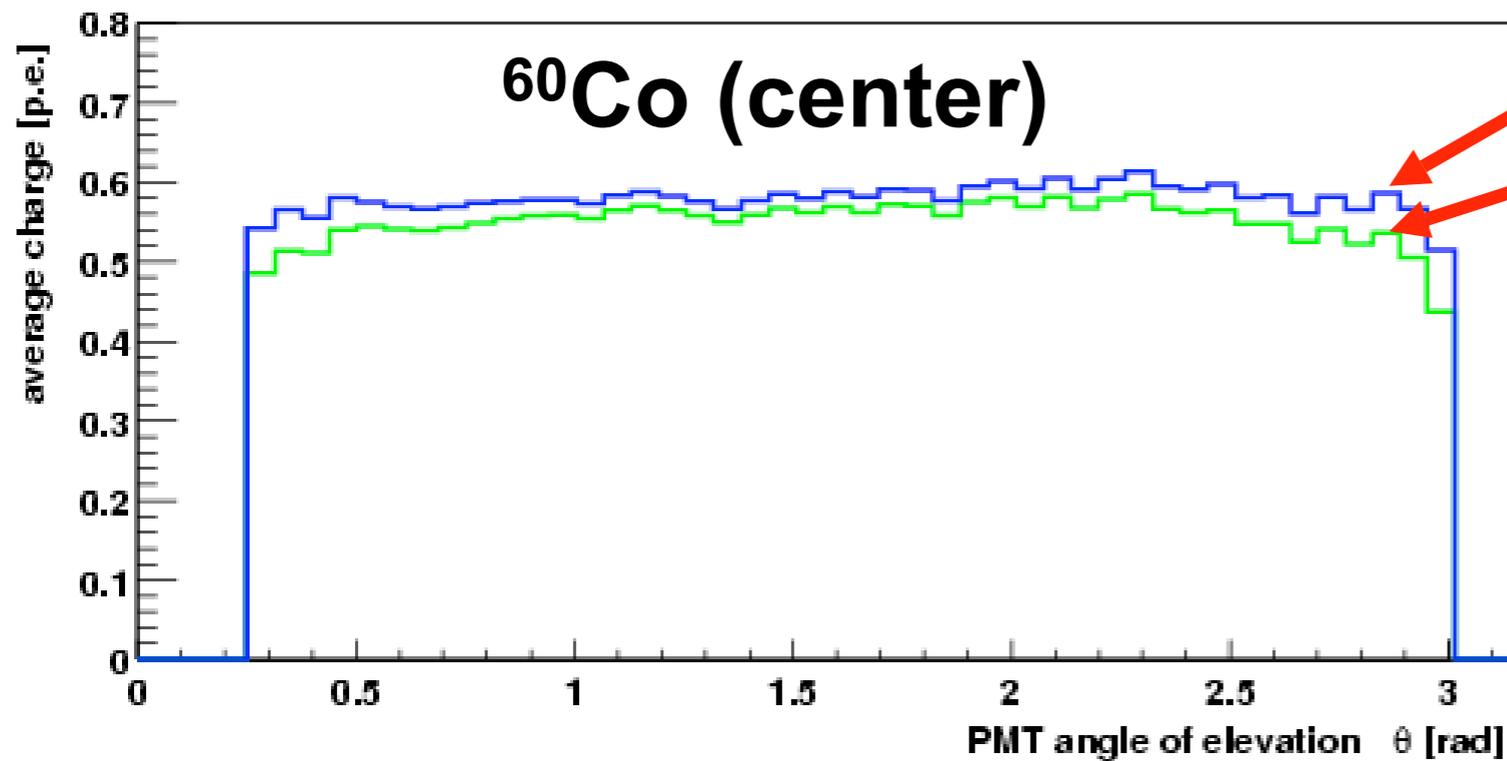
θ_i : angle of incidence

L_i : distance to light generation point

λ : light attenuation length

ξ_i : 1 p.e. threshold effect

影の効果

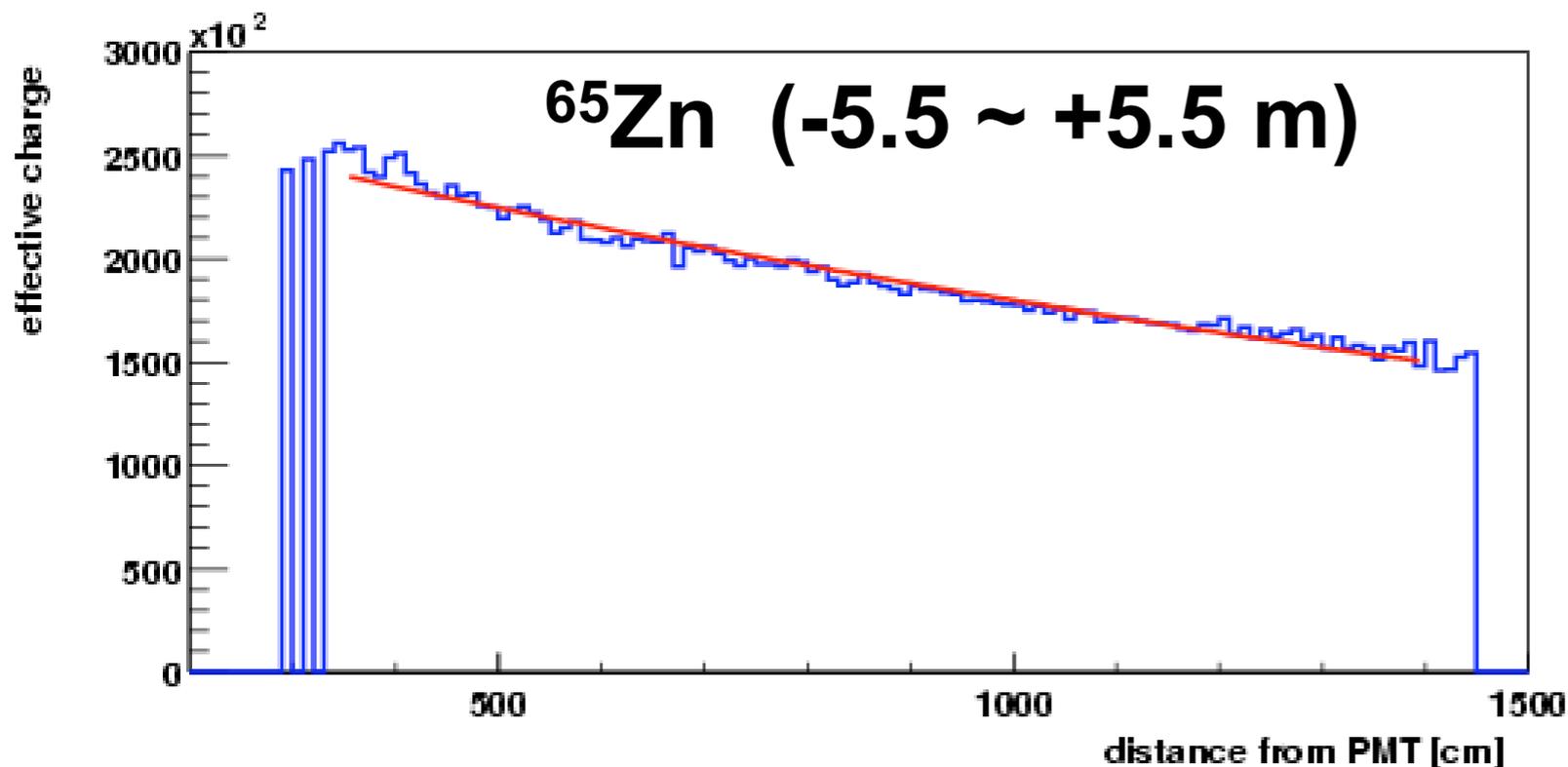


バルーンやロープ
による影の効果

補正

一様なcharge分布

減衰長

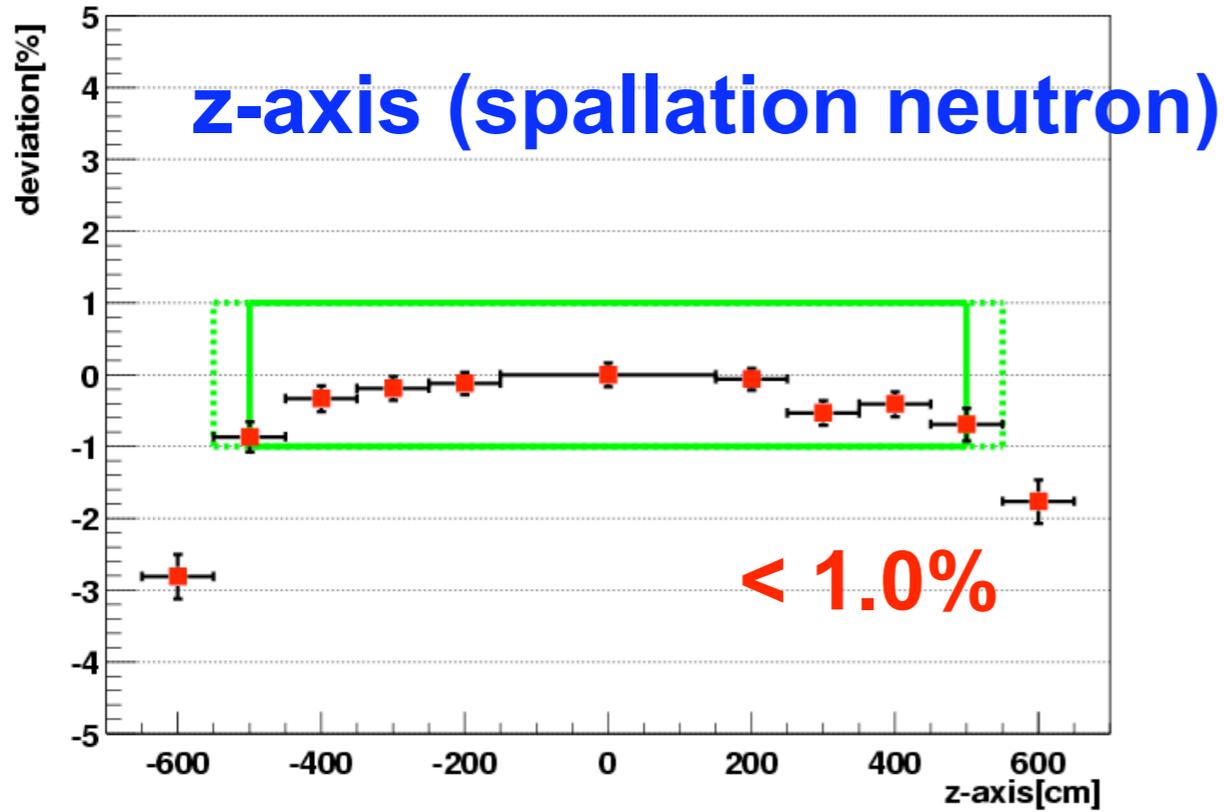


実効的な減衰長

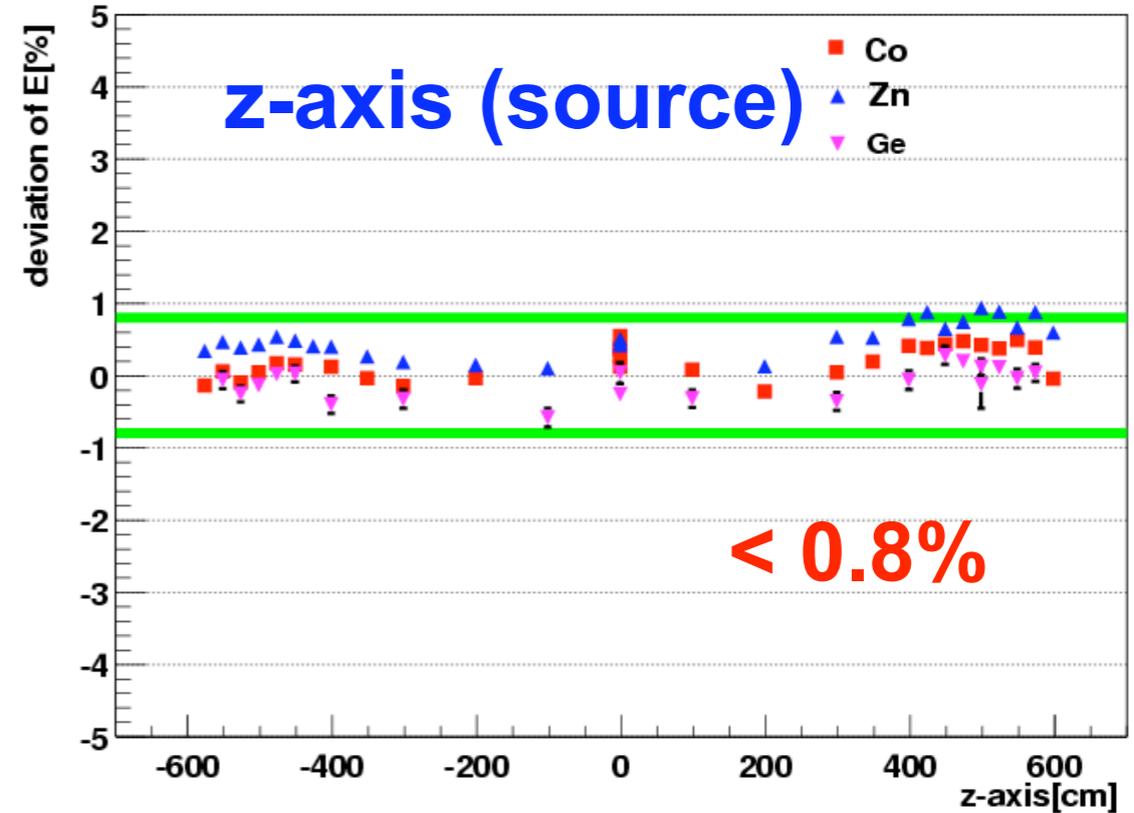
$\lambda \sim 22 \text{ m}$

エネルギーの位置依存

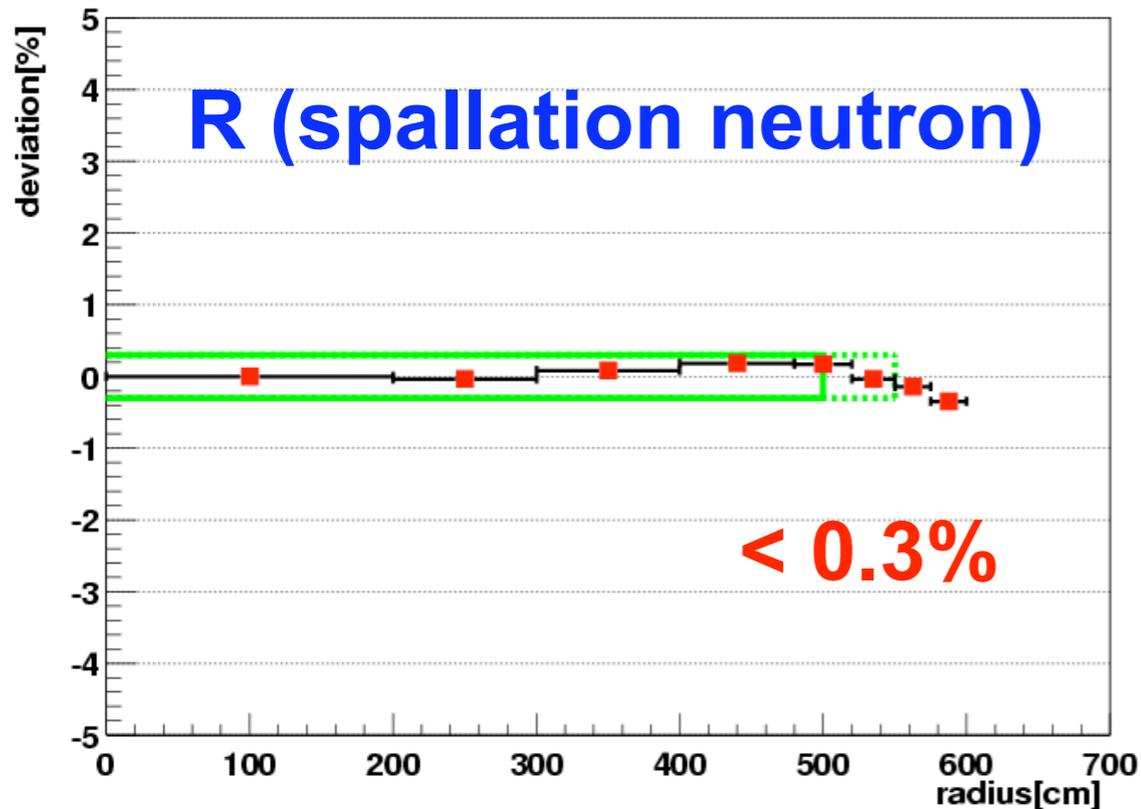
visible energy ratio of neutron capture : around z-axis($R_{xy} \leq 200\text{cm}$)



z-axis dependence of energy

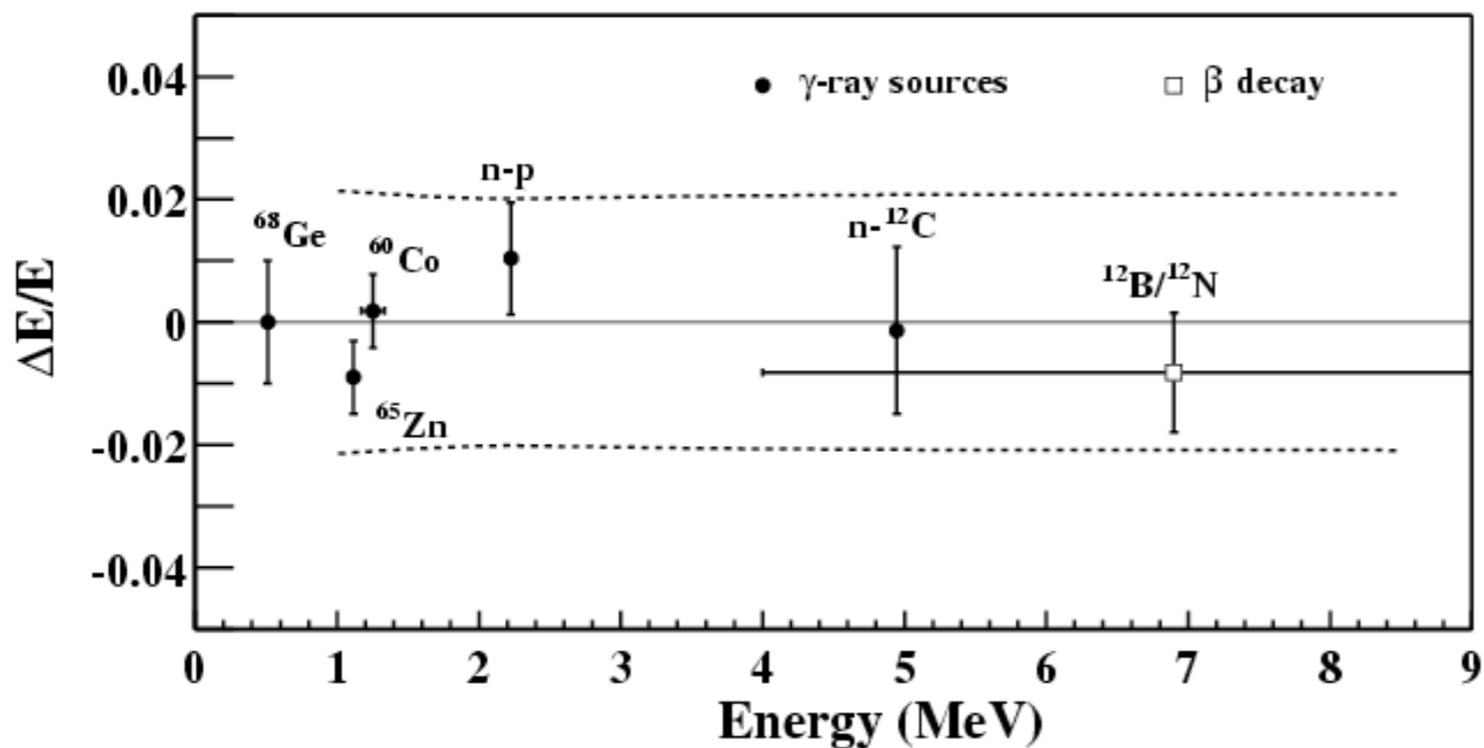
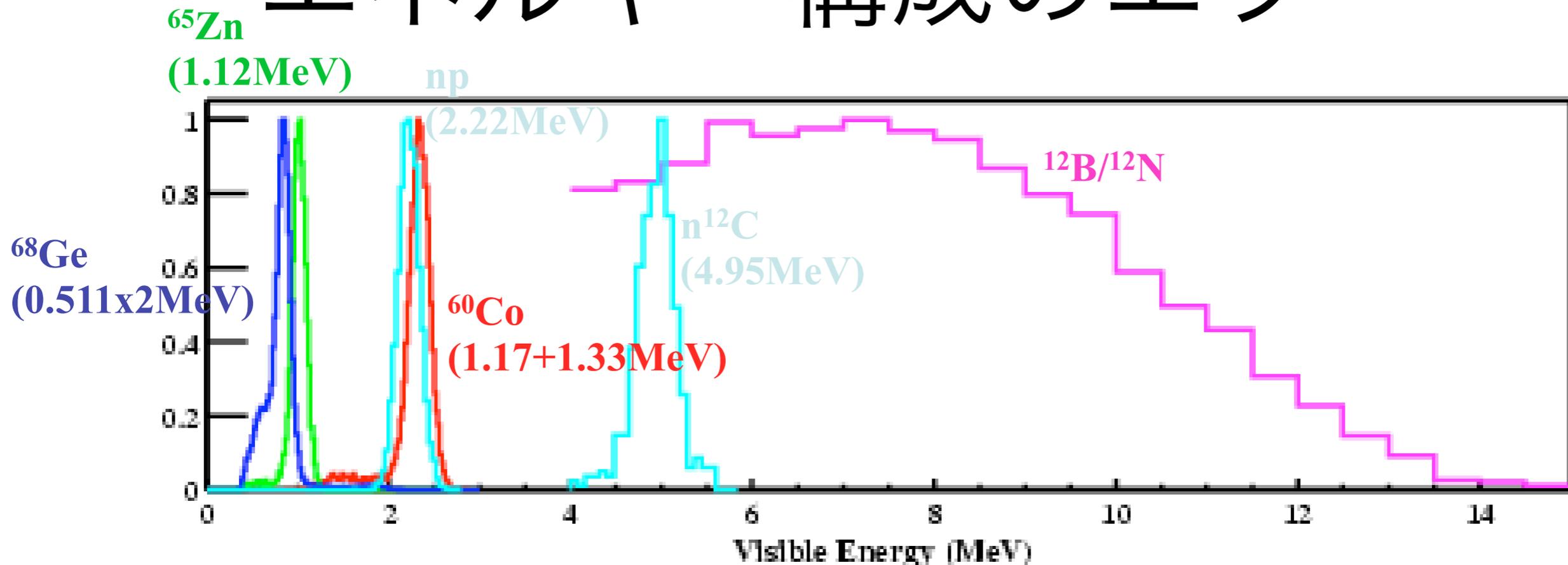


visible energy ratio of neutron capture : r-dependence($R_{xy} > 200$)



位置依存に対する
誤差は1%程度

エネルギー構成のエラー



energy scale error

Cherenkov/Birks	1.0%
Time dependence	1.3%
Position dependence	1.0%
20" PMT non-linearity	0.8%

total **2.0%**

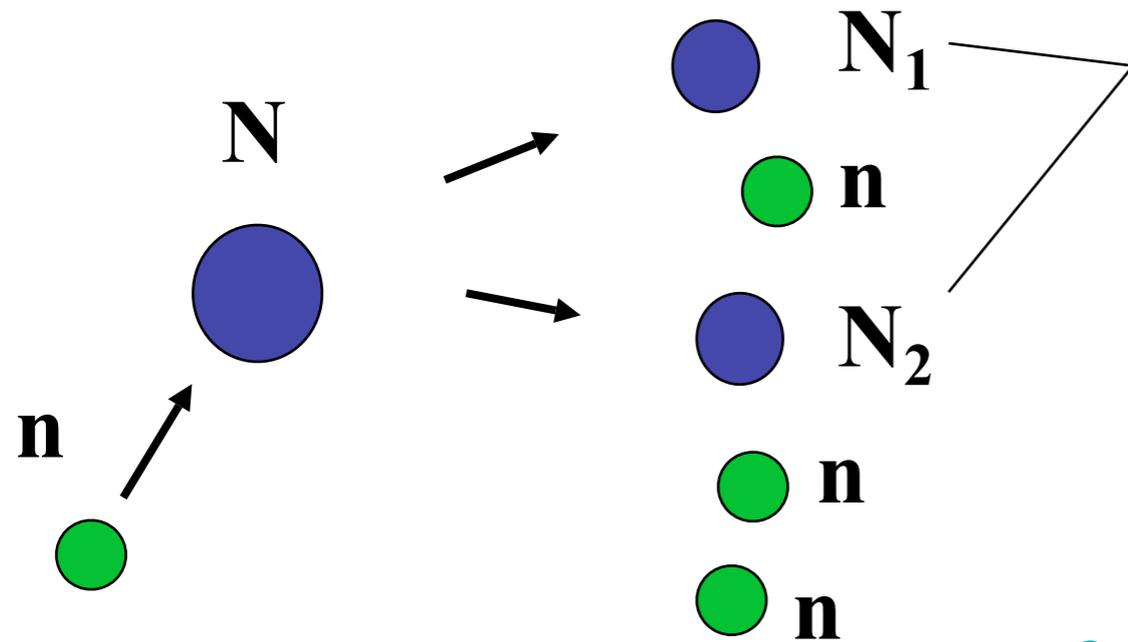
地球ニュートリノ検出のバックグラウンド

Background source	Number
Reactor neutrino short-lived isotopes long-lived isotopes	80.4 ± 7.2 1.9 ± 0.2
Cosmic muon induced neutrons fast-neutrons spallation products (${}^9\text{Li}$)	negligible < 0.1 0.30 ± 0.05
LS Radioactivity accidental cascade decays spontaneous fissions (α , n) reactions (γ , n) reactions	2.38 ± 0.01 negligible < 0.1 42.4 ± 11.1 negligible
total	127.4 ± 13.3

原子炉ニュートリノバックグラウンド

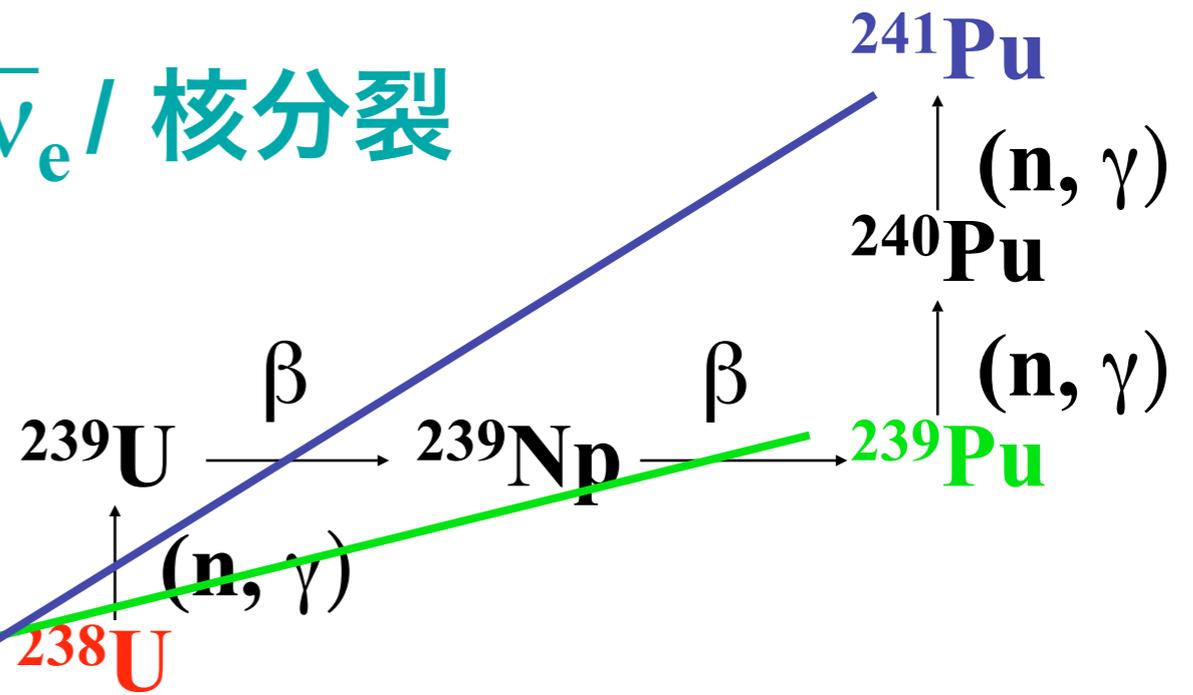
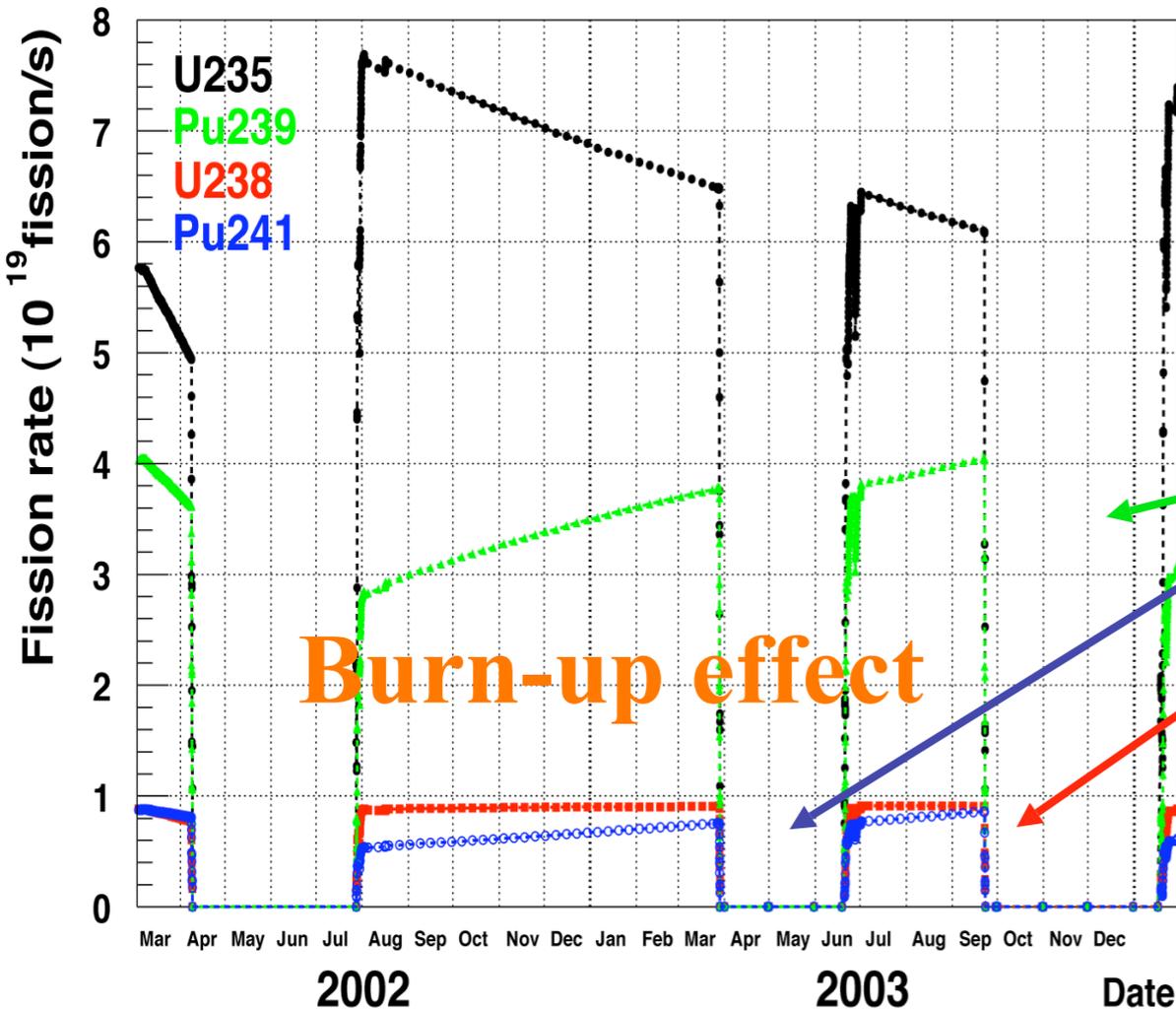
中性子過剰の原子核

β崩壊



~ 6 $\bar{\nu}_e$ / 核分裂

Fission Rate



熱出力からくる不定性 2%

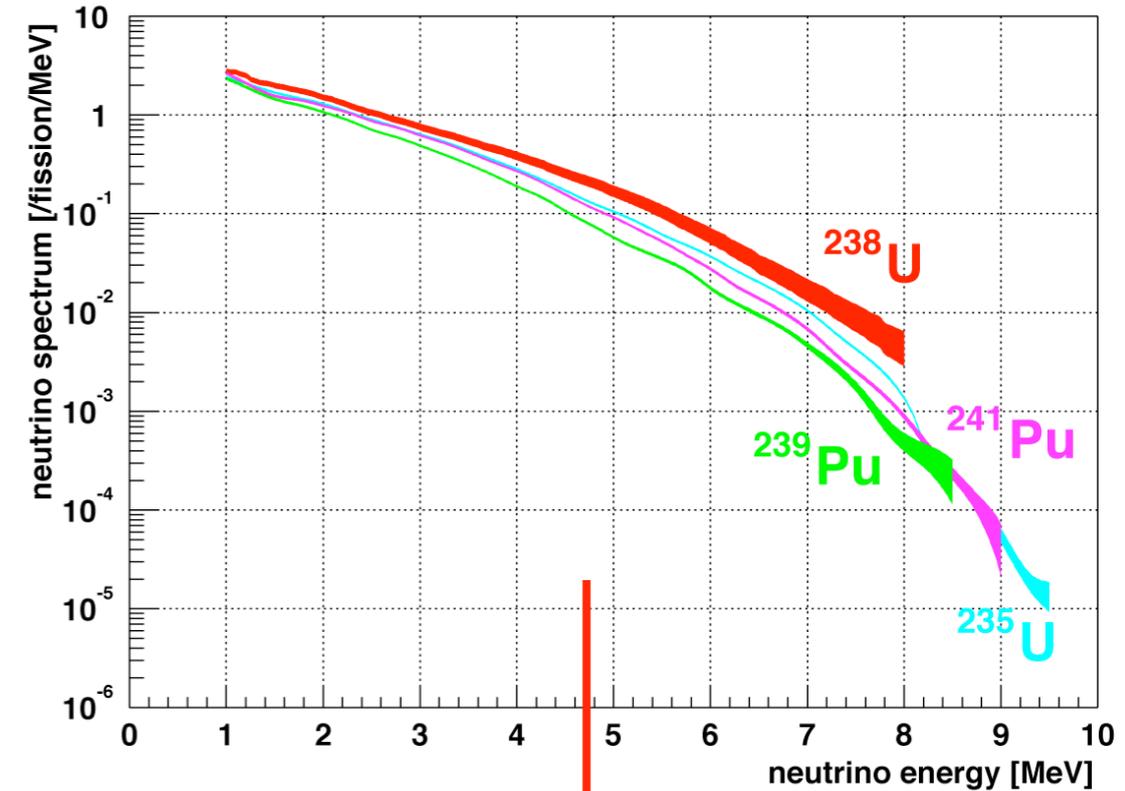
燃料組成比からくる不定性 < 1.0%

原子炉ニュートリノエネルギースペクトル

全核分裂数の比

$$^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} : ^{239}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu} = 0.563 : 0.079 : 0.301 : 0.057$$

$\bar{\nu}_e$ Spectra



スペクトルからくる不定性 2%

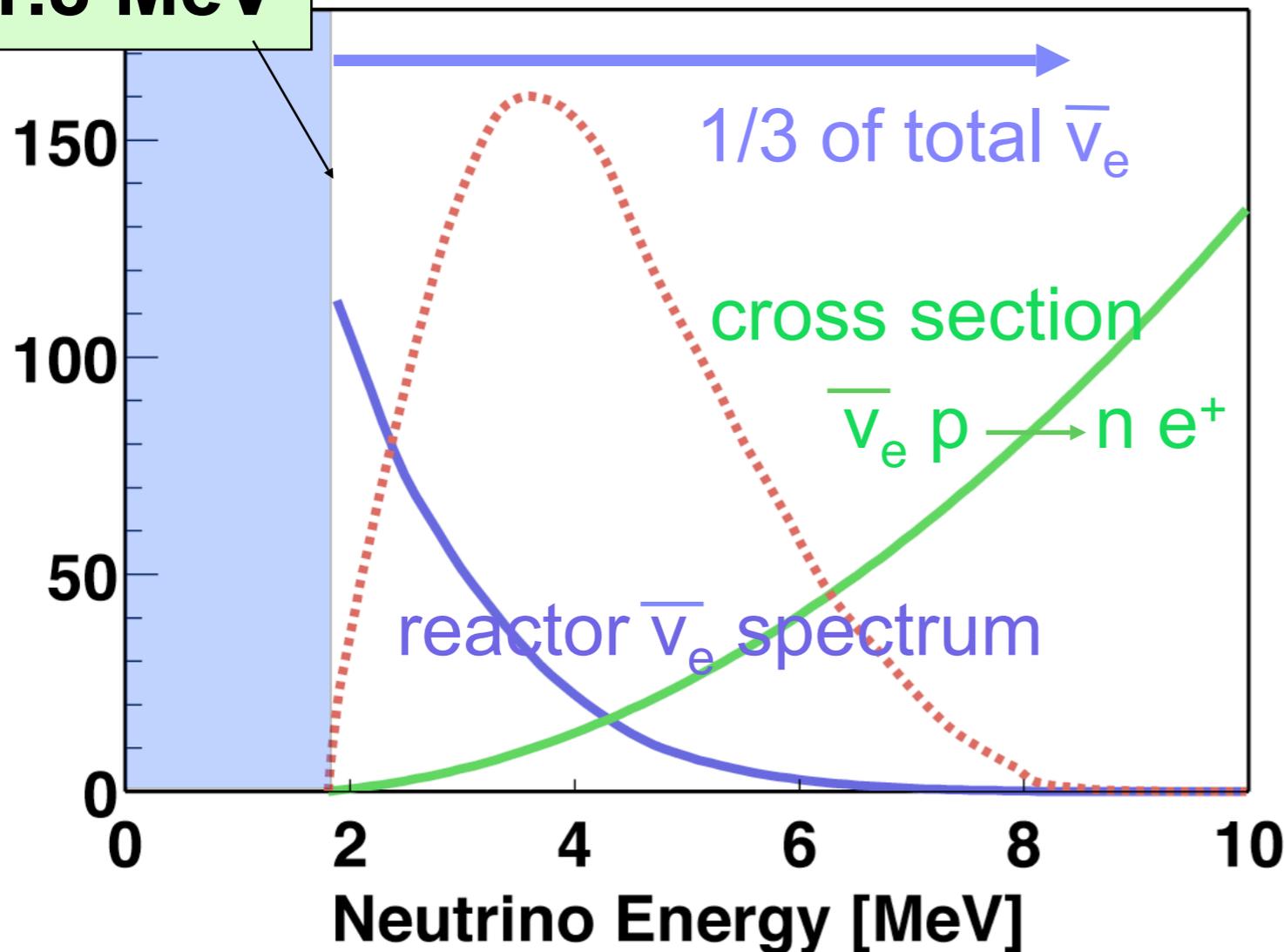
原子炉ニュートリノ
バックグラウンド数
(短寿命核)

80.4 ± 7.2

振動パラメータの誤差が支配的

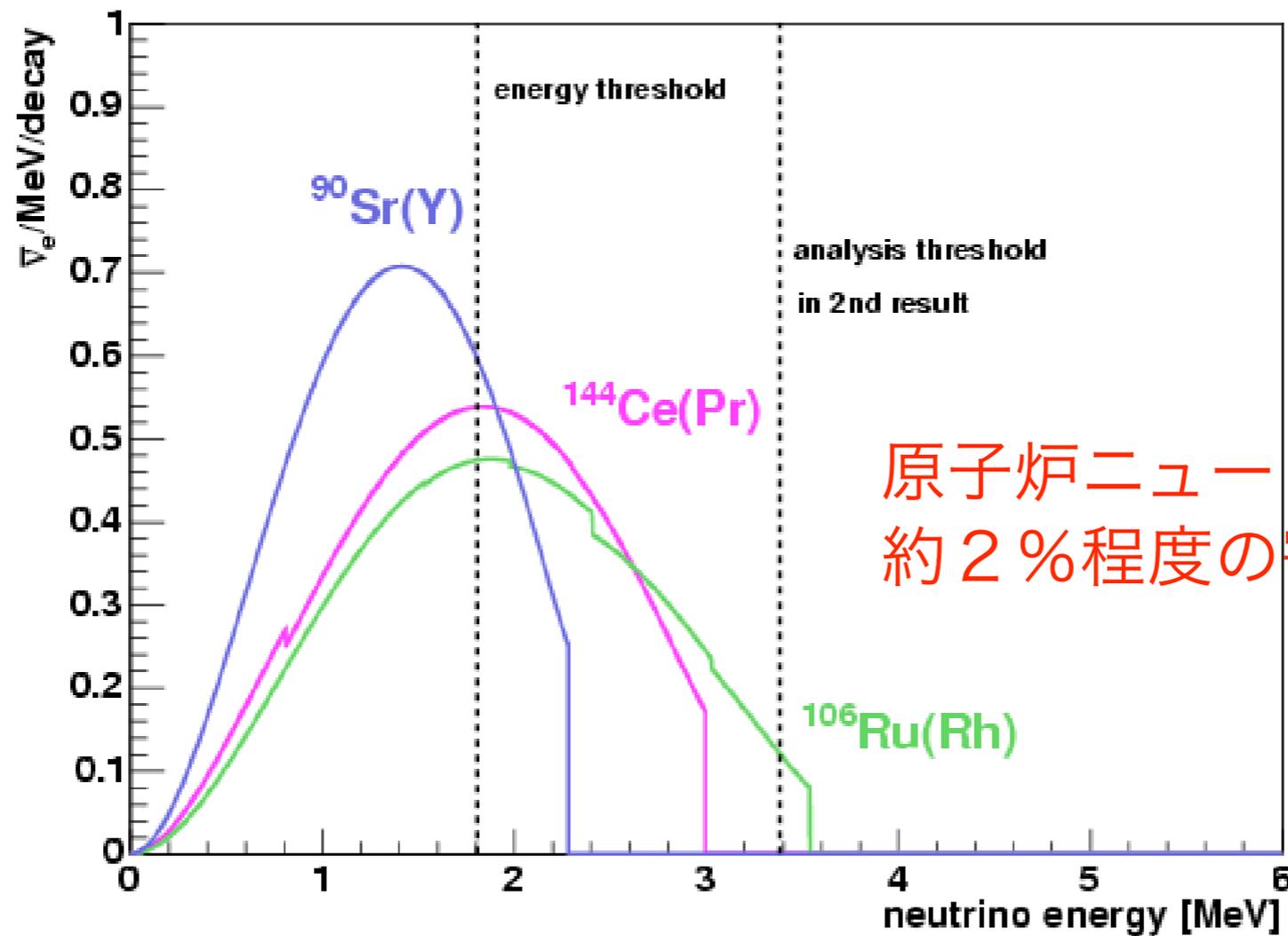
$E_{\text{threshold}}$
1.8 MeV

Expected Spectrum



長寿命核からの寄与

- ^{106}Ru ($T_{1/2} = 374$ days) \rightarrow ^{106}Rh ($T_{1/2} = 29.8$ s) \rightarrow ^{106}Pd ($E_{\text{max}} = 3.54$ MeV)
- ^{144}Ce ($T_{1/2} = 285$ days) \rightarrow ^{144}Pr ($T_{1/2} = 17.2$ min) \rightarrow ^{144}Nd ($E_{\text{max}} = 3.0$ MeV)
- ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28.8$ years) \rightarrow ^{90}Y ($T_{1/2} = 64.1$ s) \rightarrow ^{90}Zr ($E_{\text{max}} = 2.28$ MeV)

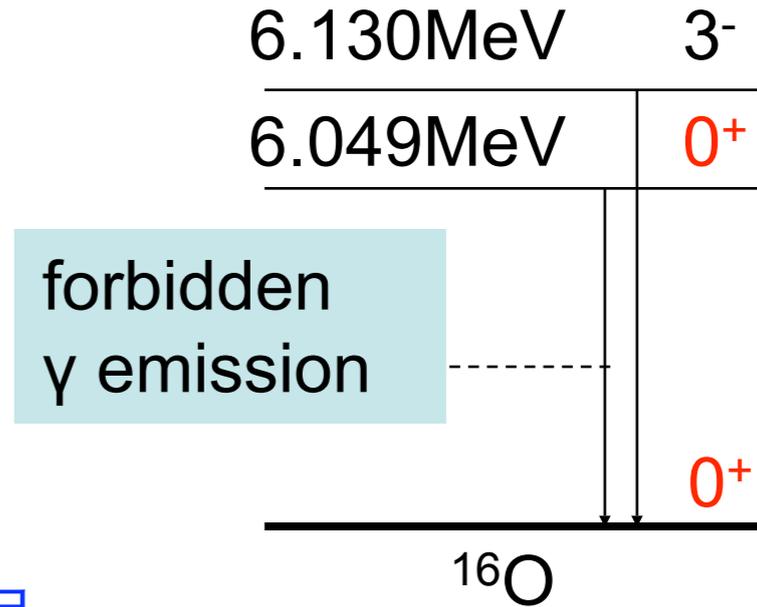
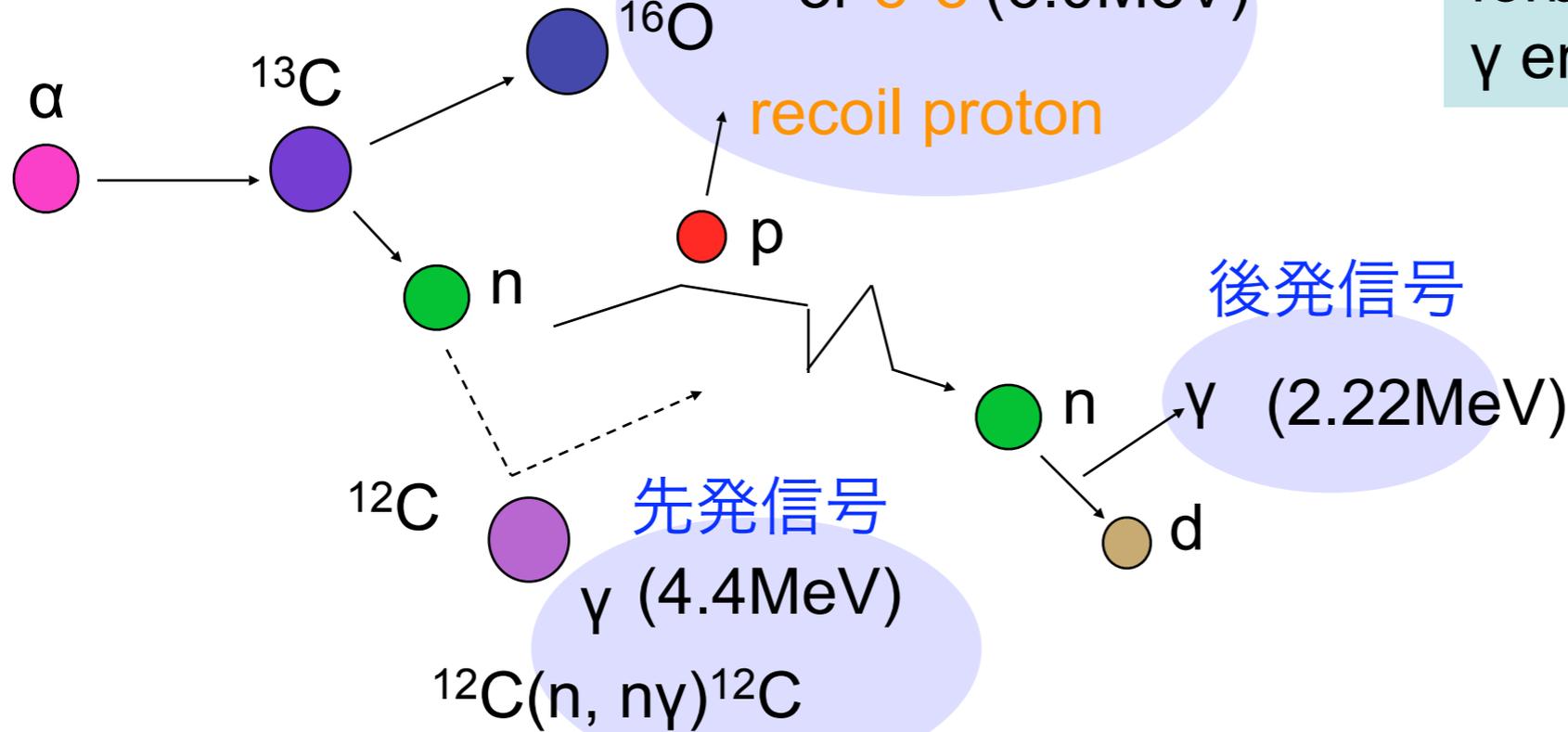
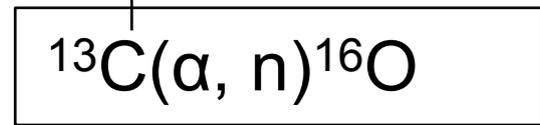


崩壊数は過去の原子炉のデータを用いて計算

(α, n) バックグラウンド

天然存在比 1.1%

$Q = 2.2\text{MeV}$

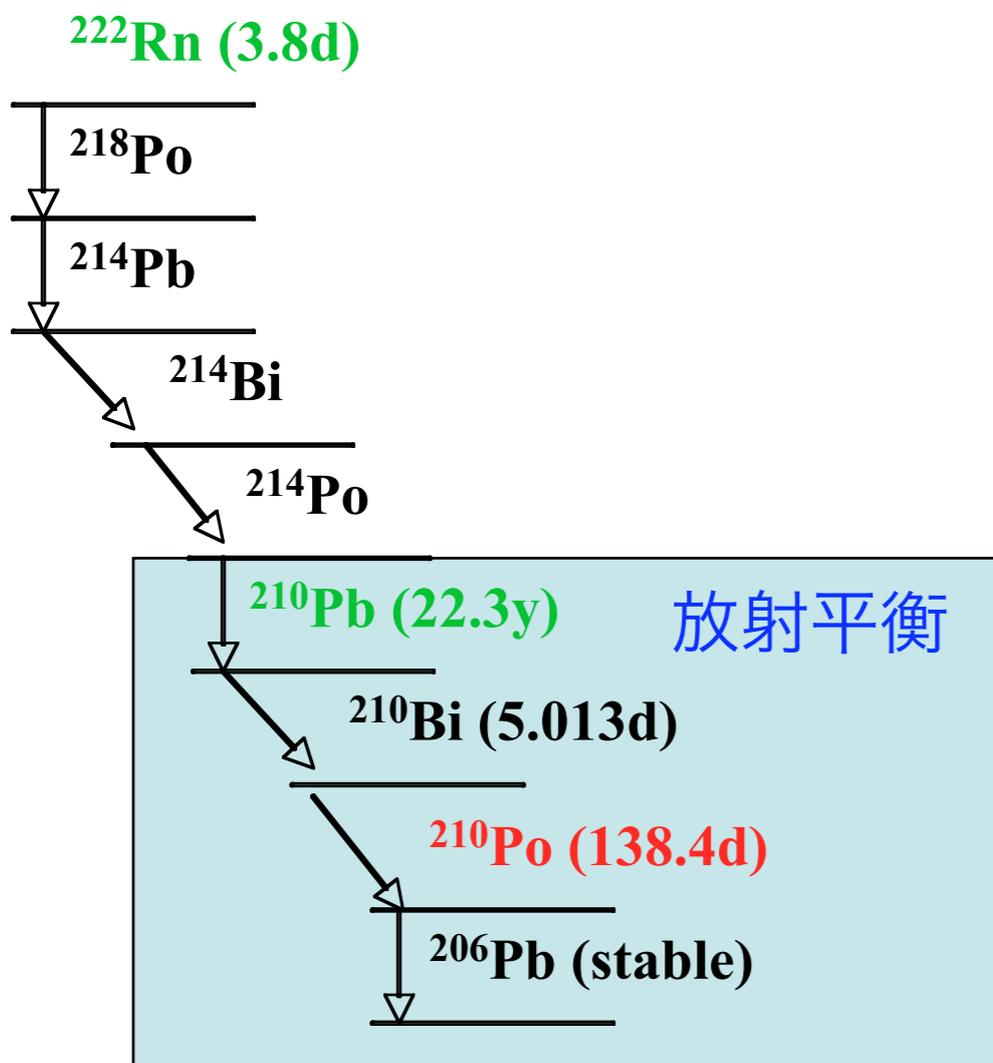


先発エネルギー	反応	ソース
1. low energy	$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ (g.s.)	n
2. 4.4MeV	$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ (g.s.) → $^{12}\text{C}(n, n\gamma)^{12}\text{C}$	n $\gamma + n$
3. 6MeV	$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}^*$ (6.049MeV) $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}^*$ (6.130MeV)	e^+e^- (internal pair creation) $\gamma + n$

^{210}Po の α 崩壊

主な α 線源

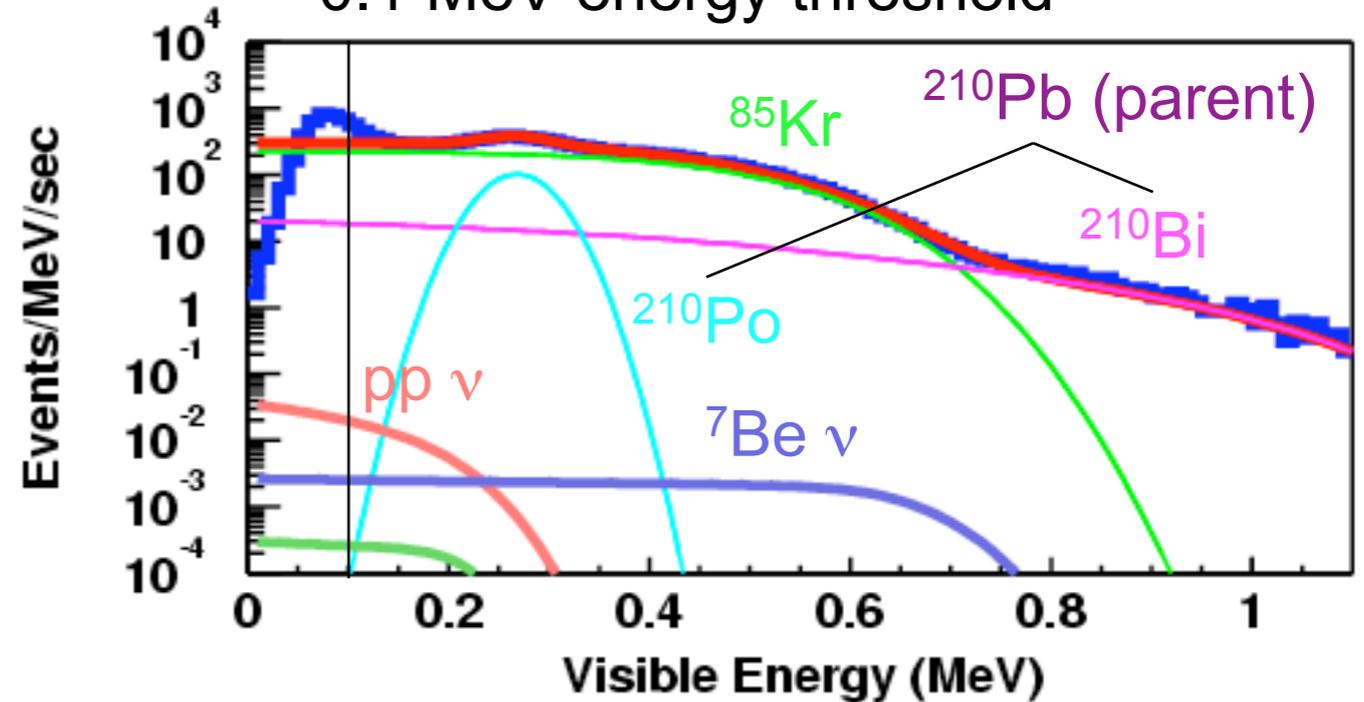
^{238}U series



equilibrium

energy spectrum at low energy

~ 0.1 MeV energy threshold



^{210}Po decay rate

21.1 Bq / 5.0 m fiducial R

↓
1.50 × 10⁹ decays / livetime

($E_\alpha = 5.3 \text{ MeV}$)

^{210}Po の α 崩壊が全体の99%以上を占める

(α, n) エネルギーースペクトル

α spectrum

$$\frac{dN}{dE_\alpha} = n_{target} I_{source} \int \sigma(E_\alpha) \frac{dX}{dE_\alpha}$$

n angular distribution

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sum_{\nu} A_{\nu} P_{\nu}(\cos \theta)$$

n spectrum

n_{target} : number of target

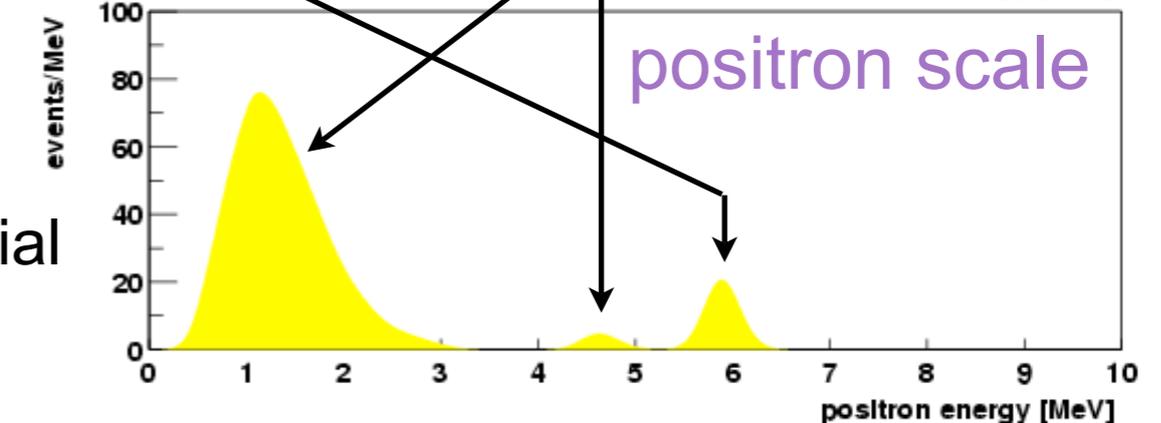
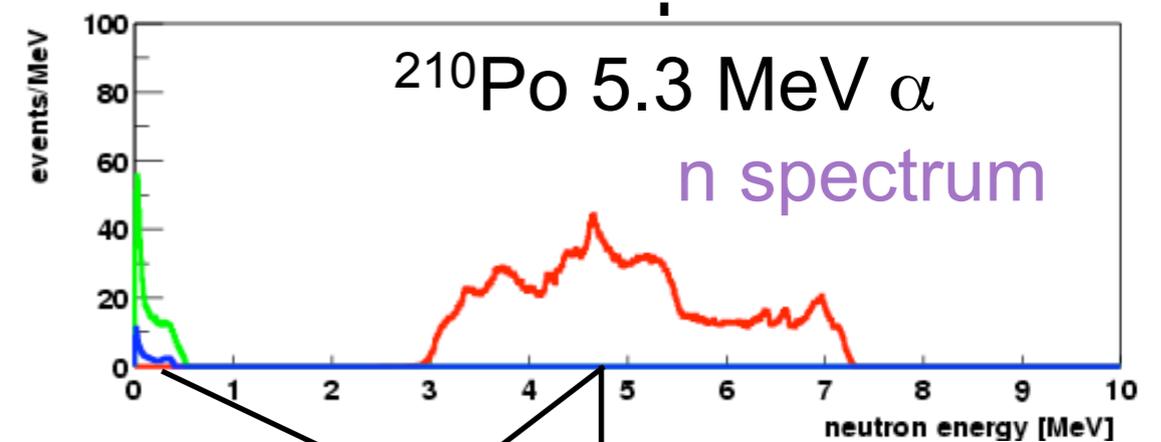
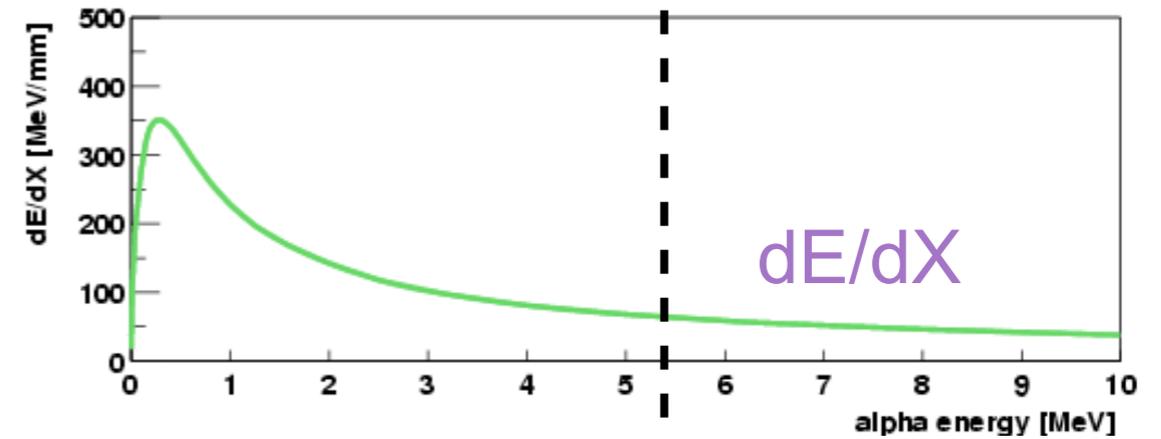
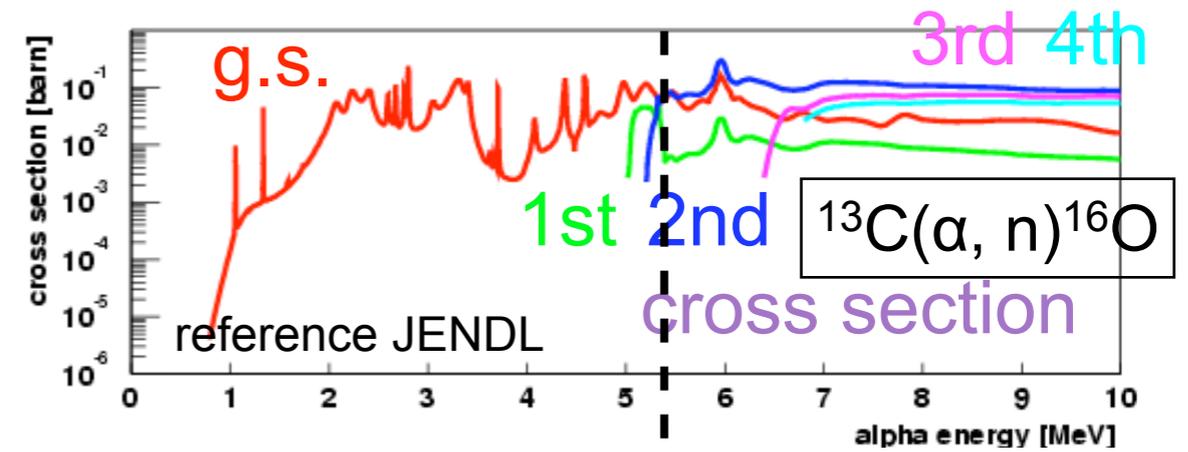
I_{source} : source intensity

$\sigma(E_\alpha)$: (α, n) cross section

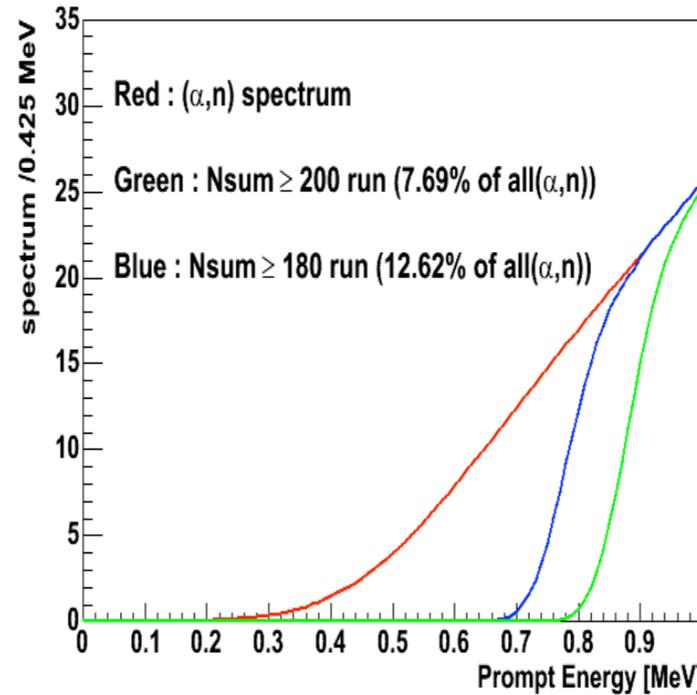
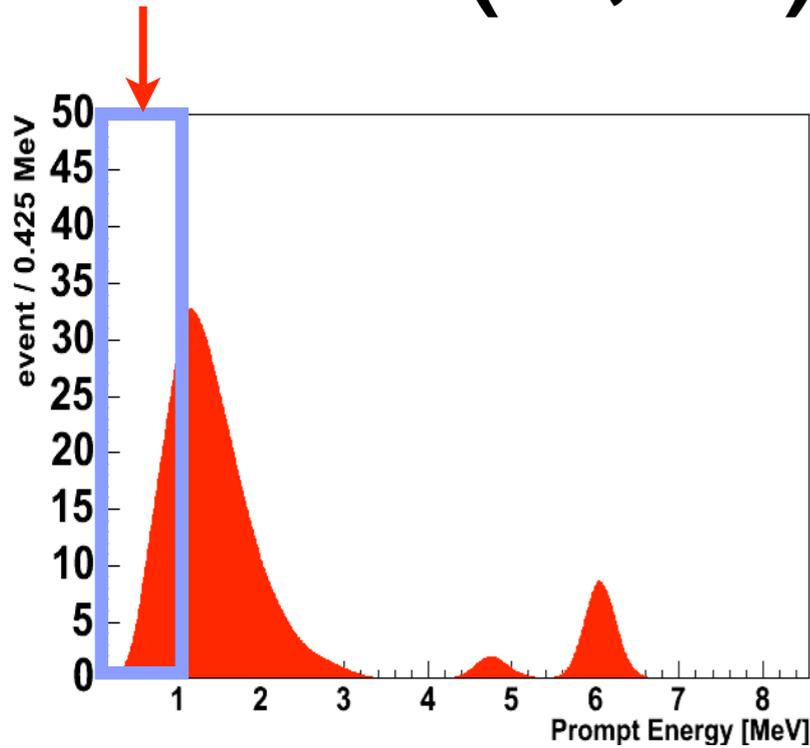
$\frac{dX}{dE_\alpha}$: stopping power

A_{ν} : coefficients of Legendre Polynomial

$P_{\nu}(\cos \theta)$: Legendre Polynomial

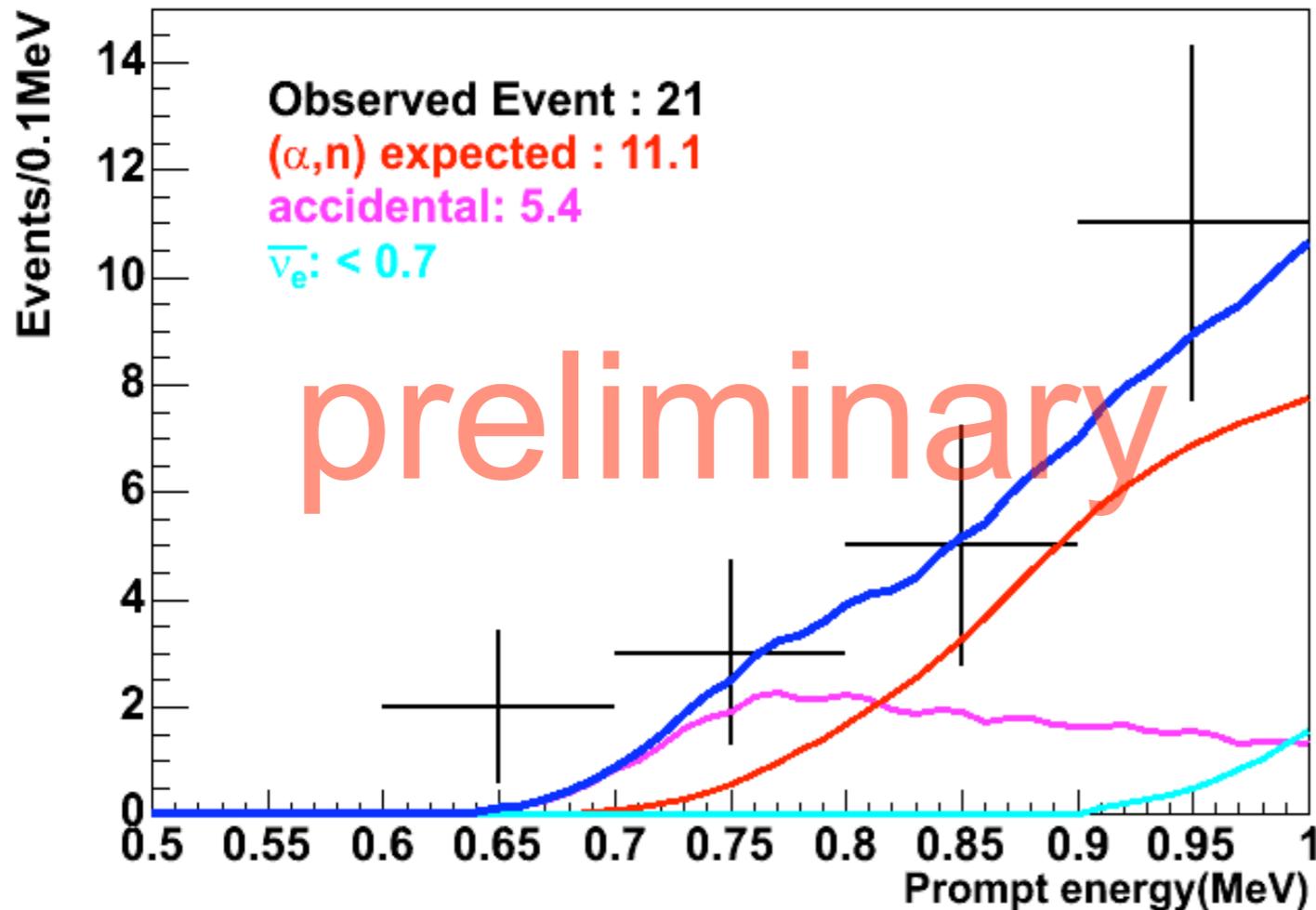


(α, n) イベントの確認



1.0 MeV以下に全体の
約10%の(α, n) イベント

トリガー効率を考慮

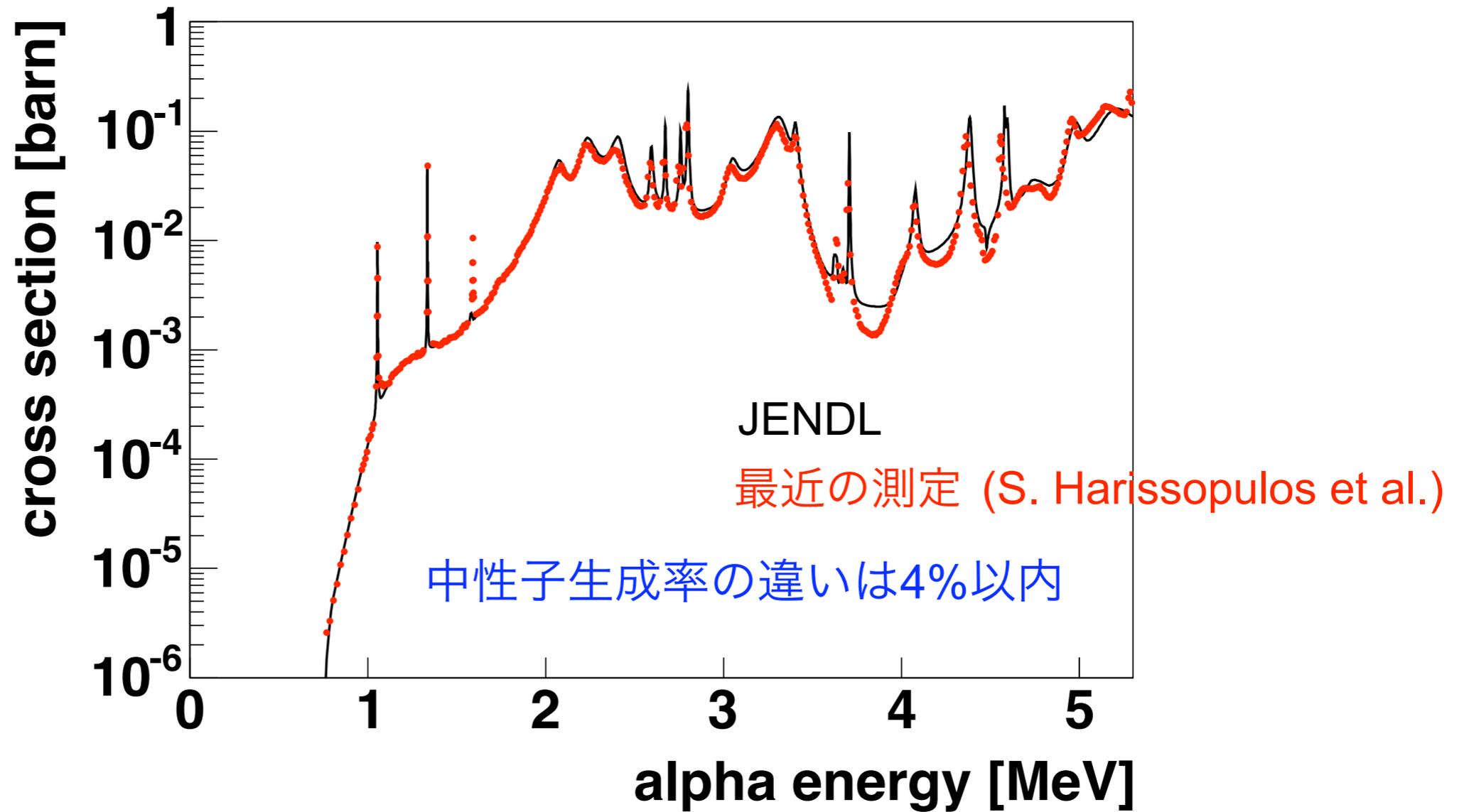


(α, n) イベント数

計算による期待値と
~ 36%の精度で一致

(α , n) イベントの精度改善

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応断面積



JENDL

古いデータを用いて理論式でフィット → 20%の不定性

最近の測定では4%の精度を達成

解析に使ったデータ

2002年3月9日

~ 2004年11月1日

実測定時間

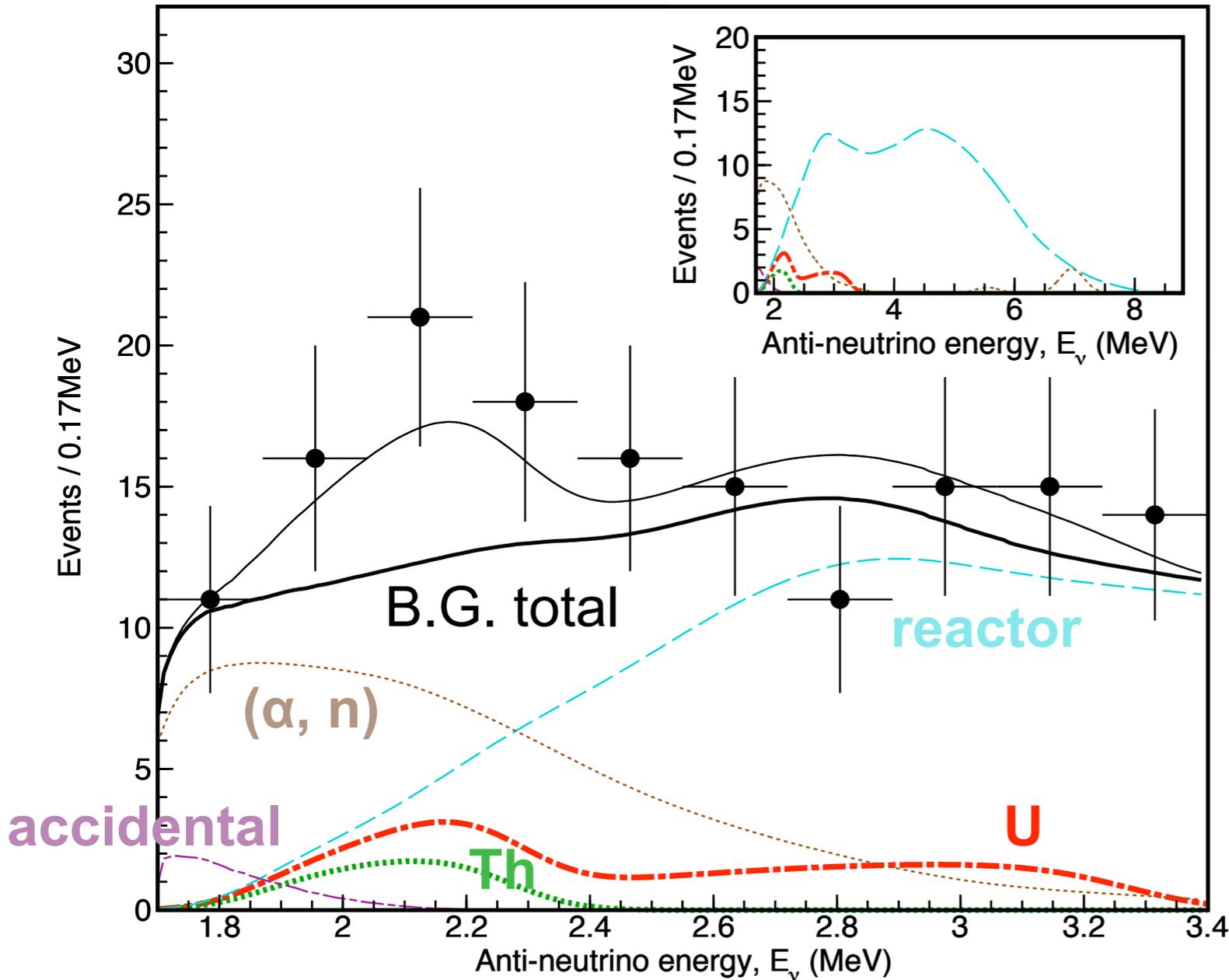
749.1 days

有効体積

408.5 ton (R = 5 m)

検出効率

68.7%



イベント選定条件

$0.9 < E_{\text{prompt}} < 2.6 \text{ MeV}$

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

$0.5 < \Delta T < 500 \mu\text{sec}$

$\Delta R < 1.0 \text{ m}$

$R_{\text{prompt}} < 5.0 \text{ m}$

$R_{\text{delayed}} < 5.0 \text{ m}$

U/Thから16 TWの寄与を仮定

地球ニュートリノ観測の結果

バックグラウンド	reactor	80.4 ± 7.2	} dominant B.G. 24% scaling error (cross section, α rate) 10% quenching error
	$^{13}\text{C}(\alpha, n)$	42 ± 11	
	accidental	2.38 ± 0.01	
	long-lived	1.9 ± 0.2	
	^9Li	0.30 ± 0.05	
<hr/>			
	total	127 ± 13	

観測イベント数	152	25 event excess !
バックグラウンド予測数	127 ± 13	
系統誤差	5.0%	

Rate Analysis

<u>有意性</u>	91.4%
<u>地球ニュートリノフラックス</u>	$50.6^{+39.4}_{-36.4}$ TNU
<u>フラックスの上限値 (99%信頼度)</u>	148.2 TNU

TNU (Terrestrial Neutrino Unit) = events/ 10^{32} target-proton/year

Rate + Shape 解析

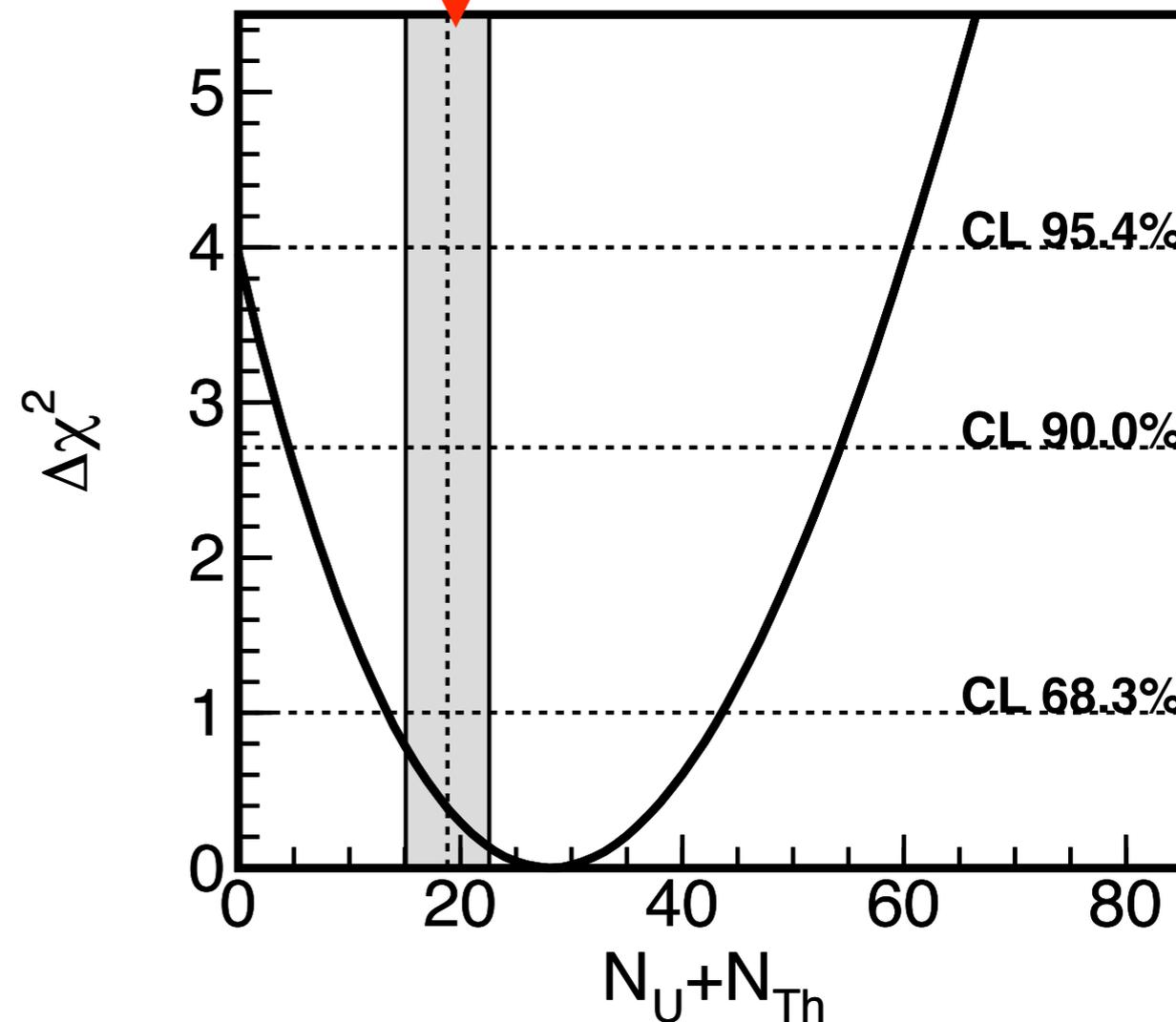
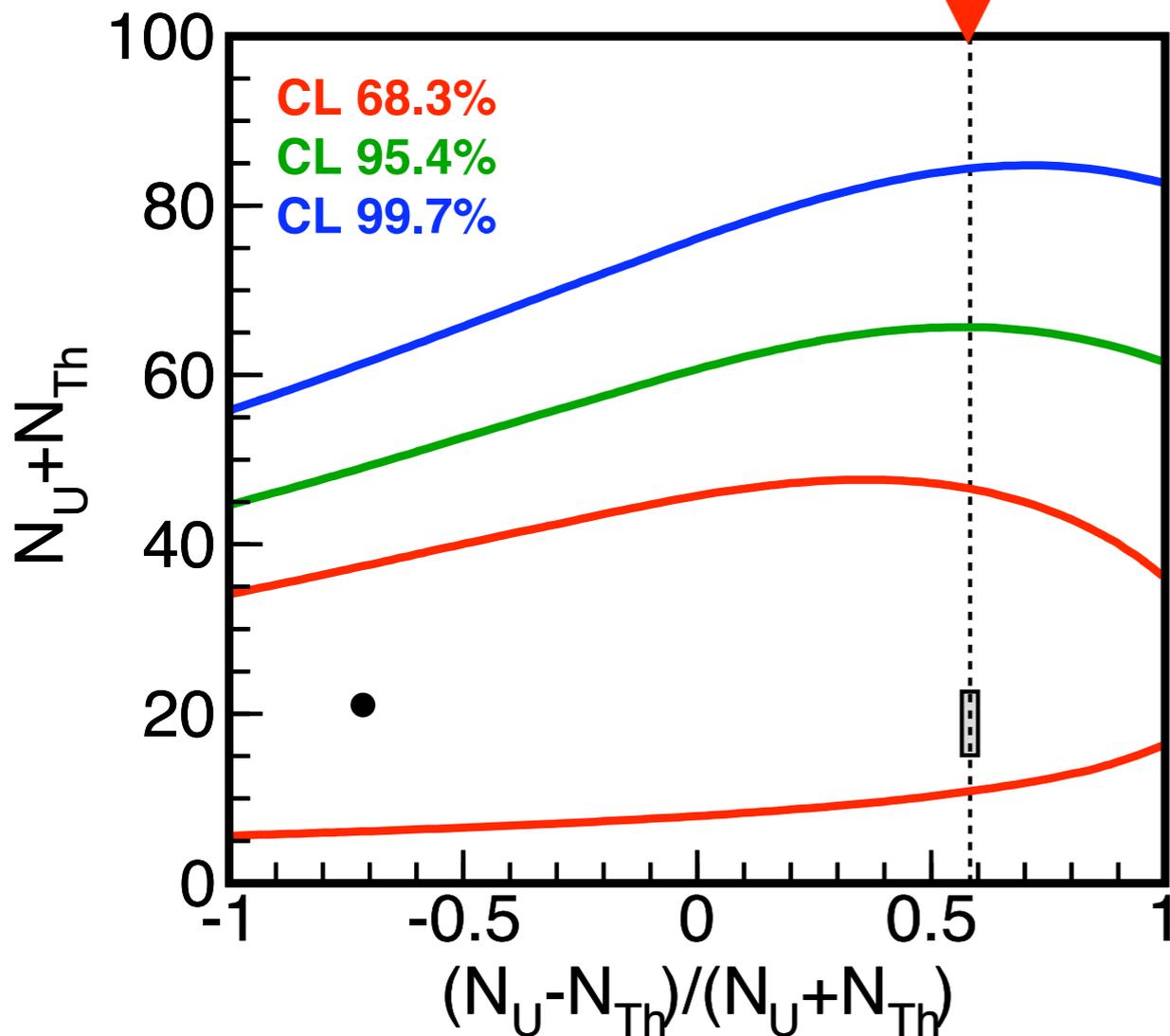
イベント数の比 $U/Th = 3.8$

地球化学からの予測

モデルの予想

19 event

U/Th fix



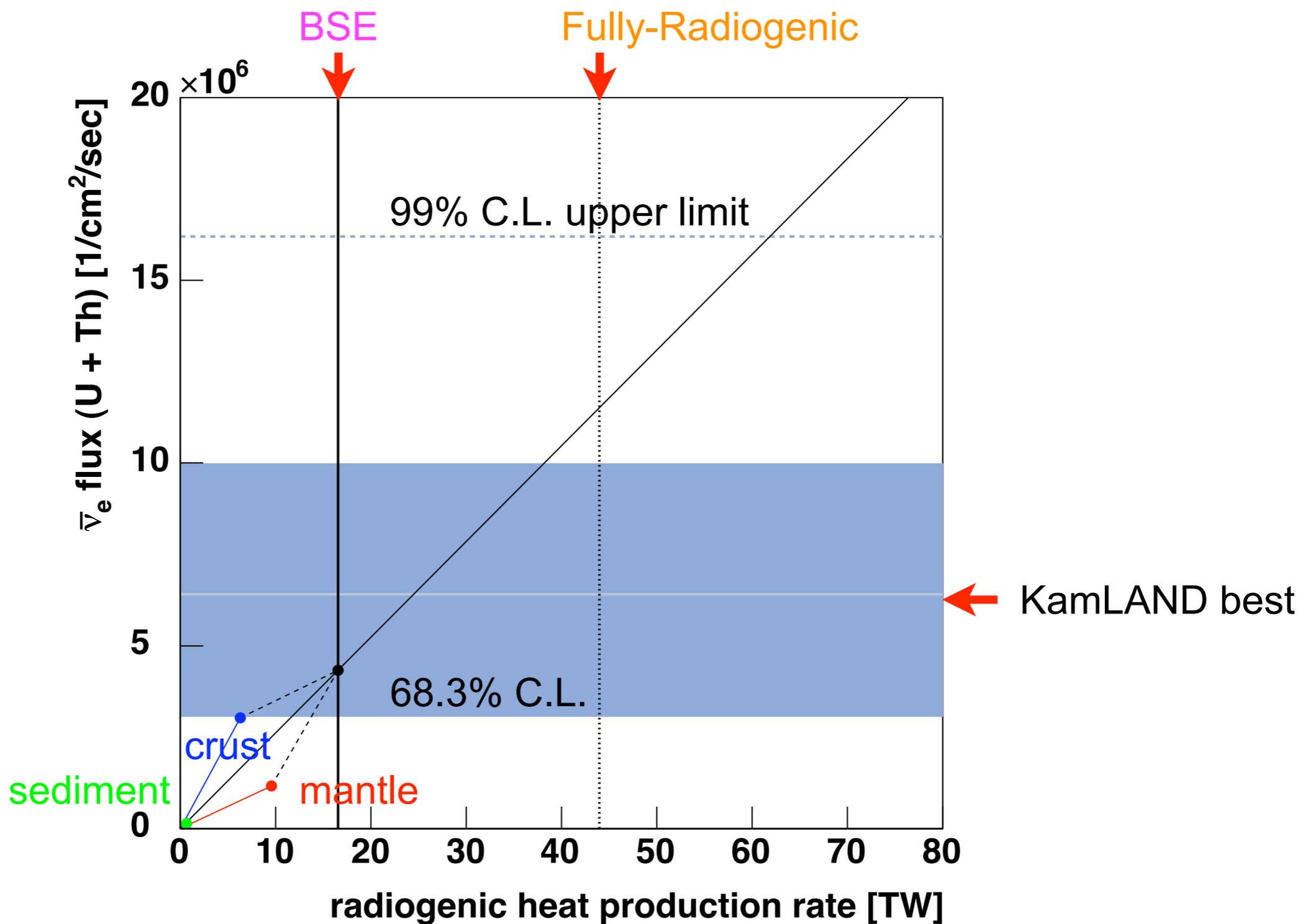
U/Th free

U+Th = 21 event U=3, Th=18

U/Th fix (mass ratio Th/U = 3.9) U+Th = 28 event U=22, Th=6

rate analysisの結果(25^{+19}_{-18} event)と一致

観測の結果と地球化学参照モデル

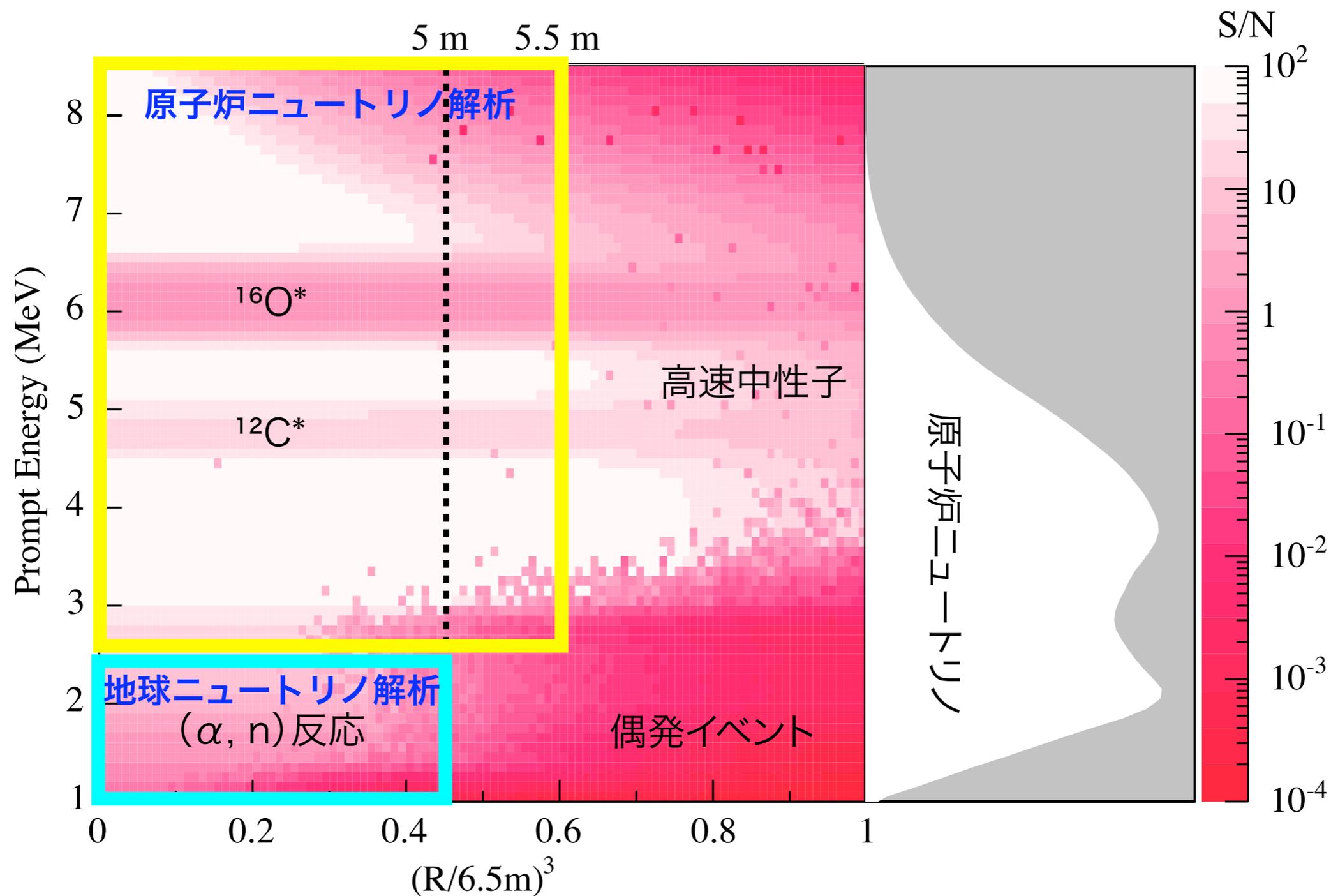


データは予想されるフラックス（BSEモデル）と良く一致
参照モデルの3.8倍多いフラックスは99% C.L.で排除

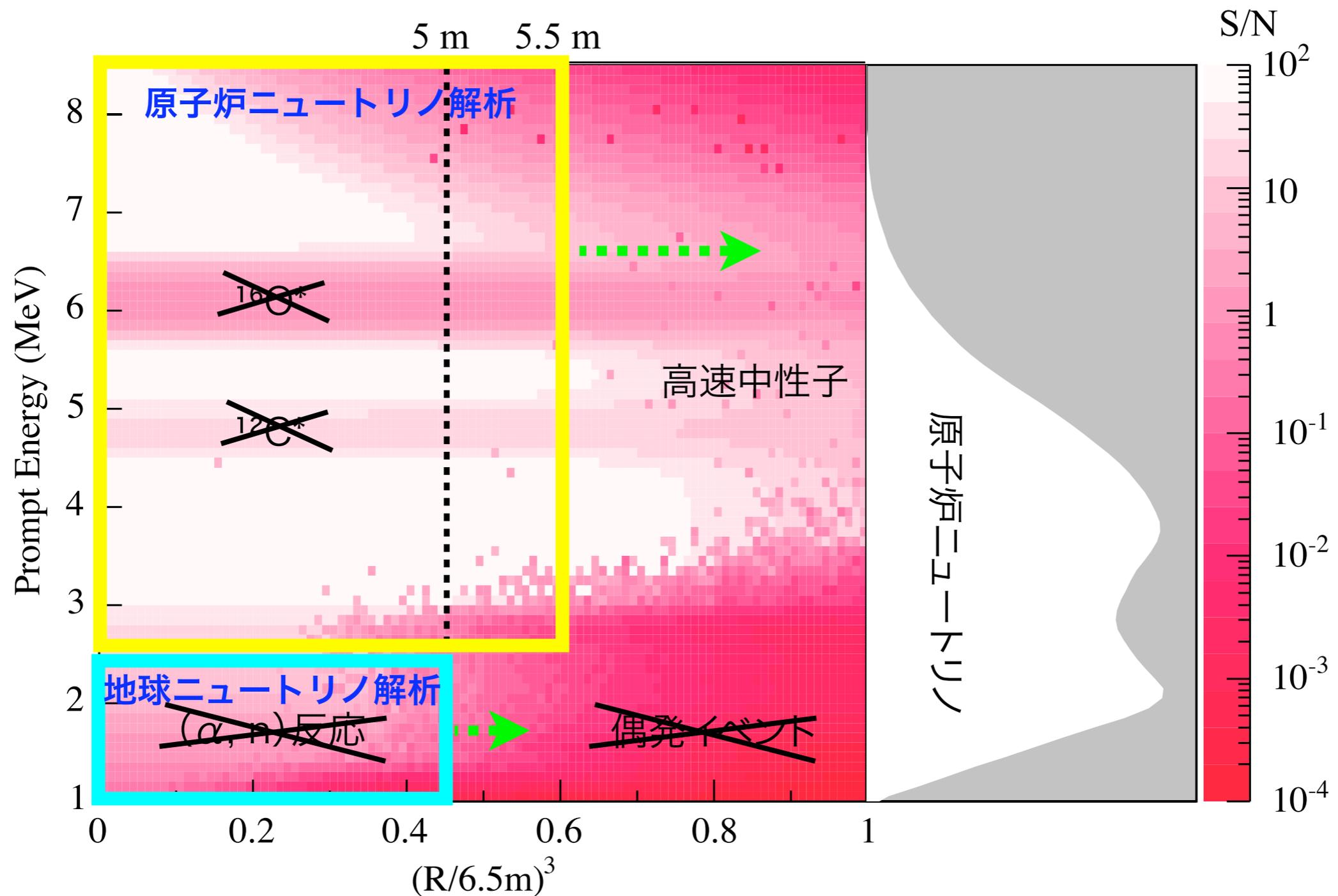
将来の見通し

KamLANDにおける地球ニュートリノ観測の改善

原子炉ニュートリノ観測におけるS/N

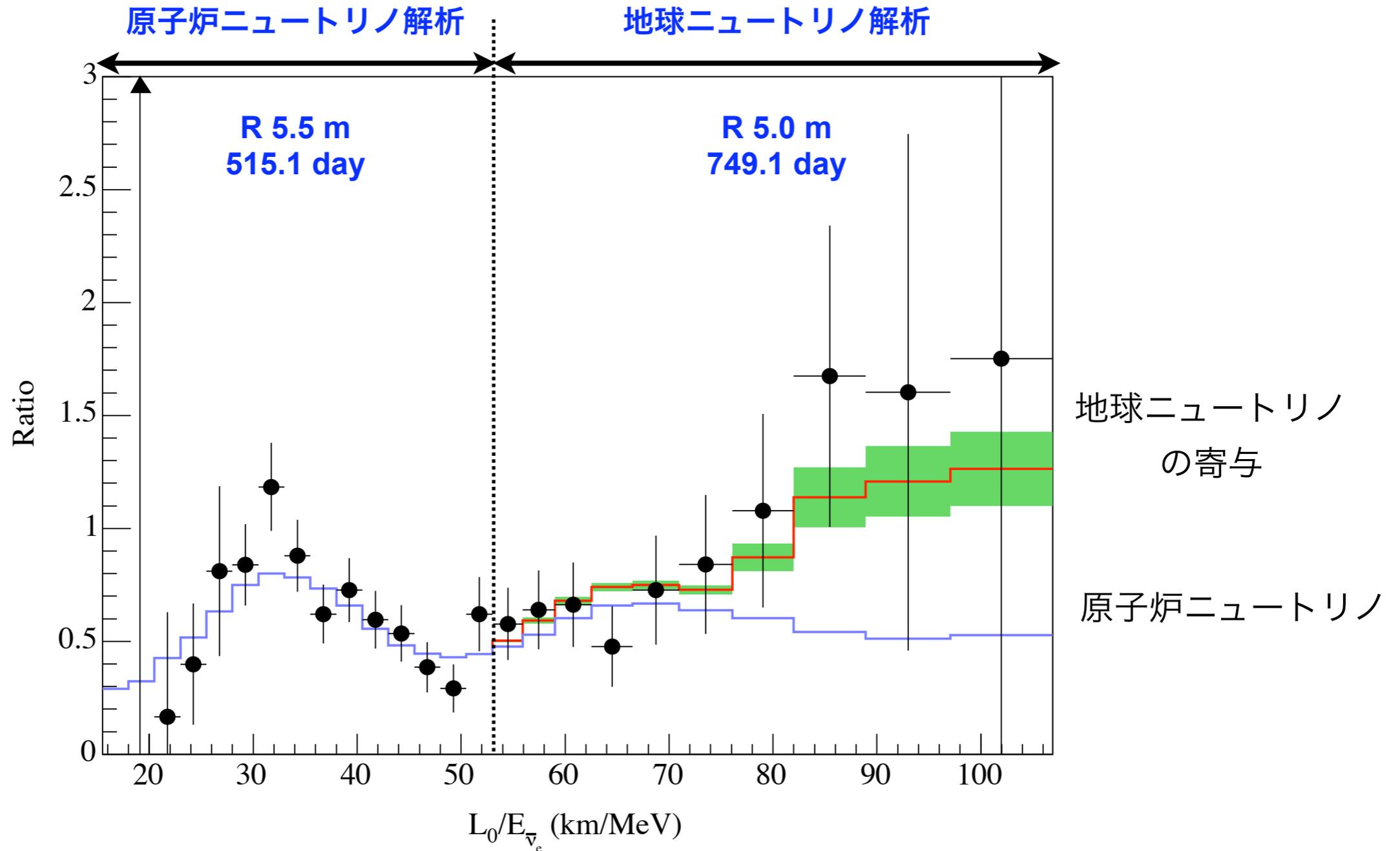


原子炉ニュートリノ観測におけるS/N



- 液体シンチレータの純化によってバックグラウンドを削減
- 有効体積の拡大で統計量を増やす

Combined (geo + reactor) 解析



原子炉ニュートリノ解析では低エネルギーのデータも重要

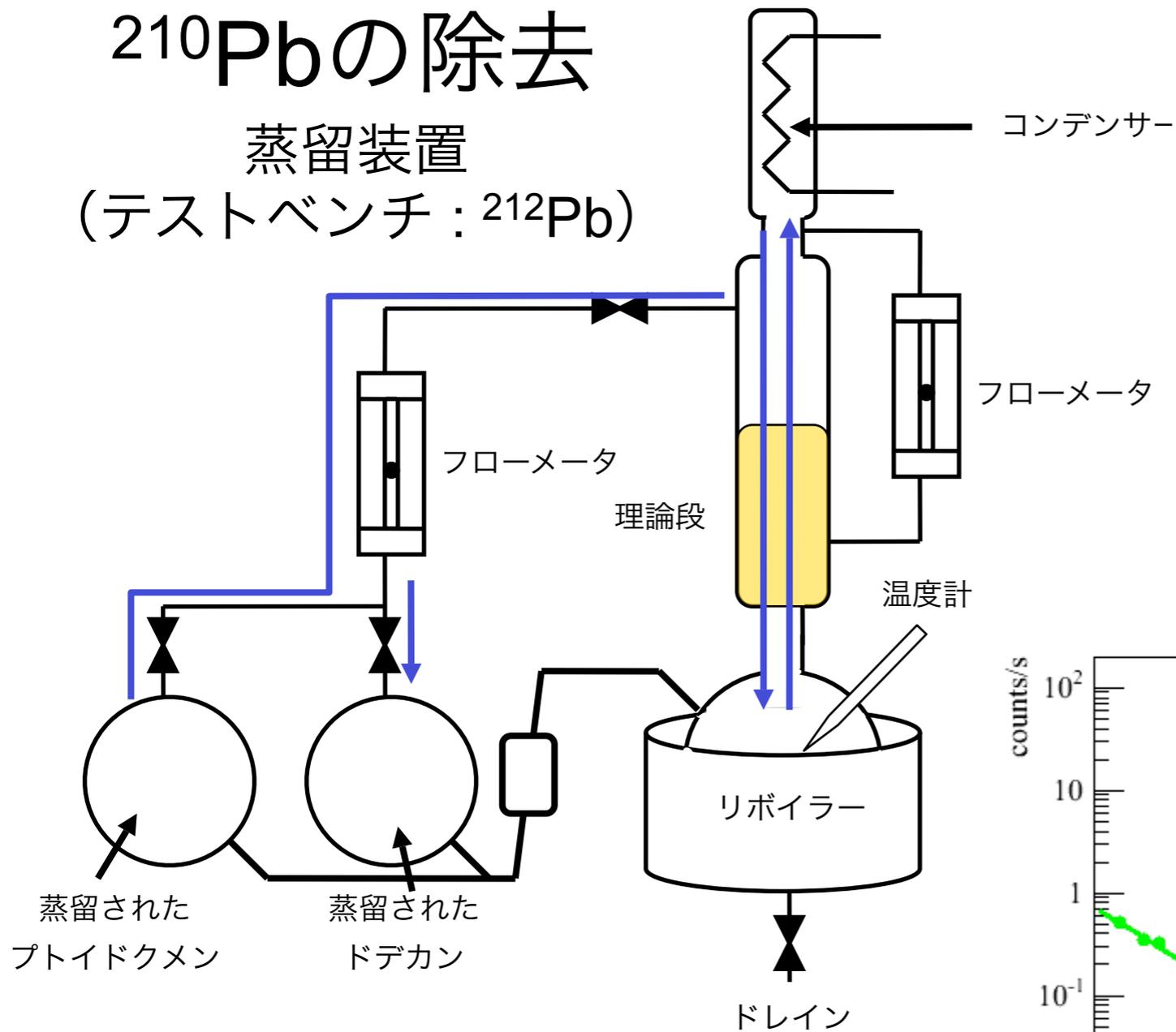
↓ 地球ニュートリノの寄与

Combined (geo + reactor) 解析

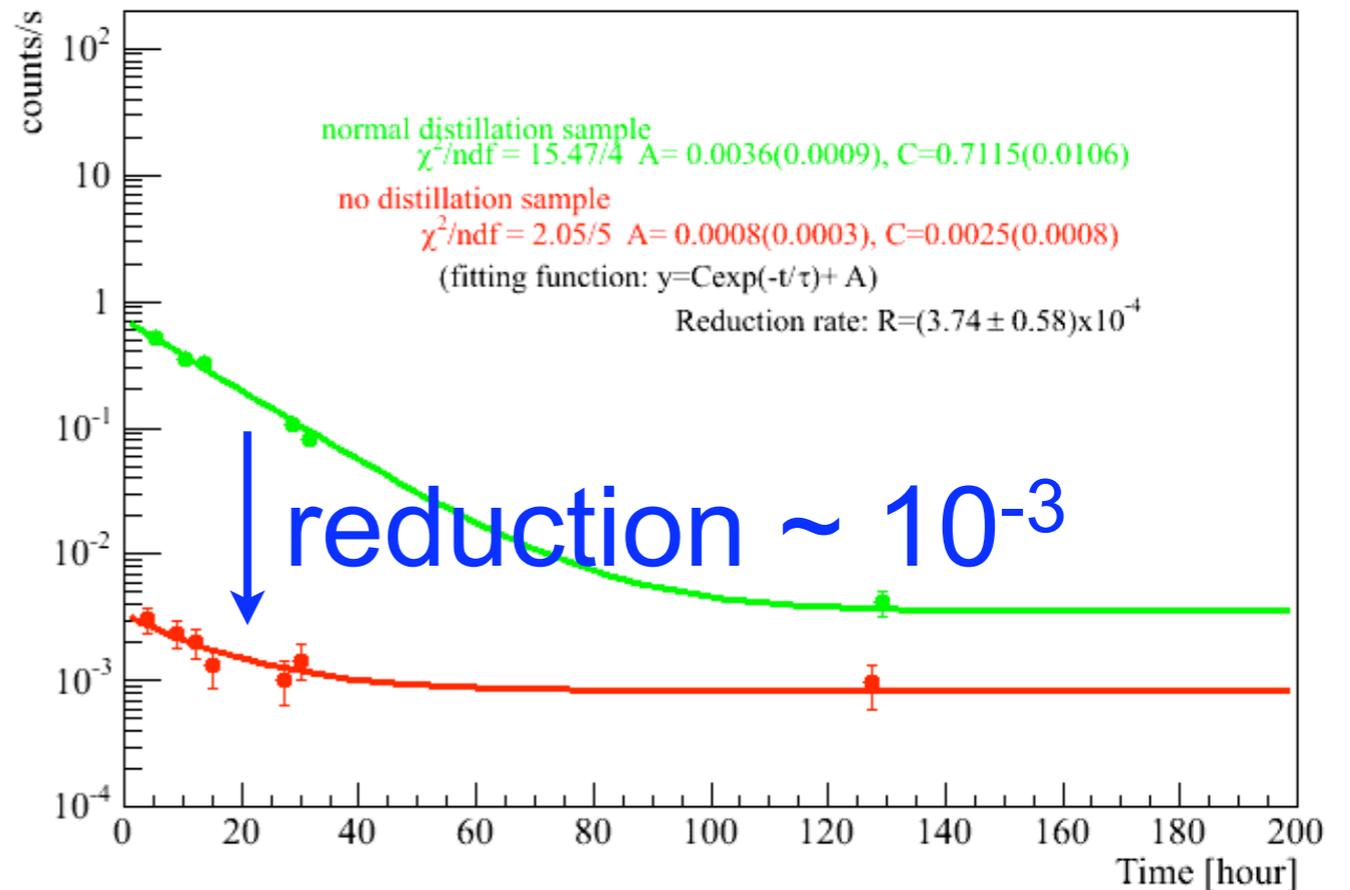
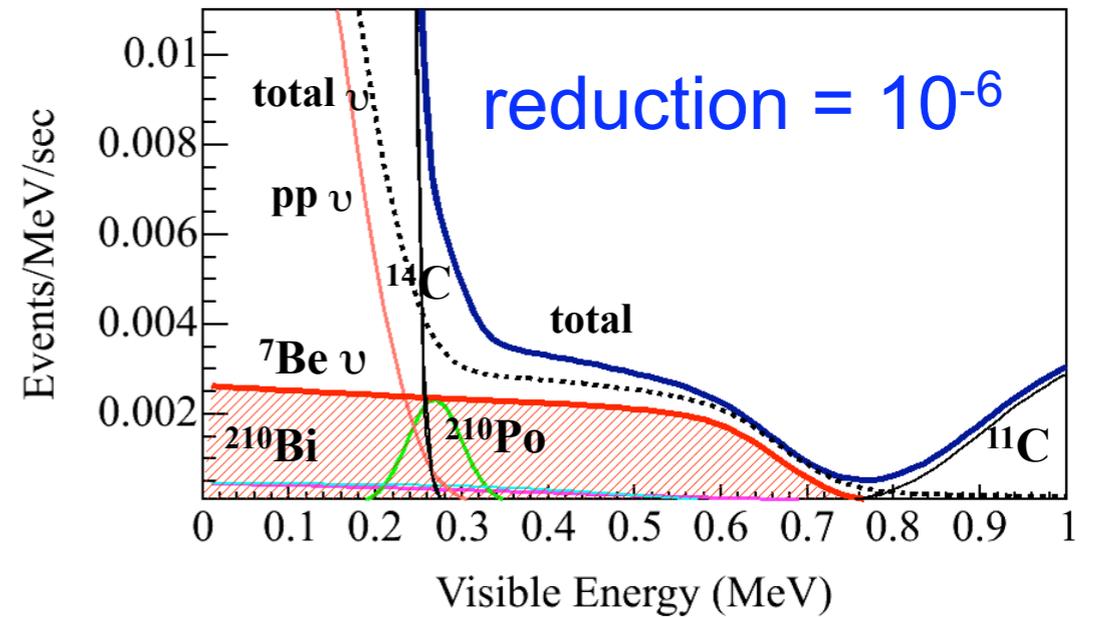
液体シンチレータの純化

210Pbの除去

蒸留装置
(テストベンチ: 212Pb)



純化後のエネルギースペクトル



2, 3回の蒸留プロセスで
10⁻⁶を達成する見込み

純化後の地球ニュートリノ測定

純化後

(α, n), 偶発イベント



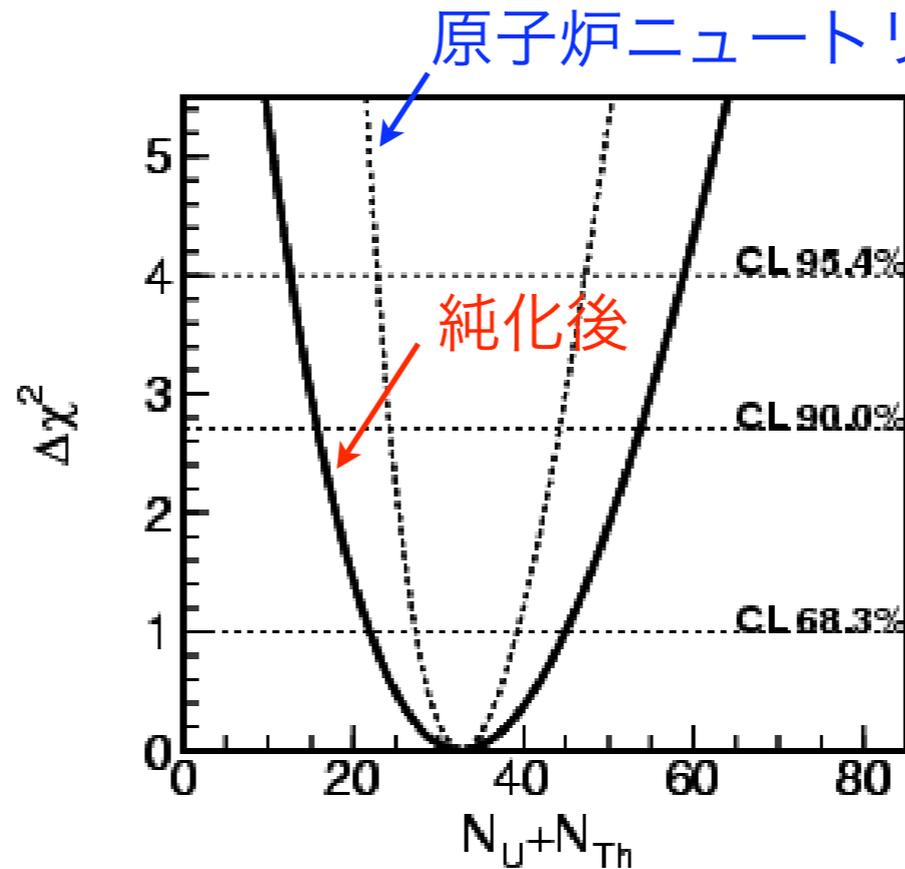
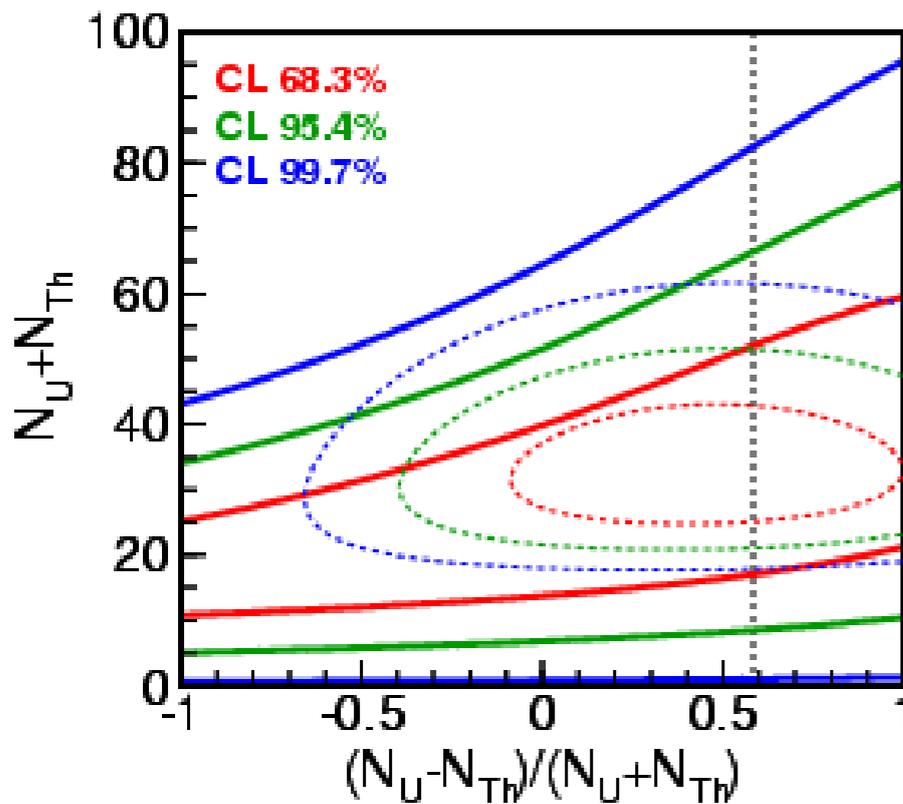
無視できる

実測定時間

749.1 days

有効体積

543 ton (R = 5.5 m)



将来の純化によって、
統計的な有意性は改善

さらに将来...

中性子捕獲の位置分解能を高めた液体シンチレータ
(ガドリニウム or ボロン含有液体シンチレータ)

後発中性子の角度依存性を利用した地球ニュートリノの方向測定

まとめ

- ニュートリノ振動パラメータの精密測定により、ニュートリノのプローブとしての利用が可能になった。
- 1,000トンの液体シンチレータを用いた実験で、実際に地球ニュートリノを観測した。
 - 有意性：91.4%
 - データはBSEモデルに基づいた予測値と誤差の範囲で一致
 - 地球参照モデルの3.8倍のフラックスは99%の信頼度で排除
- 液体シンチレータの純化によってバックグラウンドを減らし、有効体積の拡大することで、より高い精度での地球ニュートリノの測定を行う予定である。