

地球ニュートリノ



Illustration by symmetry



渡辺 寛子
東北大学ニュートリノ科学研究センター



国立天文台, 2019年1月7-8日

Contents

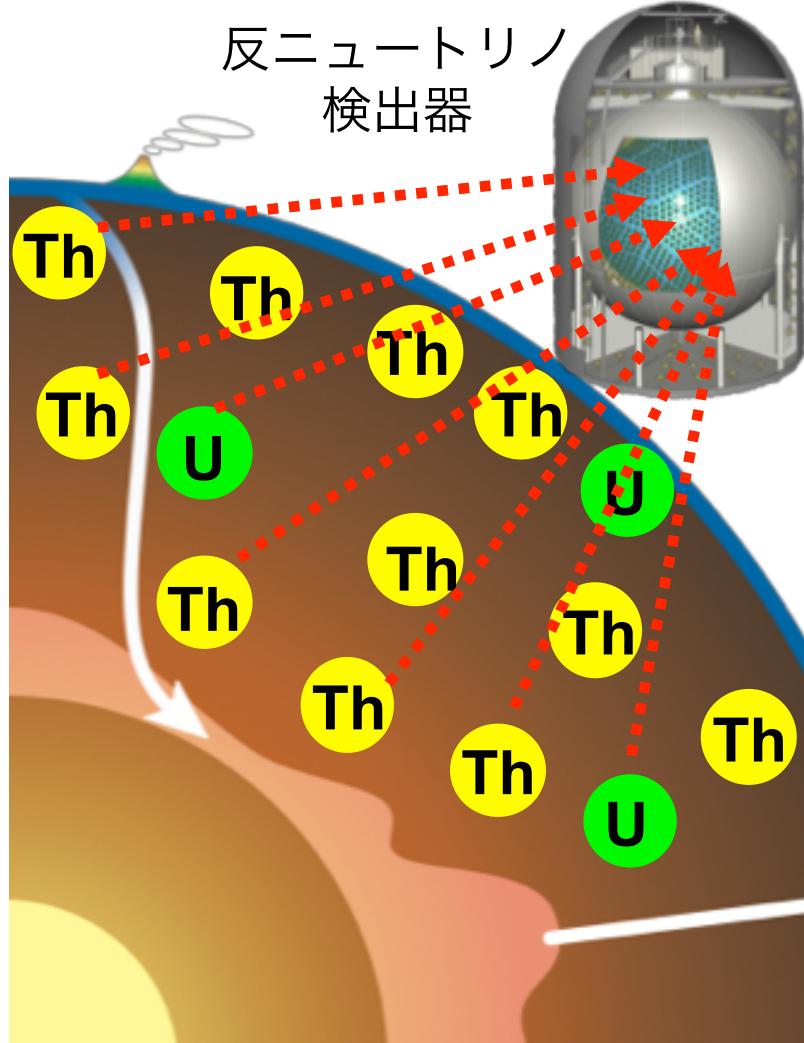
1. イントロダクション
2. 觀測意義
3. KamLAND実験
4. 最新觀測結果
5. 将来展望
6. まとめ

Contents

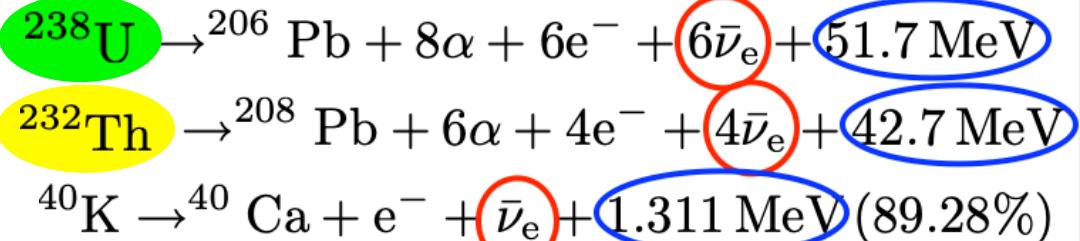
1. イントロダクション
2. 観測意義
3. KamLAND実験
4. 最新観測結果
5. 将来展望
6. まとめ

地球内放射性物質の崩壊による電子反ニュートリノ

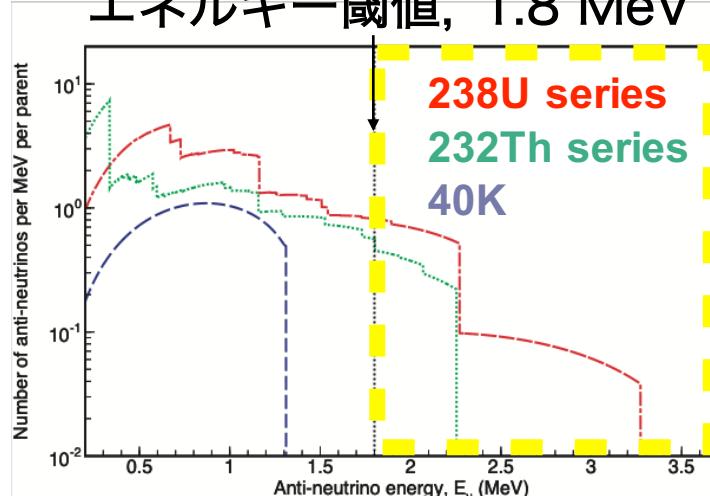
$$\bar{\nu}_e \ 4.1 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{sec}$$



β -崩壊



エネルギー閾値, 1.8 MeV



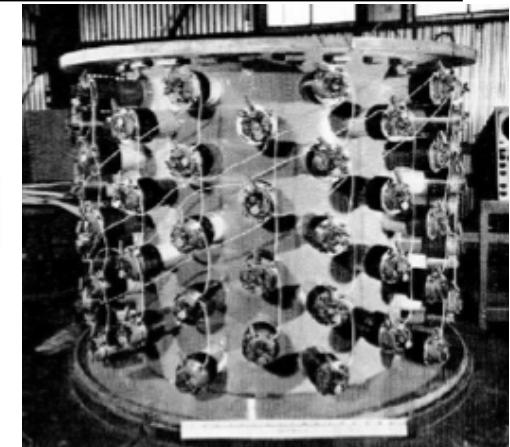
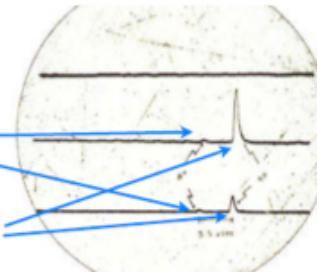
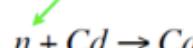
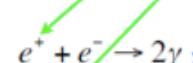
* Uと Thからの地球ニュートリノのみ観測可
* K地球ニュートリノの観測には新技術開発が必要

地球 $\bar{\nu}_e$ 数 \leftrightarrow U & Th 量, 放射化熱

▶ 地球ニュートリノの歴史

1953年 F.Reines, C.Cowan : 原子炉ニュートリノの観測開始

原子炉近傍にCd入り液体シンチレータを設置して観測



1956年 ((反)電子)ニュートリノの存在を証明

G. Gamow



Dear Fred,
Just occurred to me
that your background
neutrinos may just be coming
from high energy β -decaying
members of U and Th families
in the crust of the Earth etc.
not have on the train any
uniform. To check it up, but it
seems the order of magn. is
reasonable. In fact the total energy
radioactive energy production
under one square foot of surface
may well be equal to the
energy of solar radiation falling
on Earth that surface ...
What do you think?
Write to me at: The Union
Univ. of Mich. Ann Arbor. Mich.
Yours G.G.

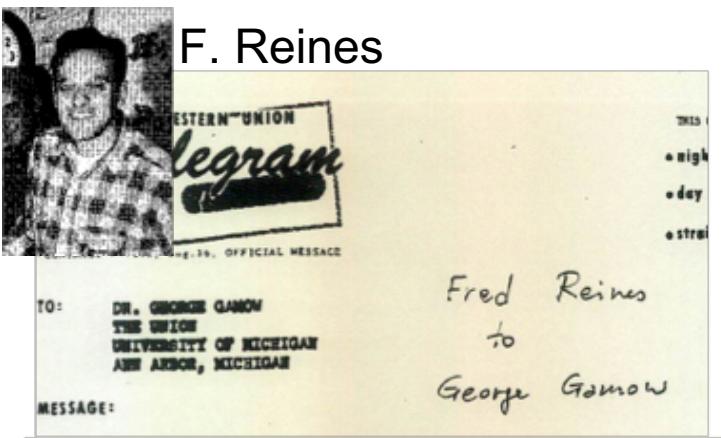
1956年 : G.Gamow から
F.Reines への手紙で言及

It just occurred to me that **your background**
may just be coming from
high-energy beta decaying members of **U**
and **Th** families in the crust
of the Earth ...

ちょっとと思ったんだけど、そのバックグラウンドって
もしかしたら地球の地殻にあるウランやトリウム系列
のベータ崩壊から来てるんじゃないかな?



F. Reines



FROM NUMBERS IN VERY BOOK ON THE PLANETS, EQUILIBRIUM HEAT LOSS
FROM EARTH'S SURFACE IS 90 ERGS/CM² SEC. IF ASSUME ALL DUE TO
BETA DECAY THEN HAVE ONLY ENOUGH ENERGY FOR ABOUT 10^8 , 10^9 NEV
NEUTRONS PER CM² AND SEC. **THIS IS LOW BY 10^5 OR SO.** SHORT
HALF LIVES WOULD BE MADE BY COSMIC RAYS OR NEUTRONS IN EARTH.
IN VIEW OF RARITY OF COSMIC RAYS; I.E. ABOUT EQUAL TO ENERGY
OF STARLIGHT AND OF NEUTRONS IN EARTH THIS SOURCE OF NEUTRONS^{10⁵}
SHOULD EVEN LESS LIKELY AS A SOURCE OF OUR SIGNAL.

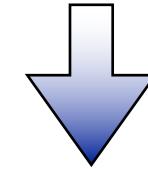
▶ 地球ニュートリノの歴史

2005年 KamLANDで初の実験的研究



The reported investigation of **geoneutrinos** should pave the way to future and more accurate measurements, which **may provide a new window** for the exploration of the Earth.

ここに報告された地球ニュートリノ研究は、地球を探索するための新しい手法となりうる、将来のより精密な観測につながるものである



- * 地球ニュートリノ観測で地球のダイナミクス、地球形成を検証
- * 『ニュートリノ地球科学』を創出

現在

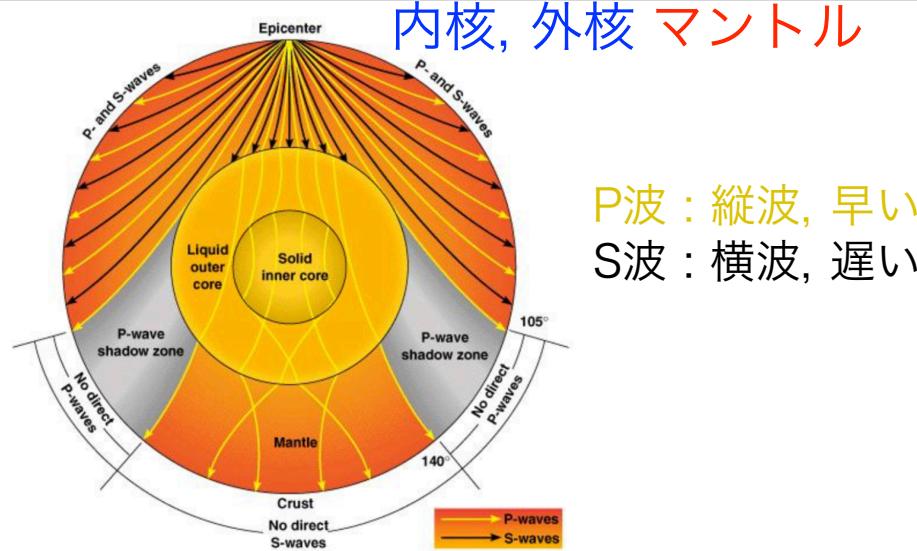
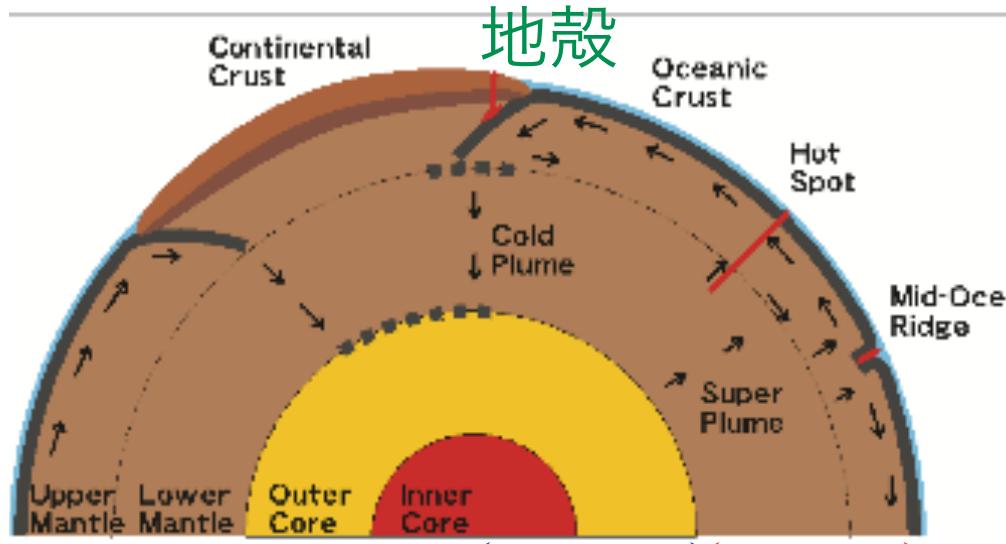
- KamLANDとBorexino(伊)による多地点観測
- 観測精度向上→地球科学的知見を得られるレベルに到達
- 素粒子物理と地球科学の共同研究が進む
- 新たな観測アイデア
- 新たな観測施設の建設・計画

『ニュートリノ地球科学』の実体化

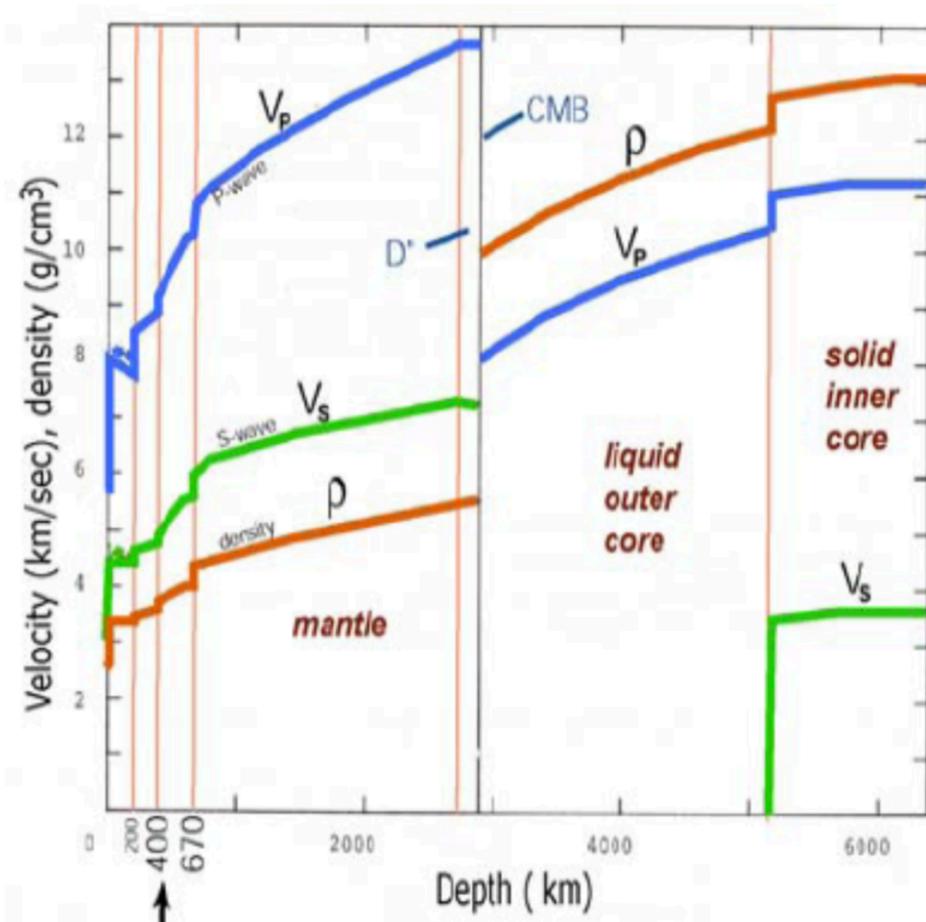
Contents

1. イントロダクション
2. 觀測意義
3. KamLAND実験
4. 最新觀測結果
5. 将来展望
6. まとめ

構造：地震波観測



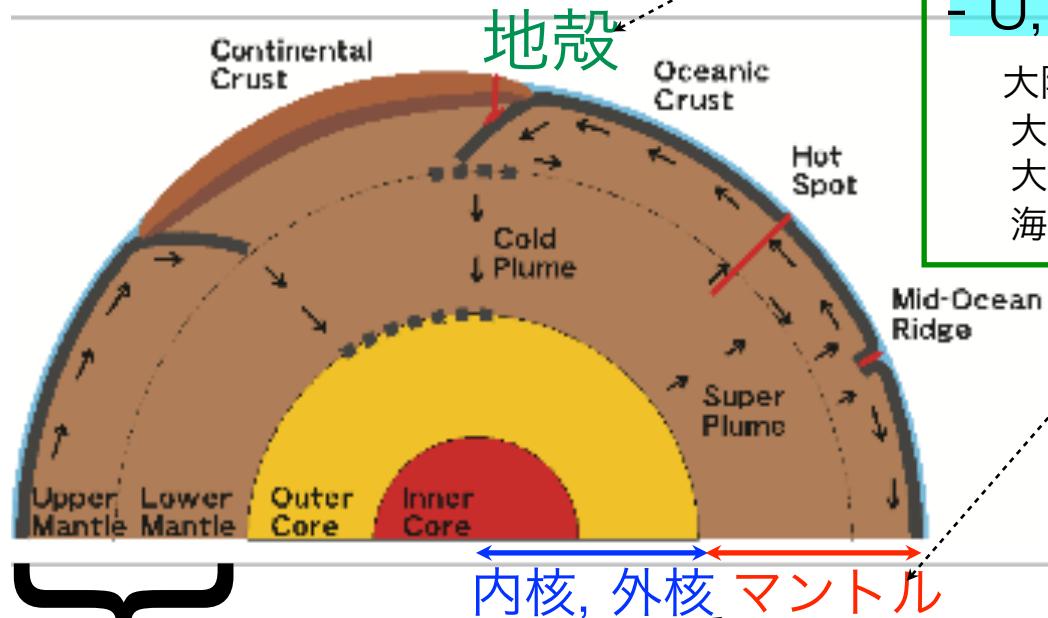
P波：縦波, 早い
S波：横波, 遅い



地震波速度と密度の深さ分布

- ・ 構造を決める
- ・ 地球化学の情報はない

放射性物質: 分析, モデリング



(Bulk Silicate Earth) BSEモデル

地殻+マントルのケイ酸塩部分の
化学組成の計算値
 $U/Th \sim 3.9$, 放射化熱 ~ 20TW

① 地殼 (地表から40km以下)

- 地球質量の0.4%. U,Thの約半分が存在
- U, Th : 岩石学からの予測 (Rudnick et al.2003)

大陸上部地殼 U:2.7 ppm Th:10.5 ppm

大陸中部地殼 U:1.4 ppm Th:6.5 ppm

大陸下部地殼 U:0.2 ppm Th:1.2 ppm

海洋地殼 : U:0.10 ppm Th:0.22 ppm

② マントル (地表から40~2900 km)

- マントル内のU,Thは多分一様に分布
- U, Th : U:0.012 ppm, Th:0.048 ppm

* 測定値は無い.

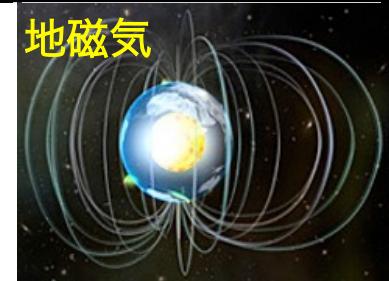
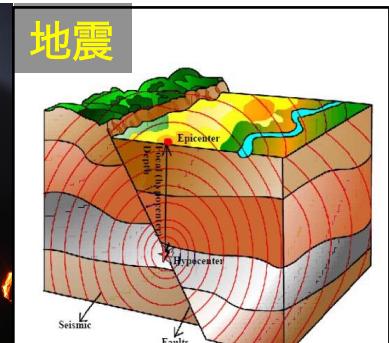
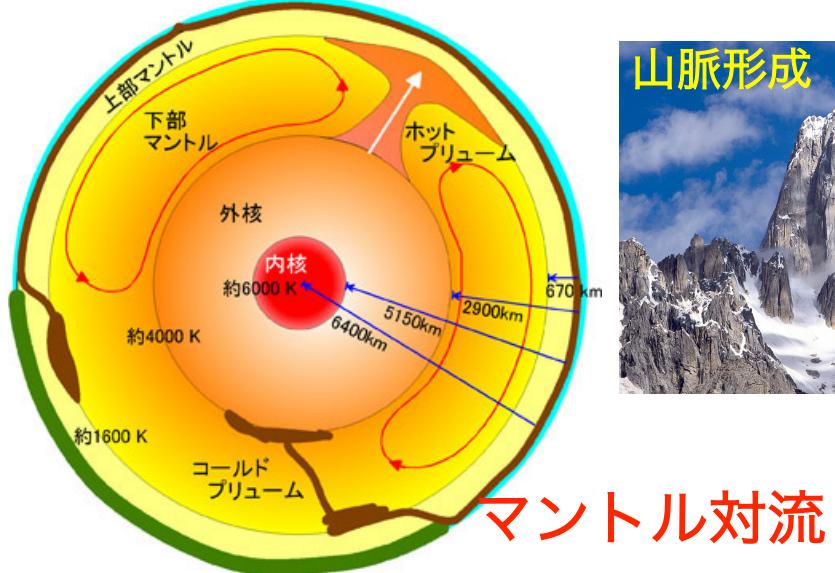
* BSEモデル (地殼+マントル)から地殼の予測値を引いたもの.

③ 内核, 外核 (内核~月)

- Fe, Ni等の金属鉄を主成分とする
- U, Thは存在しないとされている
(U, Thは酸化されやすく酸化物やケイ酸塩鉱物として安定に存在する親石元素)

▶ 地球ニュートリノ → 地球の熱

プレート運動



地球活動の謎

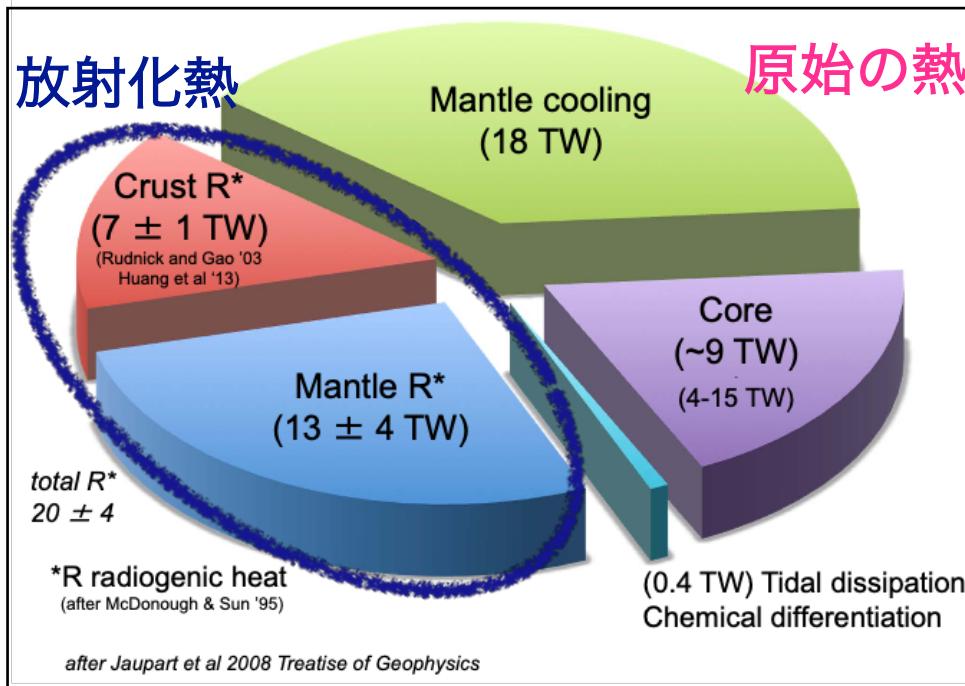
- ・ 地球活動のエネルギー源、エネルギー量は?
- ・ マントルはどのように対流しているのか? 一層 or 複数層対流?
- ・ 地球磁場の生成・維持の起源は?

→ 地熱の理解は重要な課題

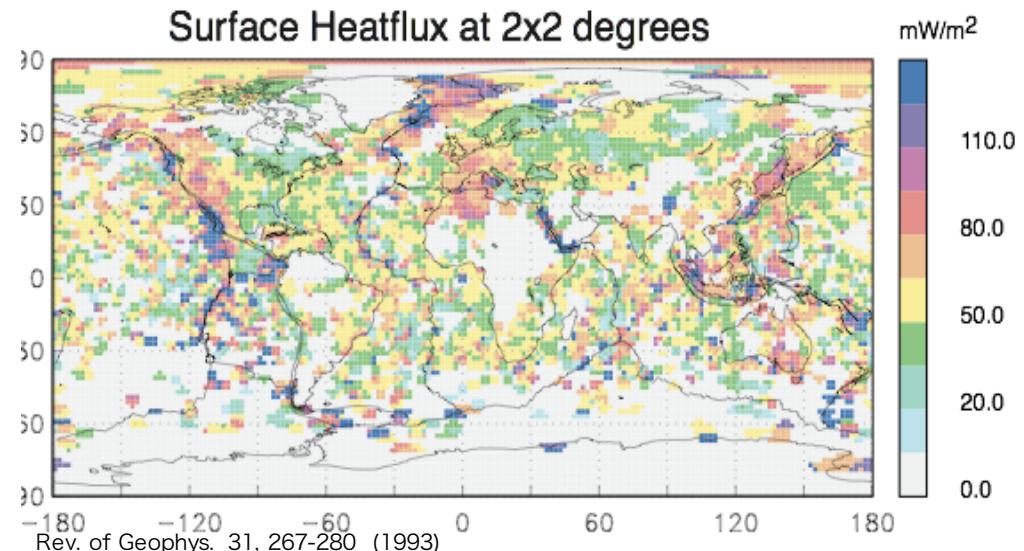
▶ 地球の熱収支

地表からの熱流量
46 ± 3 TW

熱流量の内訳の例 (モデル)



地殻の熱流量観測 & モデル計算



放射化熱の占める割合・内訳
はモデルが複数存在

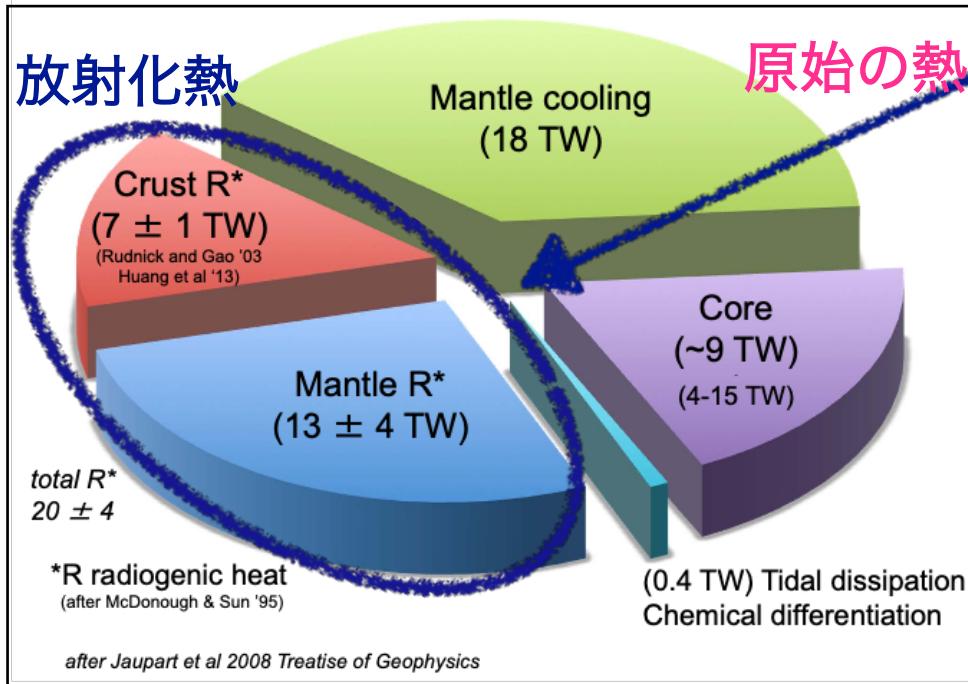
“原始の熱”

- 地球集積・金属核の分離の重力エネルギーの解放
- 内核(固体)の成長による潜熱

▶ 地球の熱収支

地表からの熱流量
46 ± 3 TW

熱流量の内訳の例 (モデル)



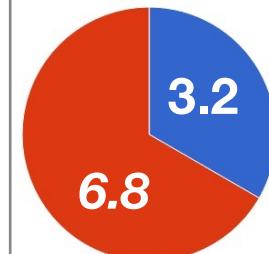
約半分は放射化熱?

Bulk Silicate Earth (BSE) models

コンドライト隕石の組成を基にしたモデル

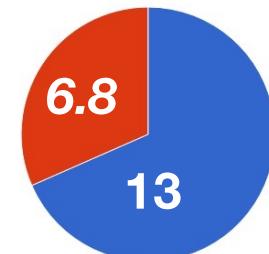
大陸地殻 + マントル

Low Q



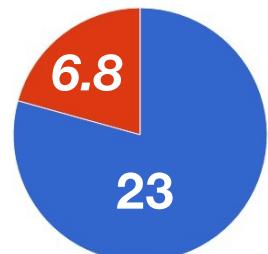
10 TW

Middle Q



20 TW

High Q



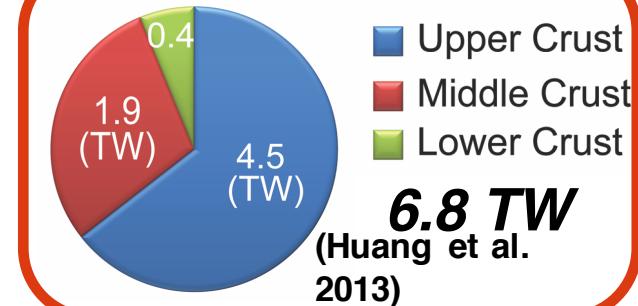
30 TW

■ 大陸地殻 ■ マントル

Th/U = 3.9

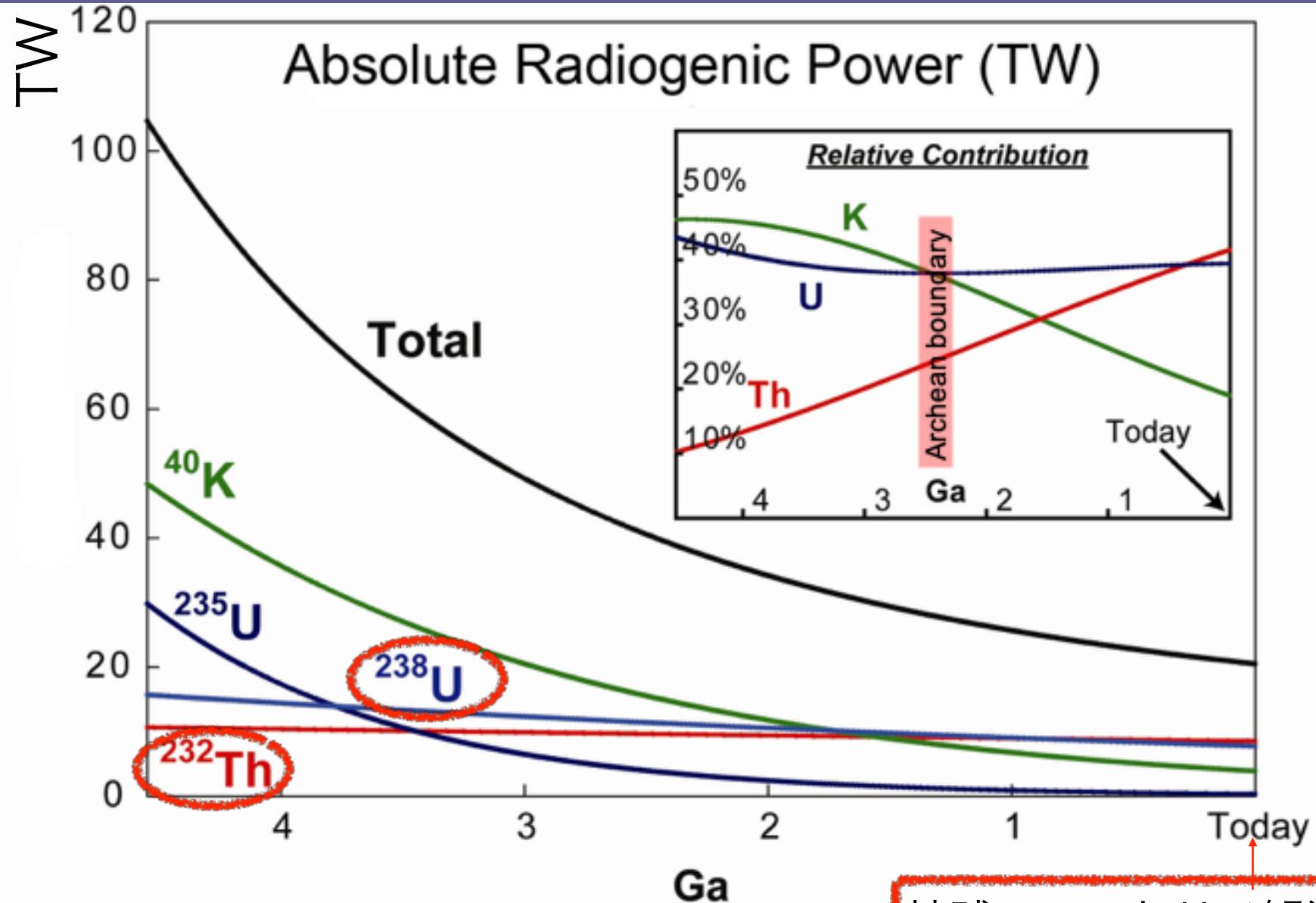
K/U = 1.4×10^4

大陸地殻



地球ニュートリノ観測は地球のエネルギーを直接検証できる

▶ 地球の熱進化 : K, U, Th の役割



地球ニュートリノ観測で
直接観測できる

- Main goal

地表での熱流量のうち放射性物質起源の熱はどれくらいか？

- 他に熱源はあるか？
- 長寿命放射性物質の地球内分布は？

* 地殻とマントルにはどれくらいあるか? ← 近い将来の目的

* マントル内には一様分布か? ← 次世代の目的

* 核にもあるのか? ← 次世代の目的

- BSEモデルは地球ニュートリノ観測データと無矛盾か?

- 異なるBSEモデルを地球ニュートリノ観測で識別できるか?

- 地球全体のTh/U比は?

結果有り
観測中

- 地球の誕生時のプロセスに知見を与えられるか?

結果有り
観測中

結果有り
観測中

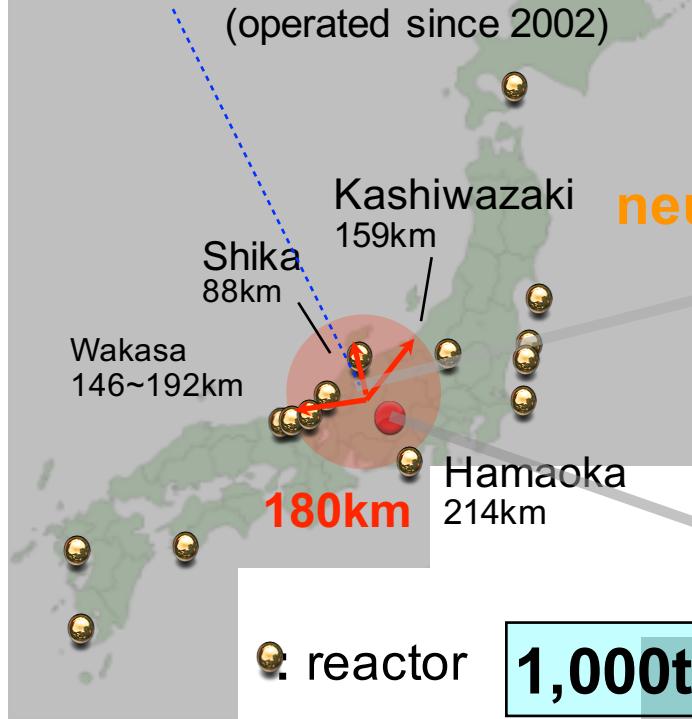
観測中

Contents

1. イントロダクション
2. 観測意義
3. KamLAND実験
4. 最新観測結果
5. 将来展望
6. まとめ

KamLAND

Kamioka Liquid Scintillator
Anti-Neutrino Detector
(operated since 2002)



neutrino cosmic ray

1000m depth

1,000t 液体シンチレータ

* Dodecane (80%) Pseudocumene (20%) PPO (1.36 g/l)

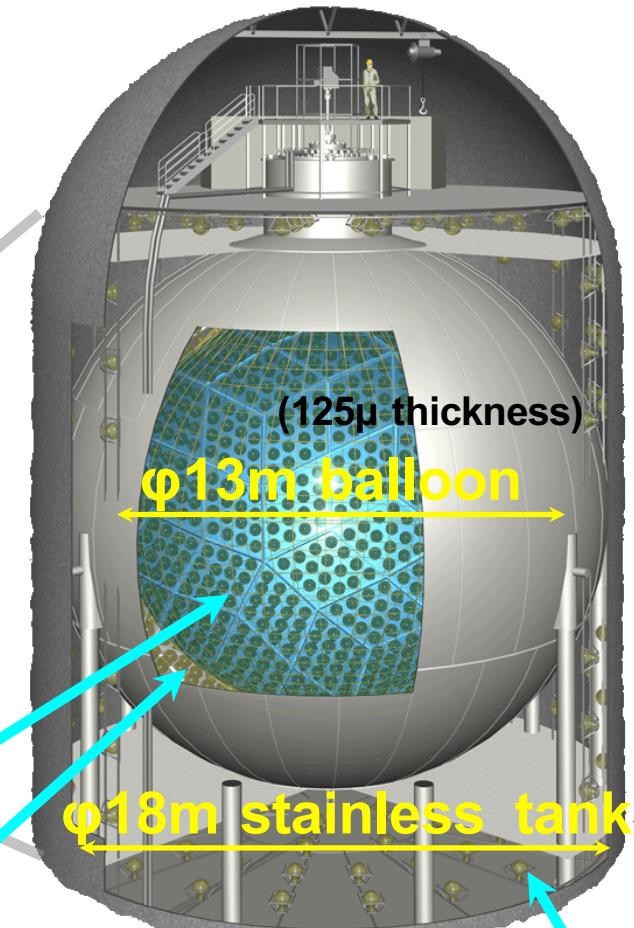
* 極低放射性物質環境 ($^{238}\text{U}:3.5 \times 10^{-18} \text{g/g}$, $^{232}\text{Th}:5.2 \times 10^{-17} \text{g/g}$)

1,325 17inch + 554 20inch PMTs

* Photo coverage 34%

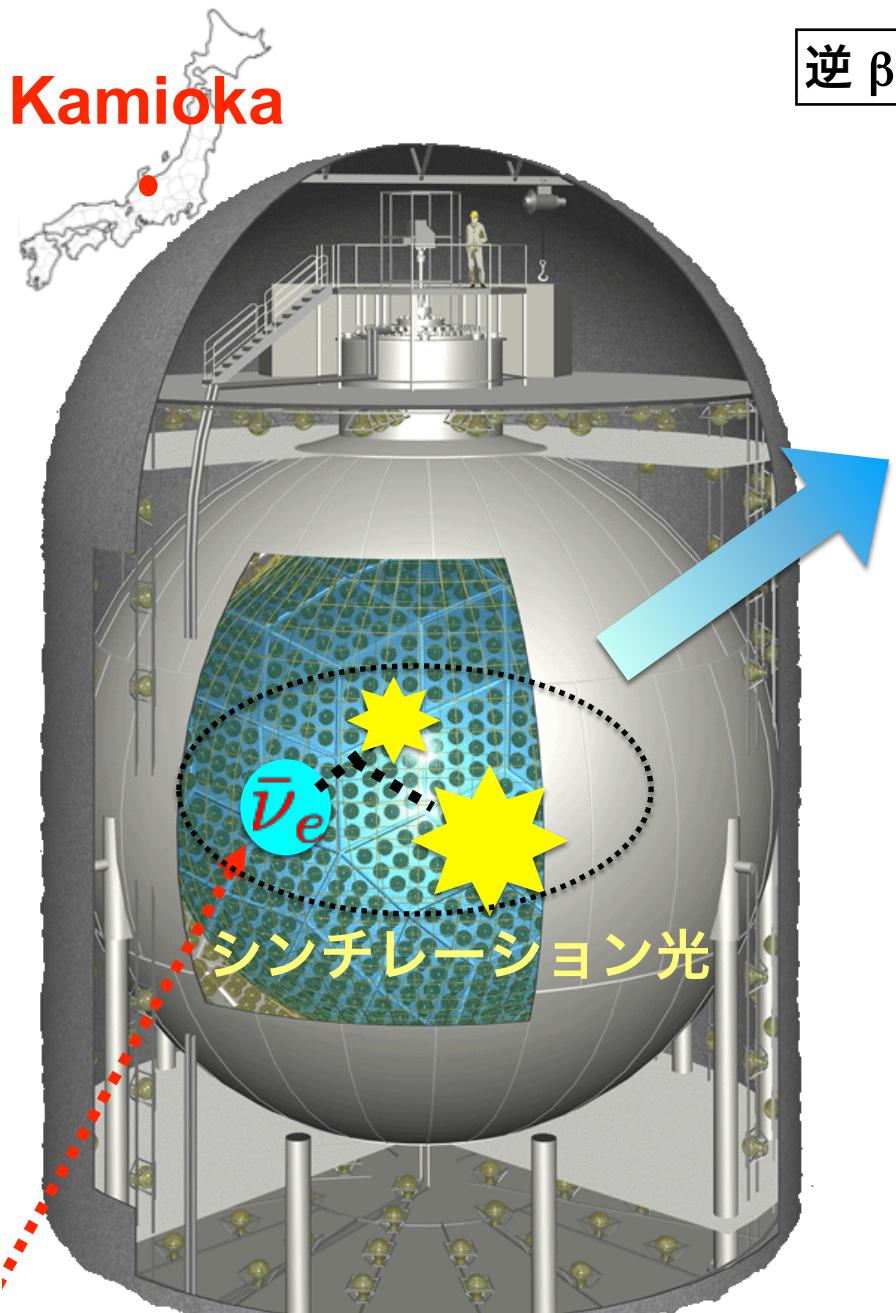
Water Cherenkov Outer Detector

* Muon veto

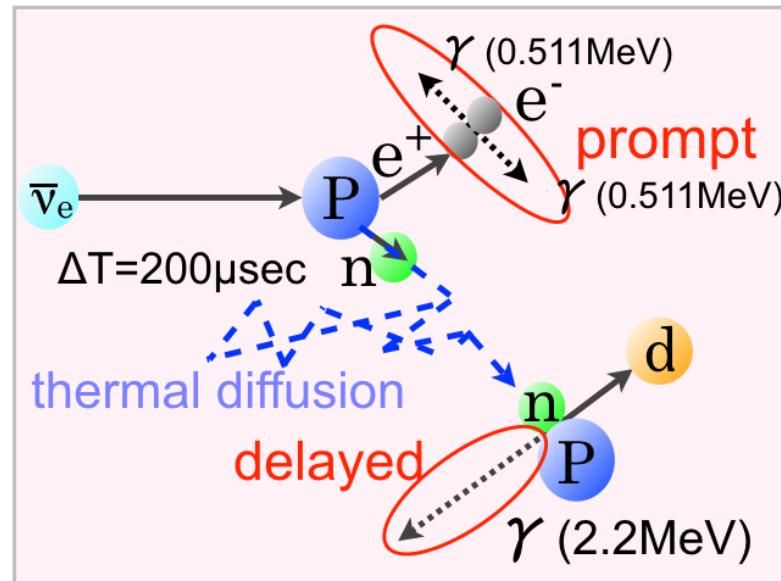


▶ 地球ニュートリノ観測方法

12/42



逆 β 崩壊



利点

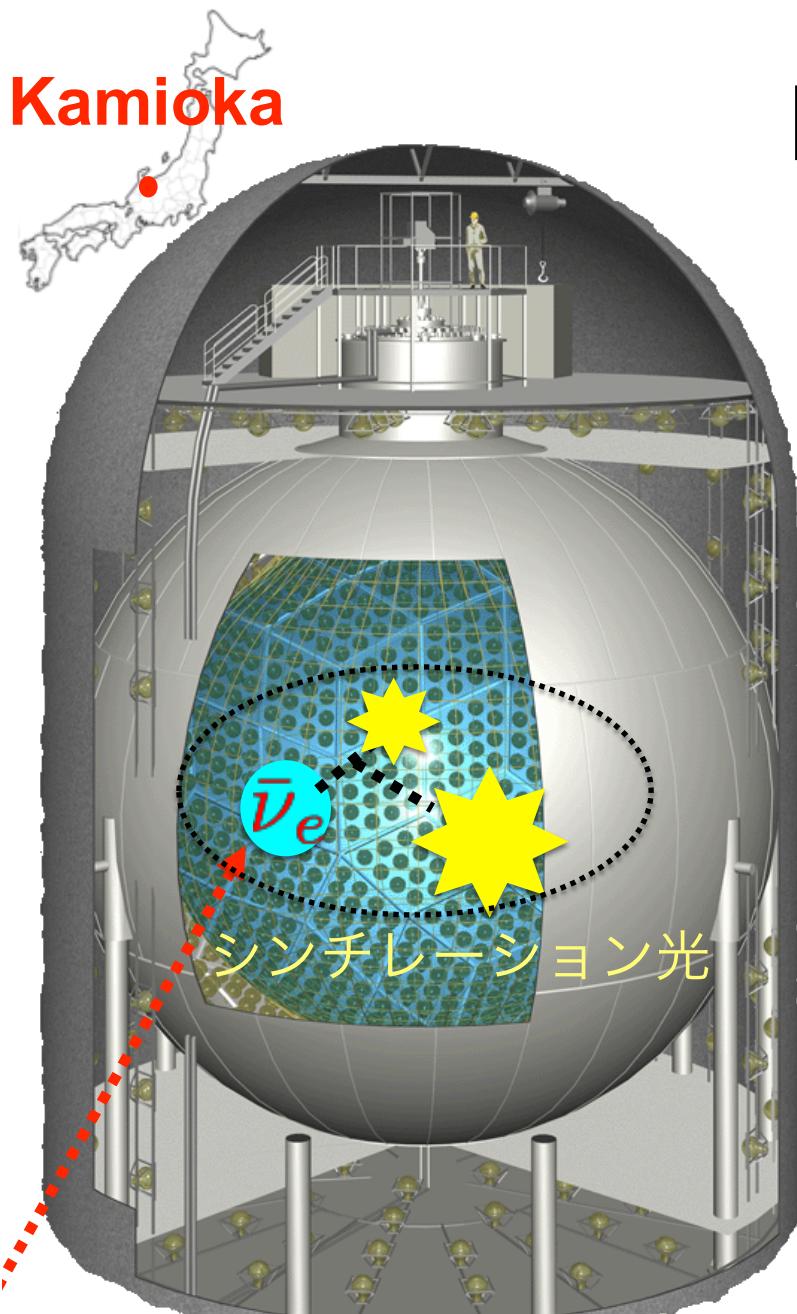
- 2つの時間的・空間的に相関のある信号
- バックグラウンドを大幅に低減できる

欠点

- 到来方向は観測できない

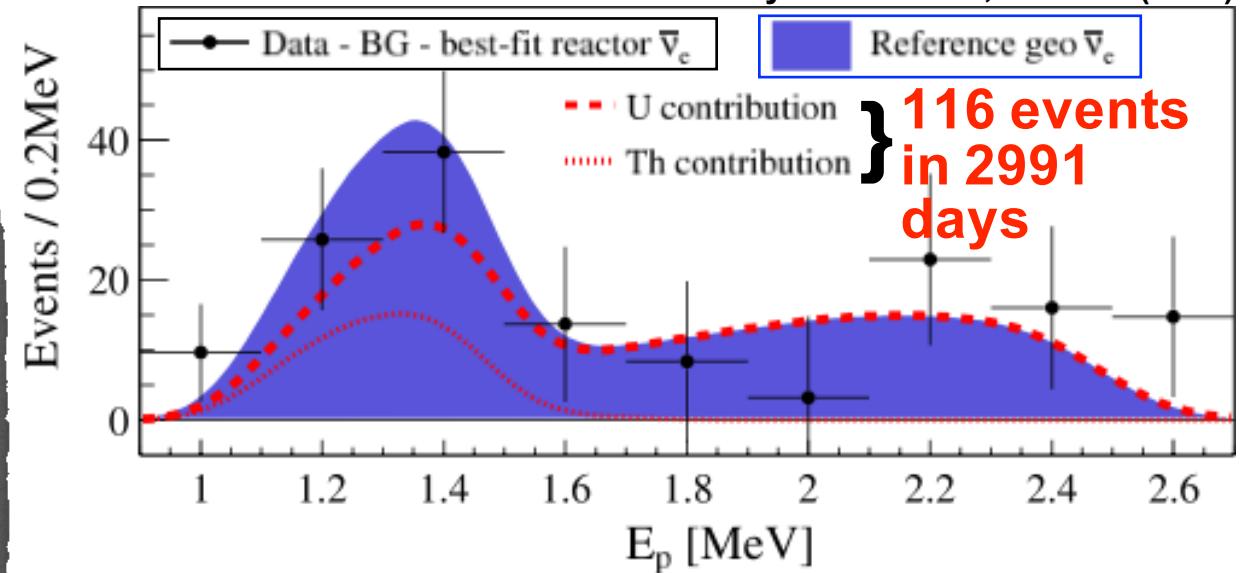
▶ 地球ニュートリノ観測方法

13/42



観測：エネルギー分布、イベントレート

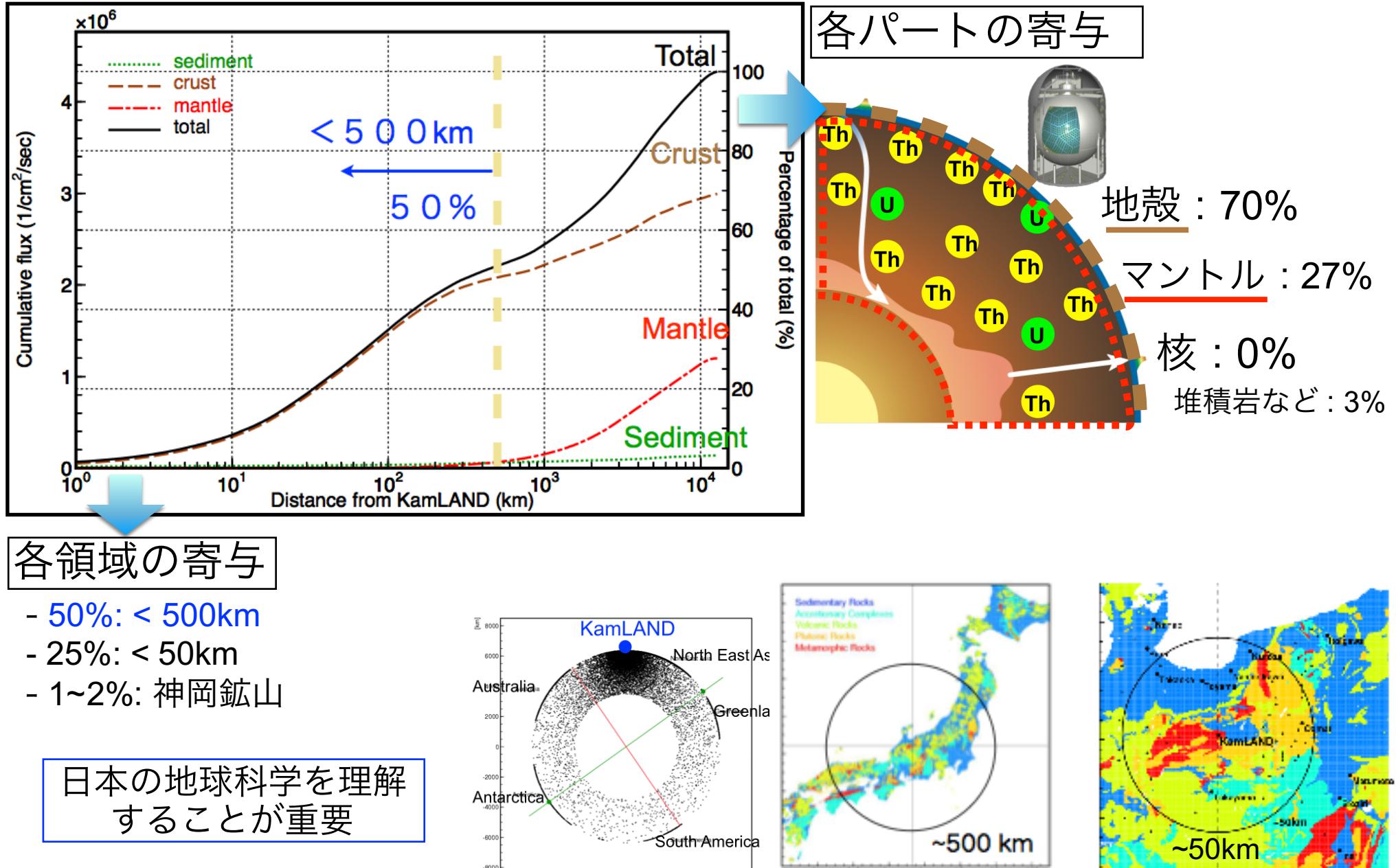
Phys. Rev. D 88, 033001 (2013)



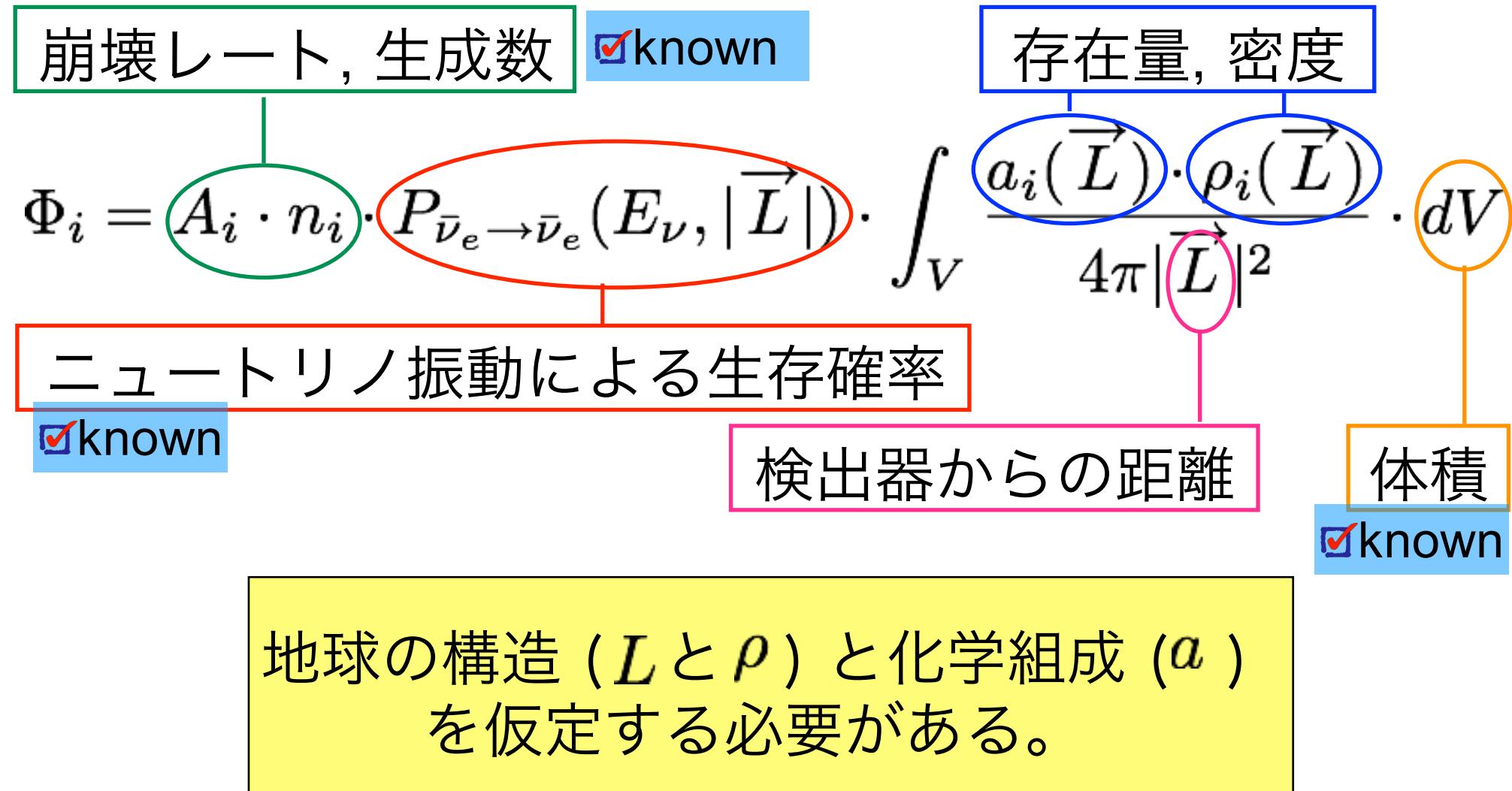
- シンチレーション光の量からニュートリノのエネルギーがわかる
- 素粒子物理：地球ニュートリノfluxの測定
- 地球科学：データから地球科学的知見を得る

▶ 神岡における地球ニュートリノフラックス

14/42



放射性物質(i : U,Th)



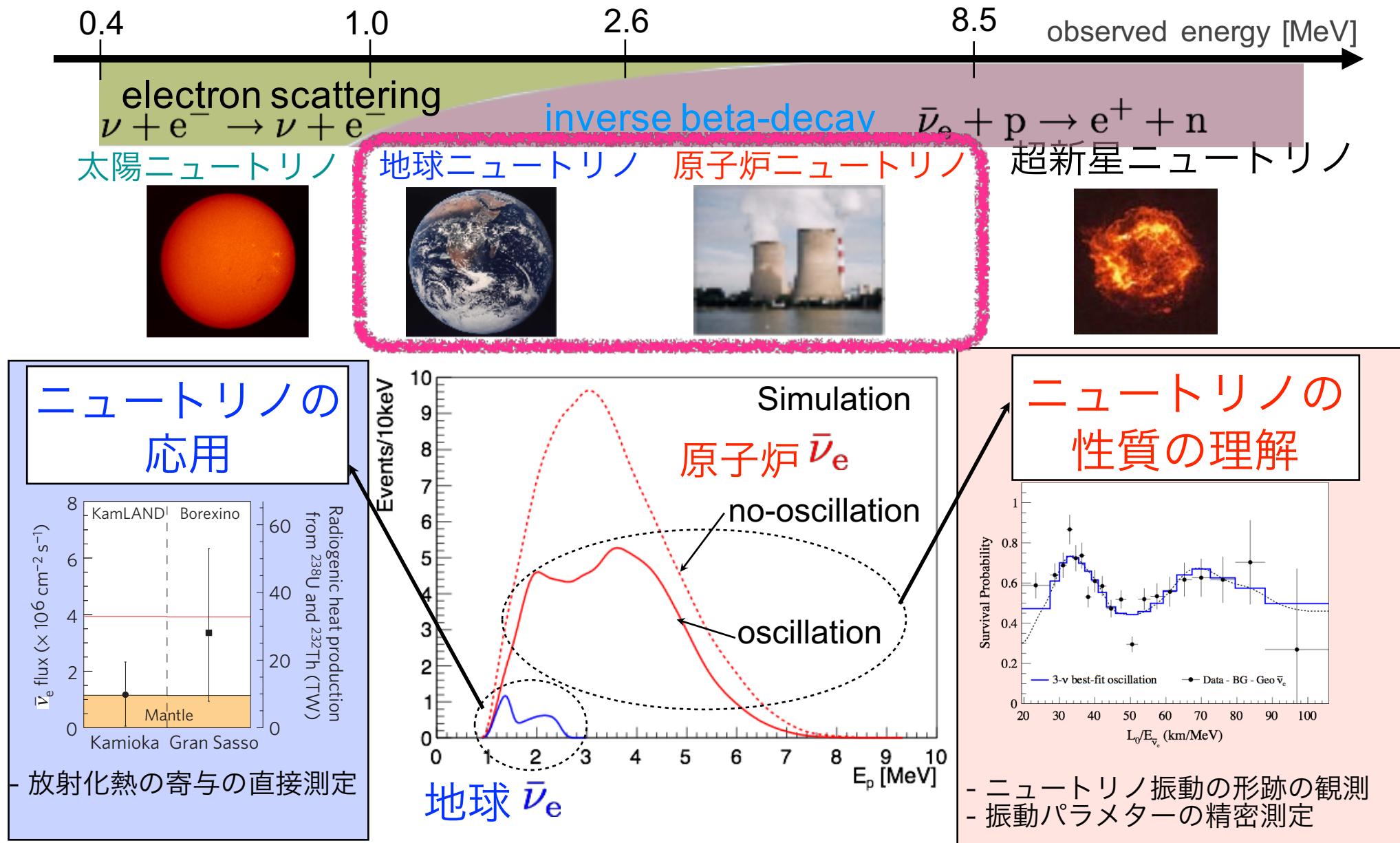
地球科学の知見が必須

Contents

1. イントロダクション
2. 観測意義
3. KamLAND実験
4. 最新観測結果
5. 将来展望
6. まとめ

►KamLANDにおける反ニュートリノ観測

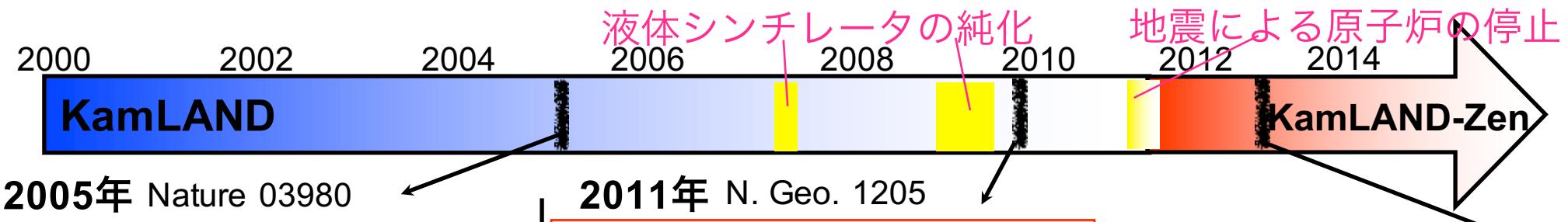
15/42



☑ ニュートリノを物事を調べる手段として利用することを開拓

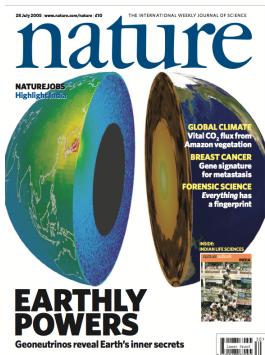
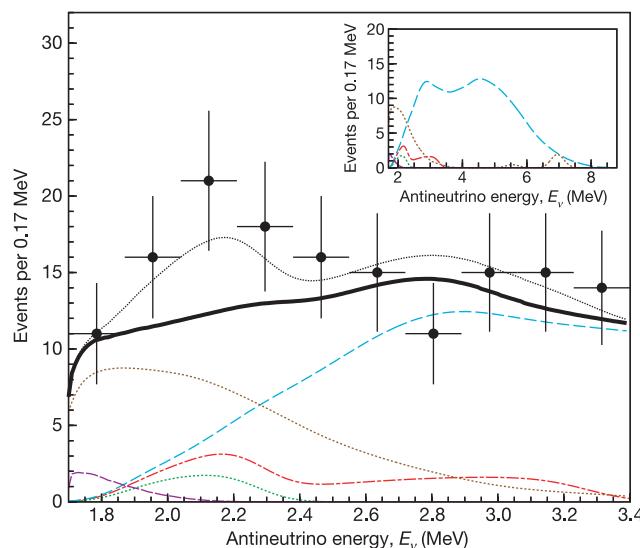
►KamLANDにおける地球ニュートリノ観測

16/42



2005年 Nature 03980

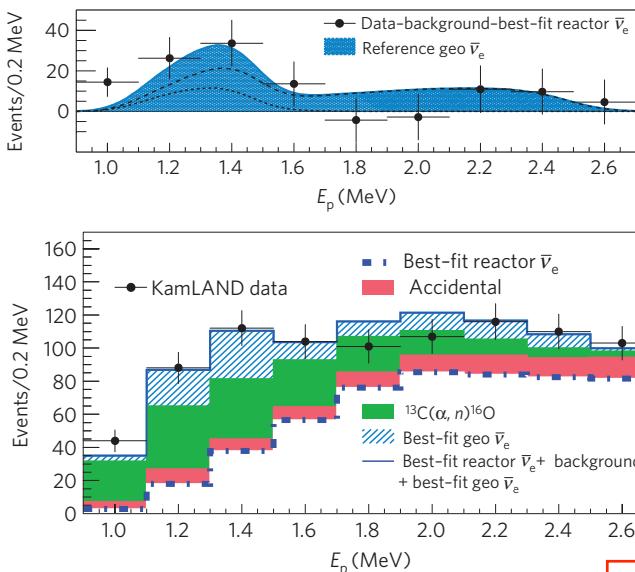
地球ニュートリノ
世界初観測



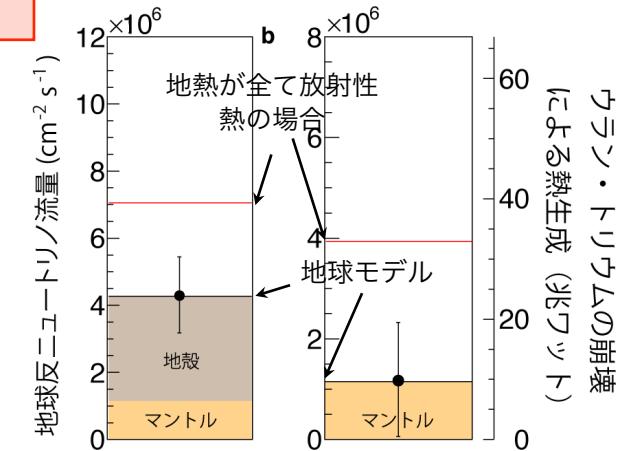
749 days
 0.71×10^{32} proton-year
 観測事象
 $28.0^{+15.6}_{-14.6}$ ev
 (56% error)

2011年 N. Geo. 1205

地球の放射化熱を直接測定



2135 days
 3.49×10^{32} proton-year
 観測事象
 106^{+29}_{-28} ev
 (27% error)



地球の放射化熱
 21 ± 9 TW

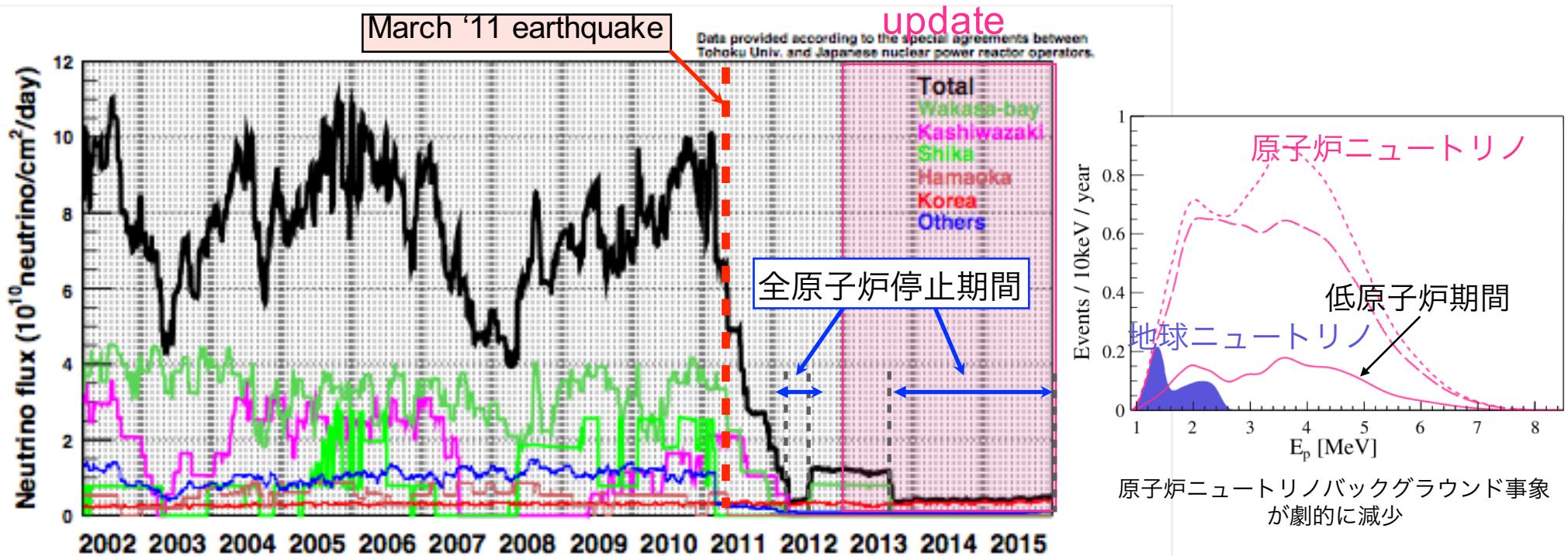
2013年 Phys Rev D 88:033001.

原子炉停止期間を含む解析
 2991 days
 4.90×10^{32} proton-year
 観測事象 116^{+28}_{-27} ev
 (24% error)

▶ 最新結果：データ状況

17/42

神岡における原子炉ニュートリノフラックスの時間変化



PRD 88, 033001 (2013)

2013 data-set : 2991 days
 4.90×10^{32} proton-year

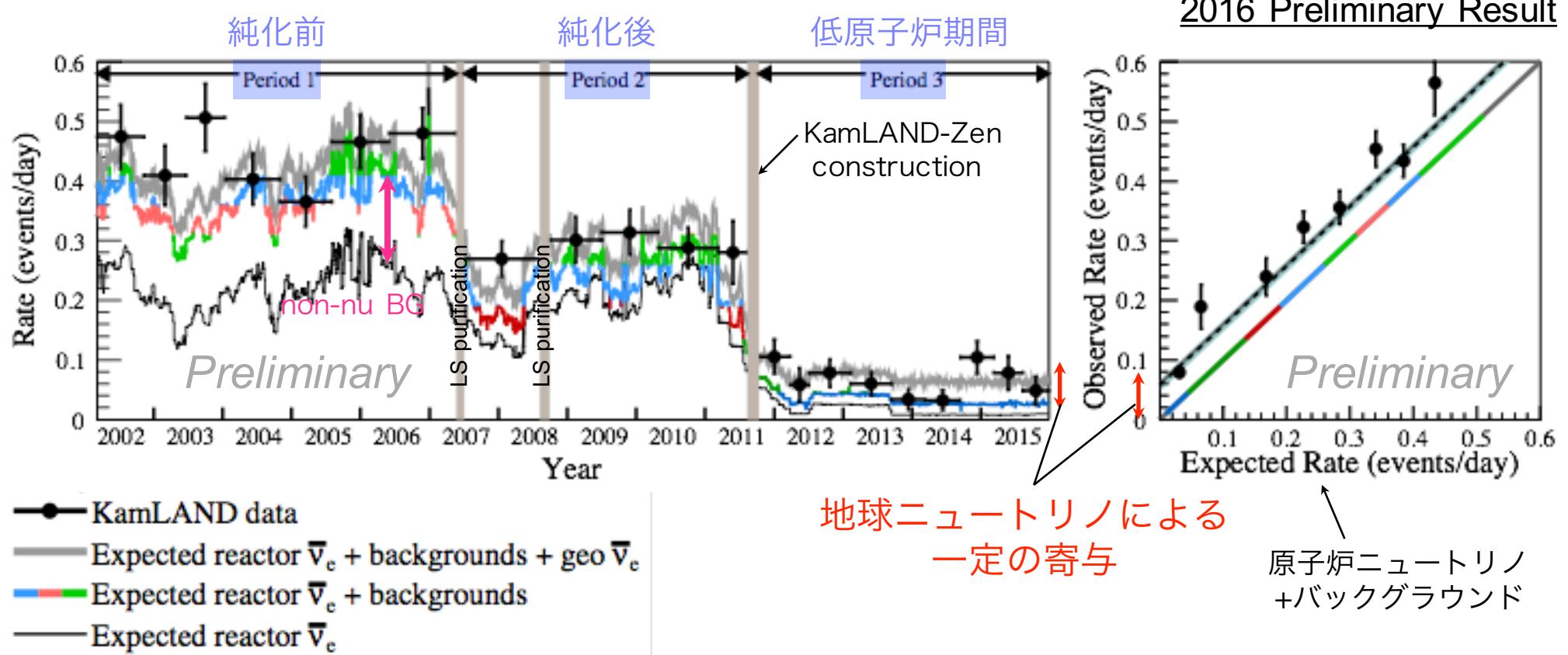
Preliminary

2016 data-set : 3901 days
 6.39×10^{32} proton-year

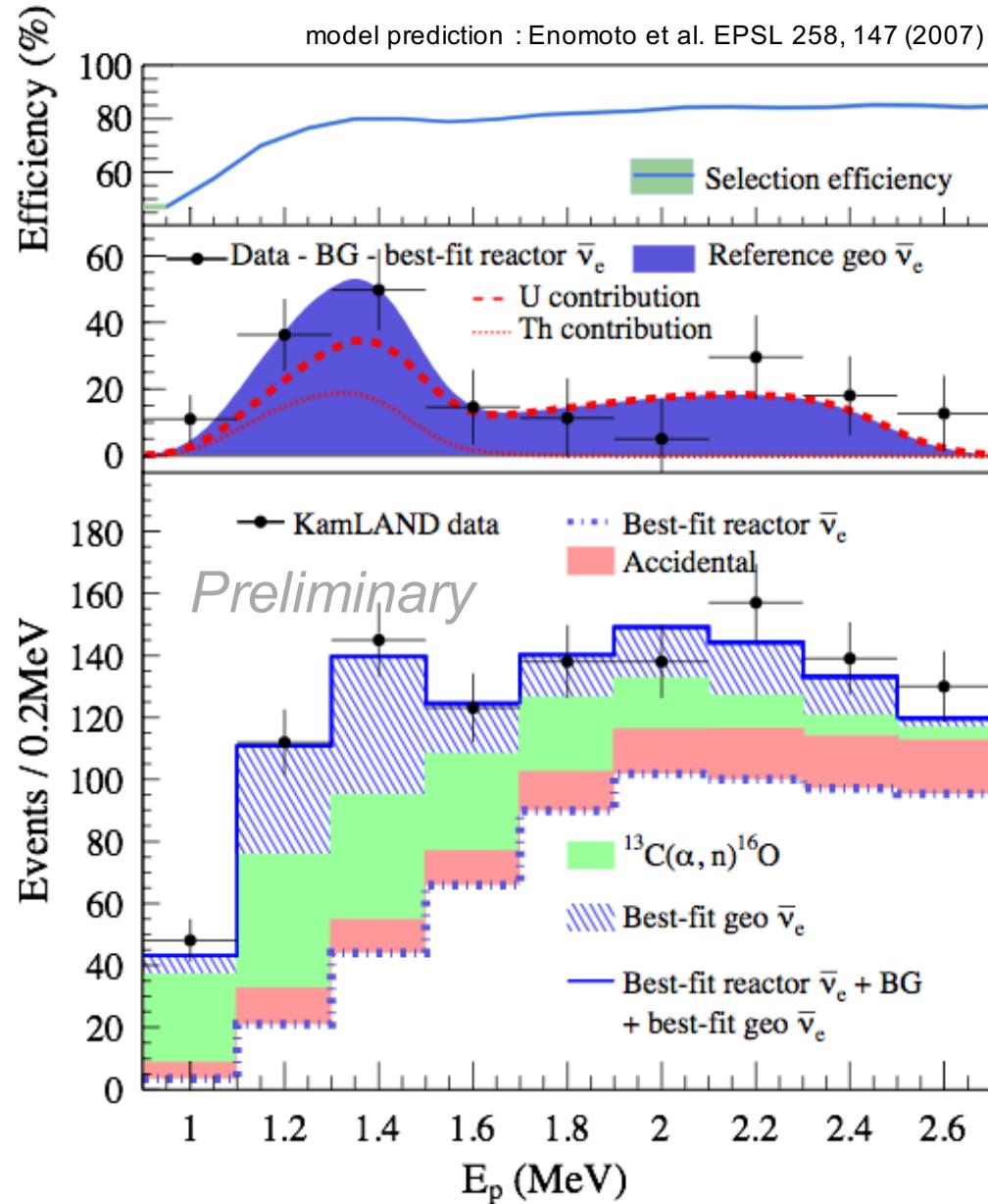
advantages

- 2013 data-set の1.3倍
- 低原子炉期間 : ~3.5 years livetime
- 日本の全原子炉停止期間 : ~2.0 years livetime

▶最新結果：イベントレート時間変化 (0.9-2.6 MeV) 18/42



- バックグラウンド
 - * non-nu バックグラウンド: 2007年以前に比べ約半分に減少
 - * 原子炉反ニュートリノバックグラウンド: 地震によって劇的に減少
- 地球ニュートリノによる一定の寄与
→ 地球ニュートリノ観測には時間情報が効果的



2016 Preliminary Result

Livetime : 3900.9 days

Candidate : 1130 ev

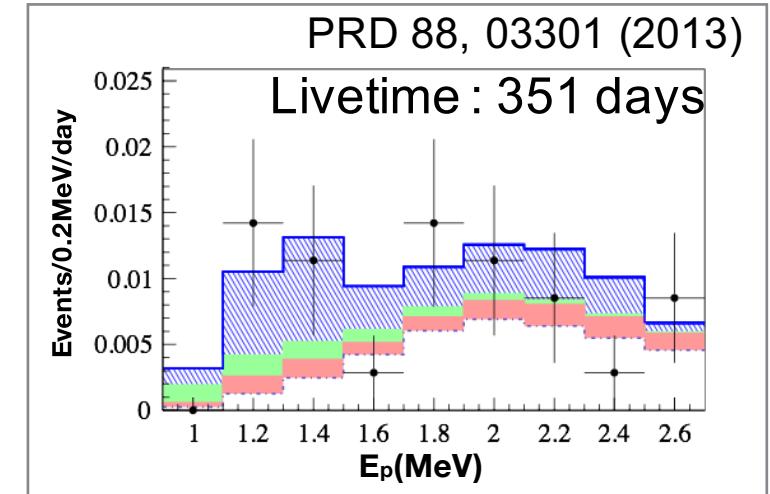
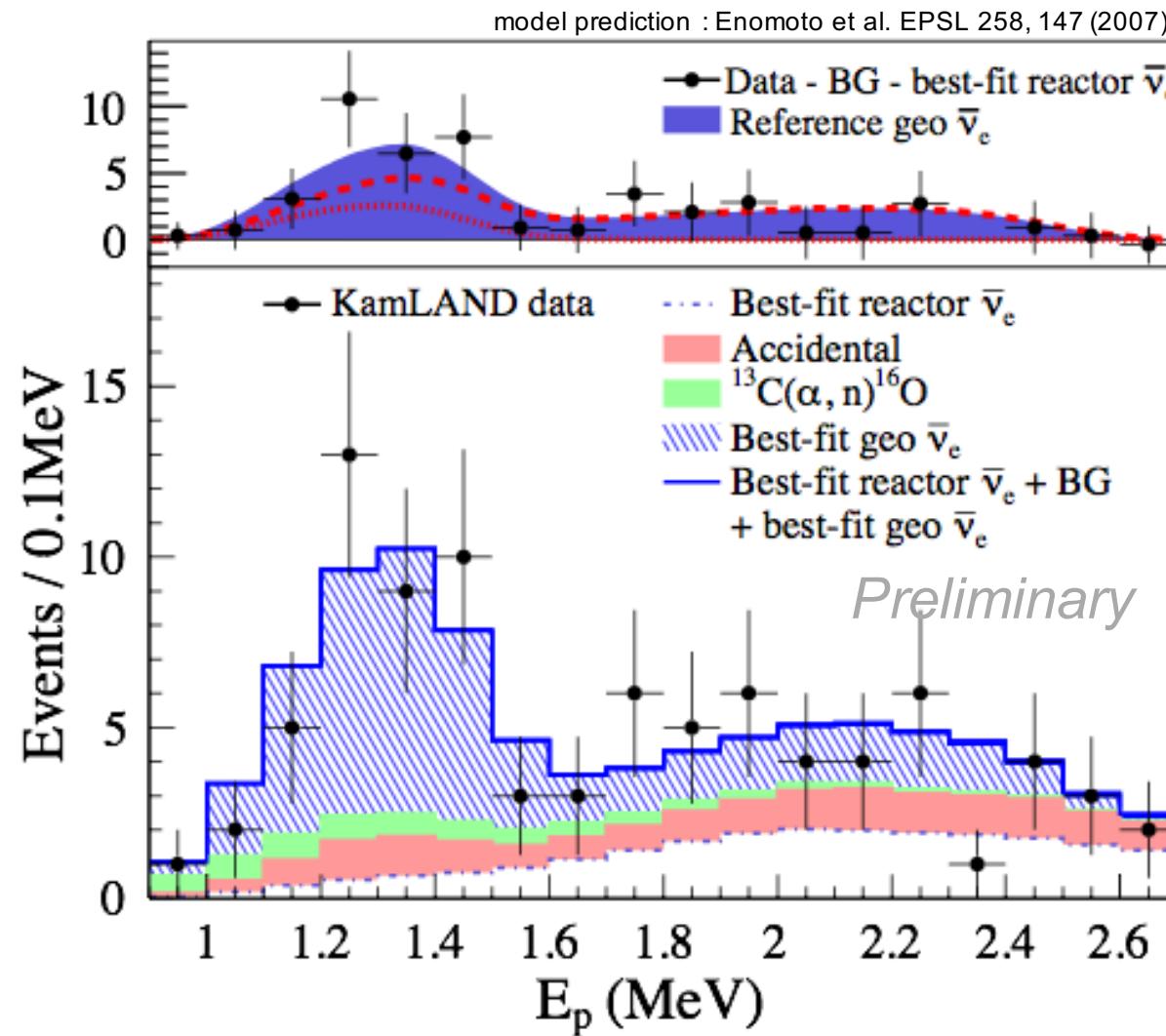
Background Summary

^9Li	3.4 ± 0.1
Accidental	114.0 ± 0.1
Fast neutron	< 4.0
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	205.5 ± 22.6
Reactor $\bar{\nu}_e$	618.9 ± 33.8
Total	941.8 ± 40.9

▶最新結果：Energy Spectrum, 低原子炉期間

20/42

Livetime : 1259.8 days 2016 Preliminary Result

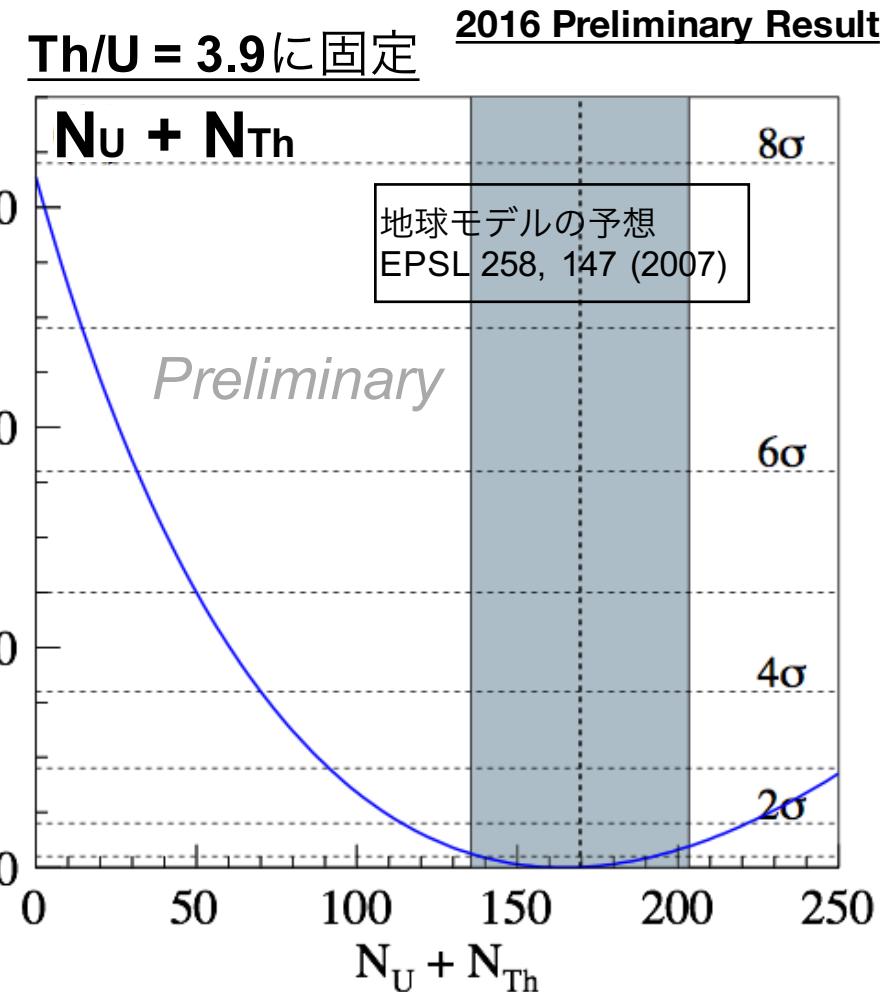
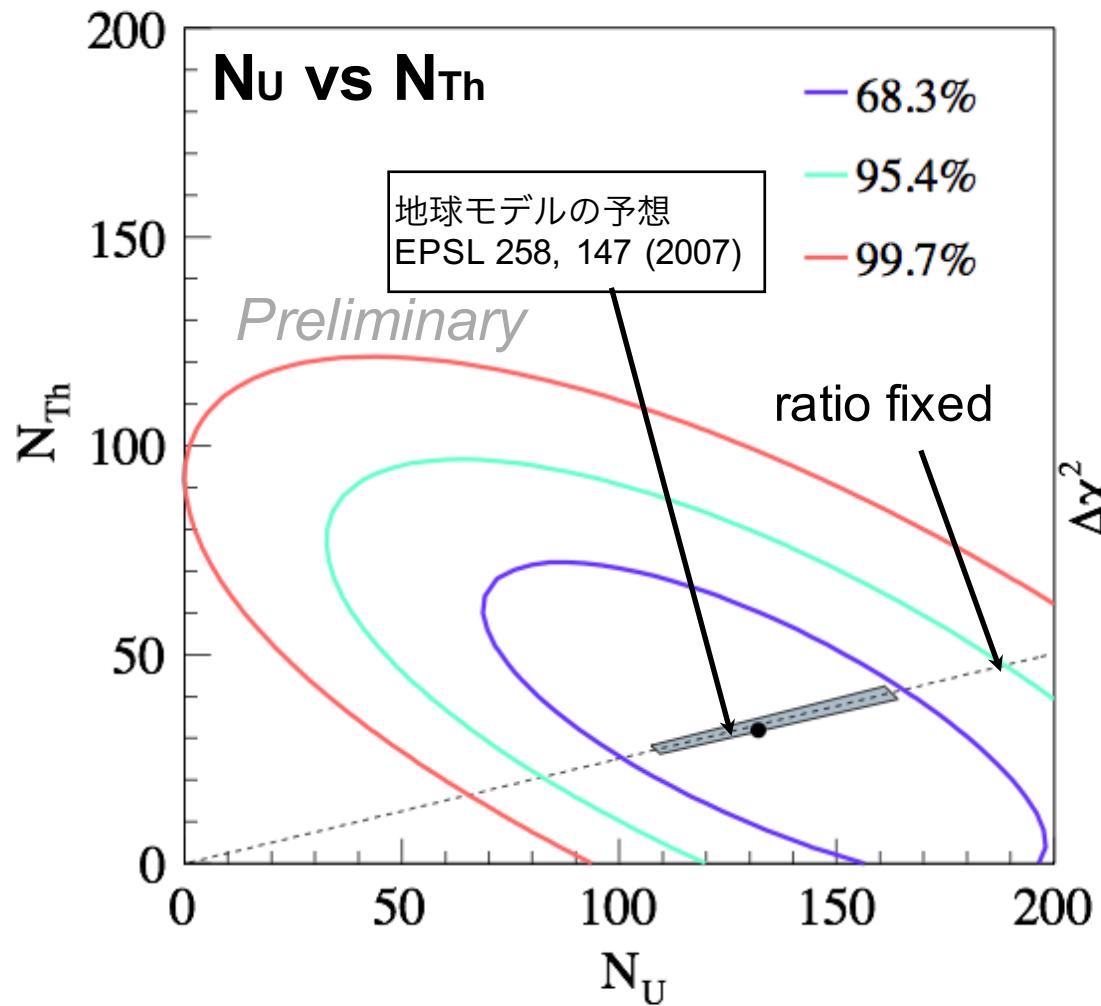


best-fit : Low-reactor phase analysis

- 地球ニュートリノ/バックグラウンド ~1.0
- 地球ニュートリノの明らかな寄与を測定

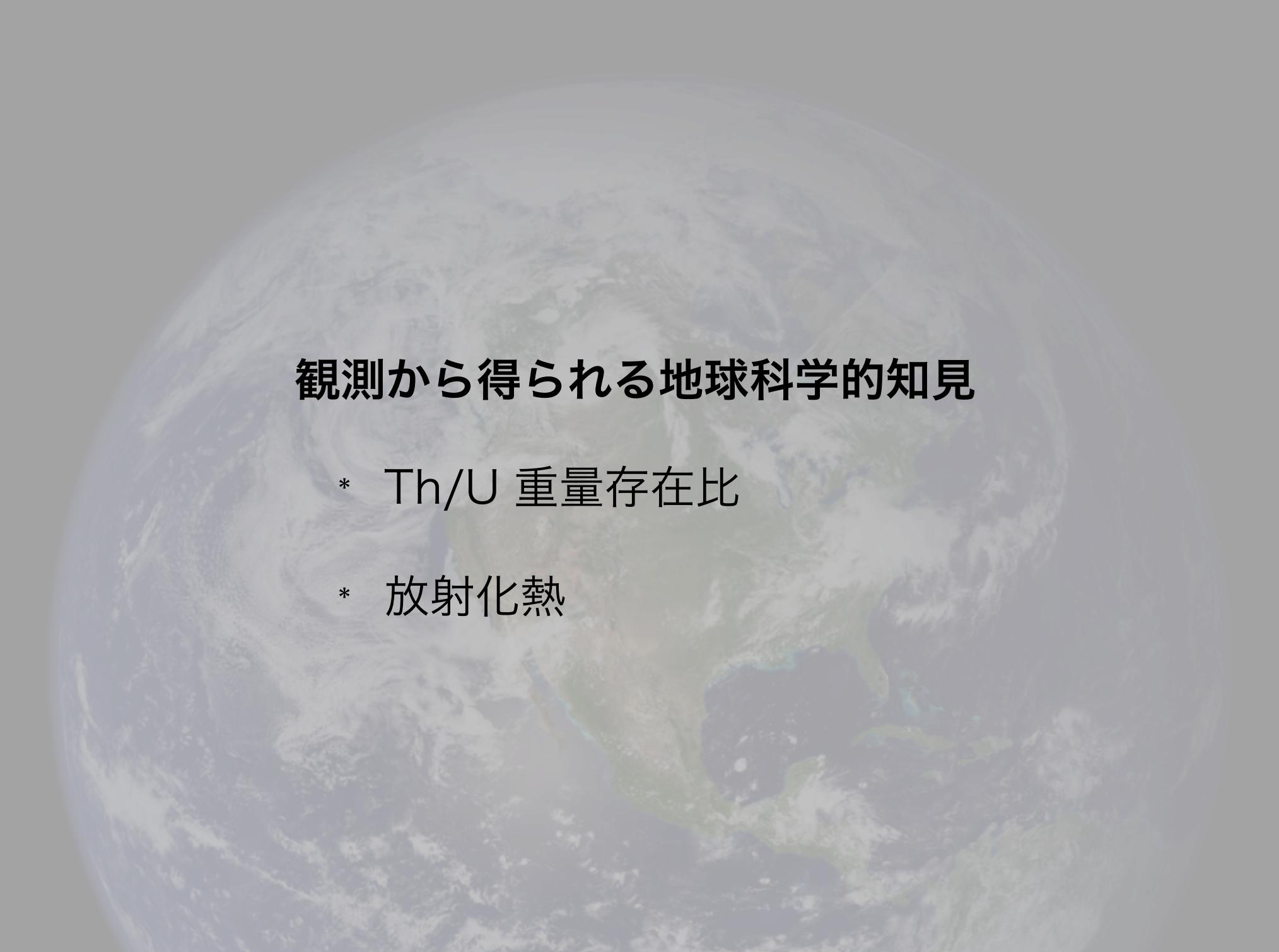
▶最新結果：地球ニュートリノイベント数解析

21/42



N_U + N_{Th} = 164^{+28}_{-25} events (uncertainty = 17%)

初めて地球モデルのエラー (20%) を下回る結果



観測から得られる地球科学的知見

- * Th/U 重量存在比
- * 放射化熱

▶最新結果：Th/U 重量存在比 (1)

22/42

- 地球化学の知見：地球内²³²Th は²³⁸Uより多く存在
- BSE (bulk silicate Earth) ModelにおけるTh/U：**約3.9**

隕石組成解析による地球全体の平均組成の推定。現代地球化学のパラダイム。

様々なモデル：3.58-4.2

4.2 : Allegre et al. (1986)

3.92 : McDonough & Sun (1995)

3.89 : Taylor (1980)

3.85 : Anderson (2007)

3.77 : Palm & O'Neil (2003)

3.76 : Hart & Zindler (1986)

3.71 : Lyubetskaya & Korenaga (2007)

3.62 : Jagoutz et al (1979)

3.58 : Javoy et al. (2010)

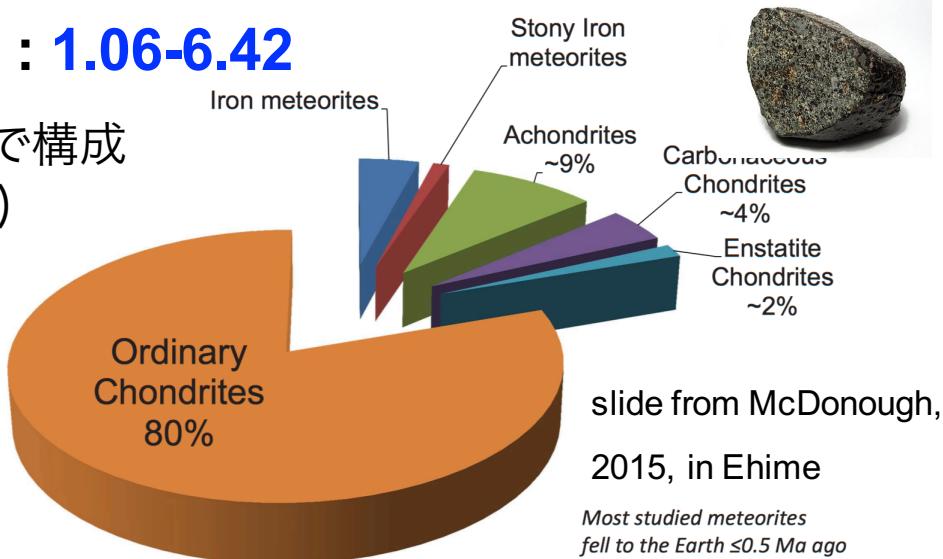
- コンドライト隕石の分析によるTh/U：**1.06-6.42**

惑星や衛星、小惑星、彗星の元となった物質で構成
980年以降に捕獲・分析された隕石 (1101個)

普通コンドライト (80%)

炭素質コンドライト (~4%)

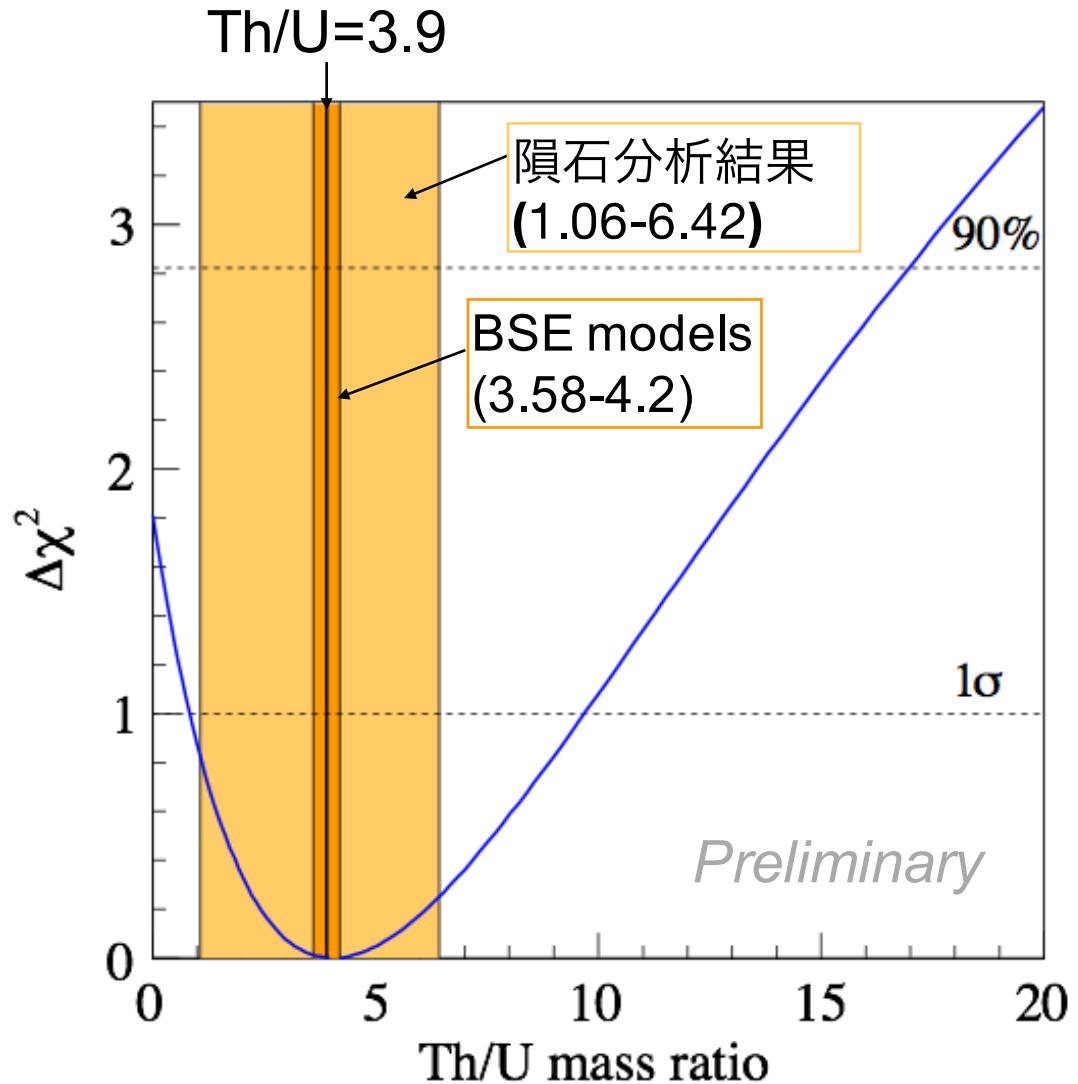
エンスタタイトコンドライト (~2%)



- 地球ニュートリノ観測数はTh/U重量存在比に焼き直すことができる。
(一様分布を仮定)
全地球の独立した直接測定

▶ 最新結果：Th/U 重量存在比 (2)

23/42



ref) 隕石分析結果

Ordinary Chondrites : J. S. Goreva & D. S. Burnett, Meteoritics & Planetary Science 36, 63-74 (2001)

Carbonaceous Chondrites : A. Rocholl & K. P. Jochum, EPSL 117, 265-278 (1993)

Enstatite Chondrites : M. Javoy & E. Kaminski, EPSL 407, 1-8 (2014)

2016 Preliminary Result

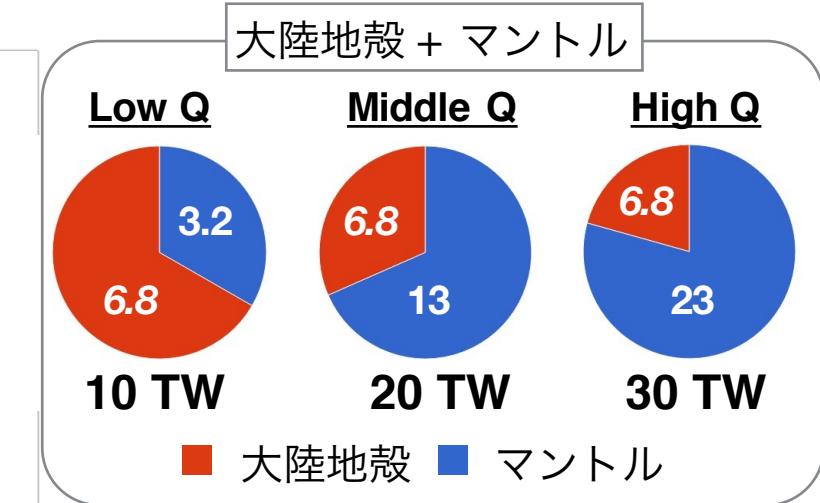
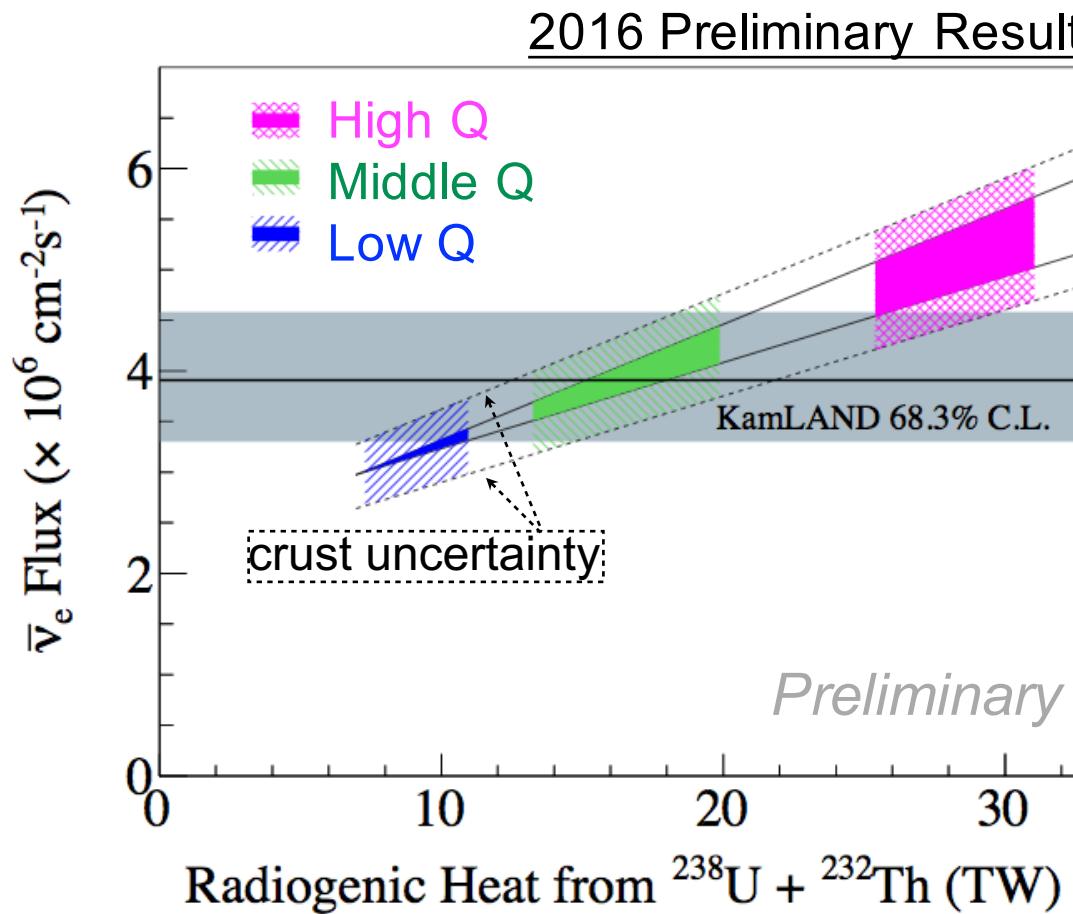
Best fit

$$\text{Th/U} = 4.1^{+5.5}_{-3.3}$$

$$\text{Th/U} < 17.0 \text{ (90% C.L.)}$$

ref) 2013 paper Th/U < 19 (90% C.L.)

- Th/U に感度を持つことを示す
- 観測結果は隕石分析結果、BSE Model予想のどちらとも矛盾しない



[BSE models]

High Q (地球ダイナミクスモデル)
based on balancing mantle viscosity and heat dissipation

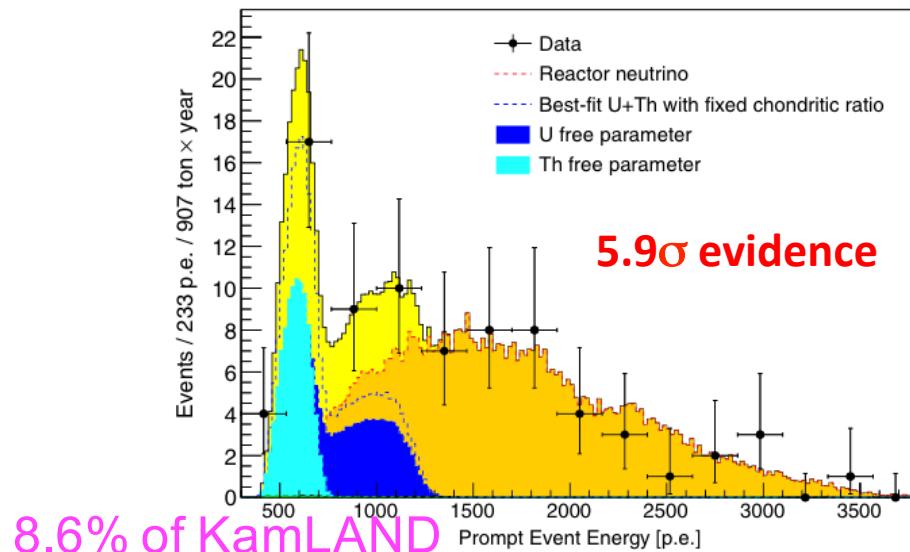
Middle Q (地球化学モデル)
based on mantle samples compared with chondrites

Low Q (宇宙化学モデル)
based on isotope constraints and chondritic models

- 放射化熱 : $15.5^{+6.5}_{-6.3}$ TW
- Low Q, High Q Modelが排除され始めた

Latest Borexino geoneutrino results

PRD 92, 031101(2015)



8.6% of KamLAND

Period	Dec.07 – Mar15 $(5.5 \pm 0.3) 10^{31} \text{ prot}^* \text{y}$
Tot ev [full sp.]	77
Reactors ev.	$52.7_{-7.7}^{+8.5} (\text{stat})_{-0.9}^{+0.7} (\text{sys})$
Background ev.	$0.78_{-0.10}^{+0.13}$
Geo- ν ev.	$23.7_{-5.7}^{+6.5} (\text{stat})_{-0.6}^{+0.9} (\text{sys})$
Geo- ν signal (TNU)	$43.5_{-10.4}^{+11.8} (\text{stat})_{-2.4}^{+2.7} (\text{sys})$

Two types of fits:

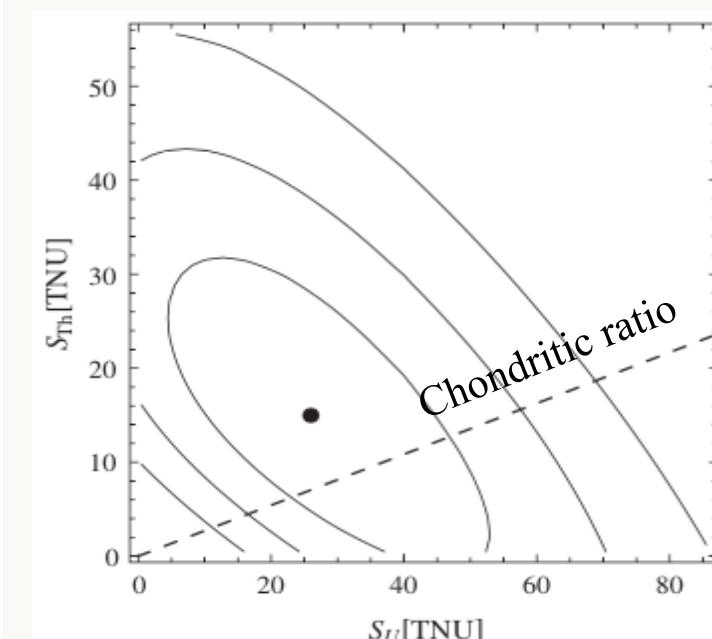
1) $m(^{232}\text{Th})/m(^{238}\text{U}) = 3.9$ (CI chondrites)

$$S(^{232}\text{Th})/S(^{238}\text{U}) = 0.27$$

$$S(^{238}\text{U})/S(^{232}\text{Th}) = 3.7 \quad \sim 28\% \text{ error}$$

$$N_{\text{geo}} = 23.7^{+6.5}_{-5.7} (\text{stat})^{+0.9}_{-0.6} (\text{sys}) \text{ events}$$

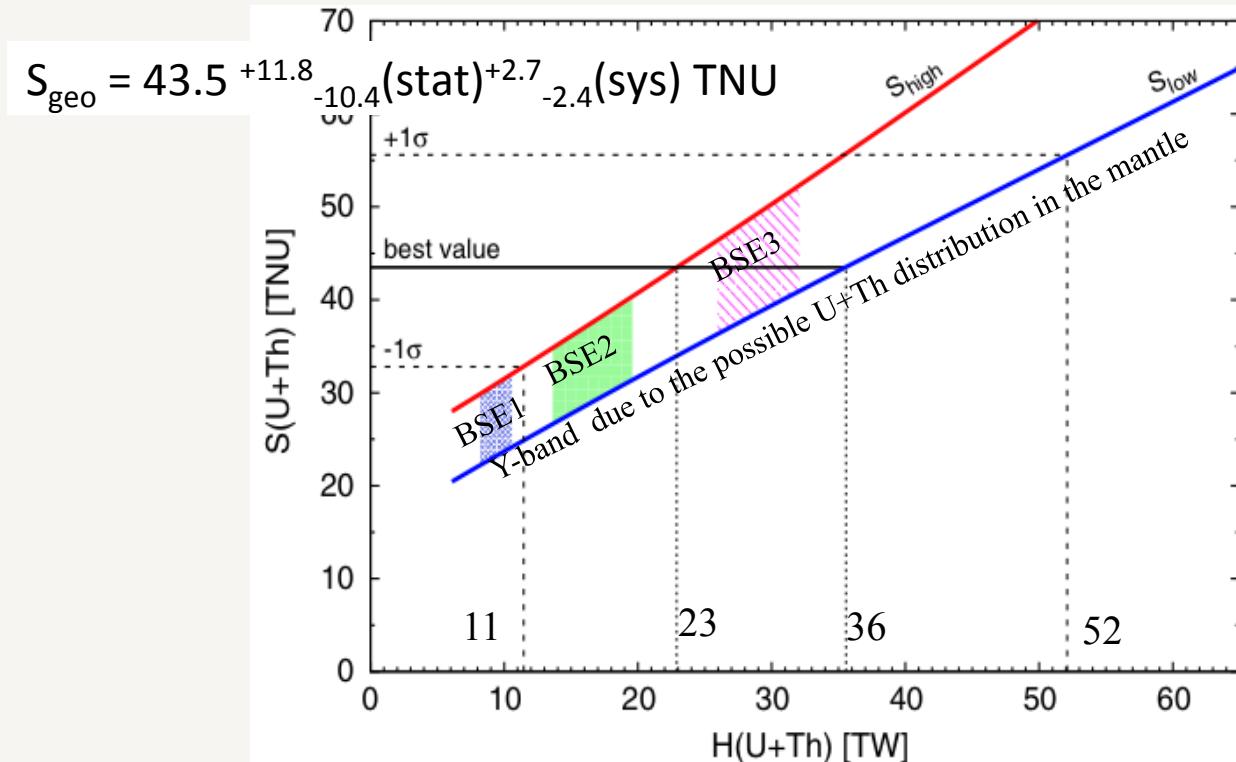
$$S_{\text{geo}} = 43.5^{+11.8}_{-10.4} (\text{stat})^{+2.7}_{-2.4} (\text{sys}) \text{ TNU}$$

2) *U and Th free fit parameters*

Geological implications of the new Borexino results

Radiogenic heat

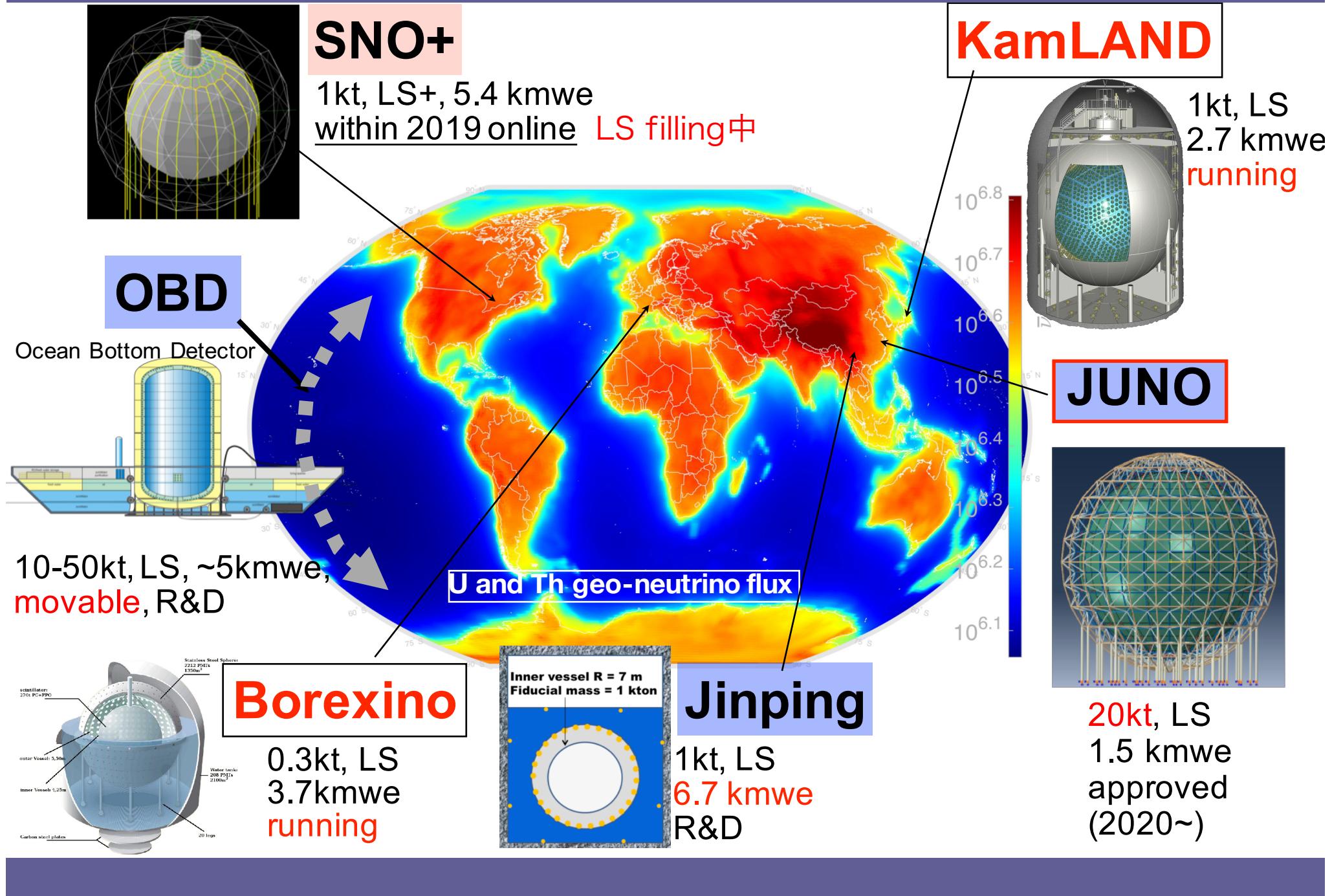
PRD 92, 031101(2015)

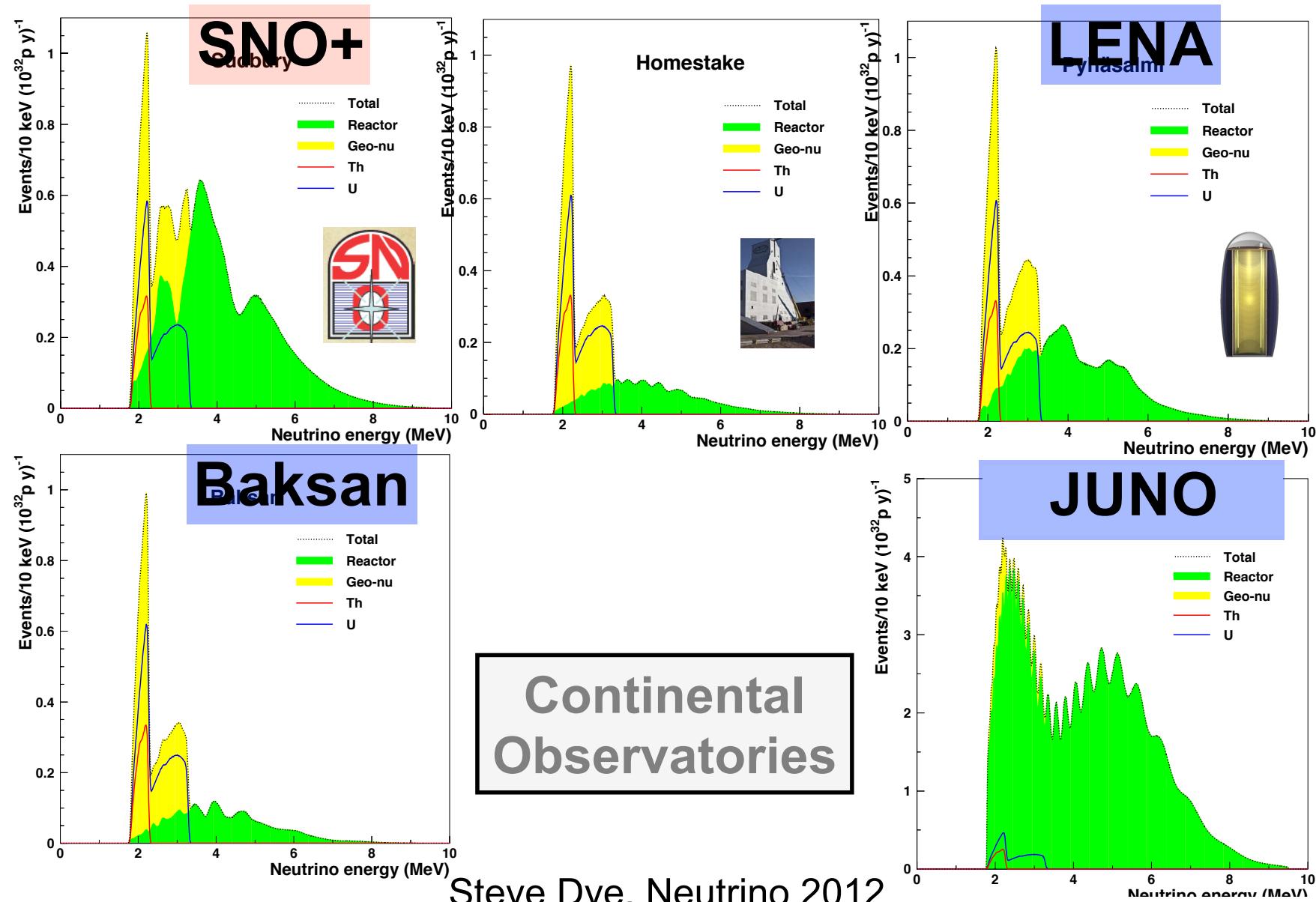


- Radiogenic heat (U+Th): 23-36 TW for the best fit and 11-52 TW for 1σ range
- Considering chondritic mass ratio Th/U=3.9 and K/U = 10^4 : Radiogenic heat
 $(U + Th + K) = 33^{+28}_{-20} \text{ TW}$
to be compared with $47 \pm 2 \text{ TW}$ of the total Earth surface heat flux (including all sources)

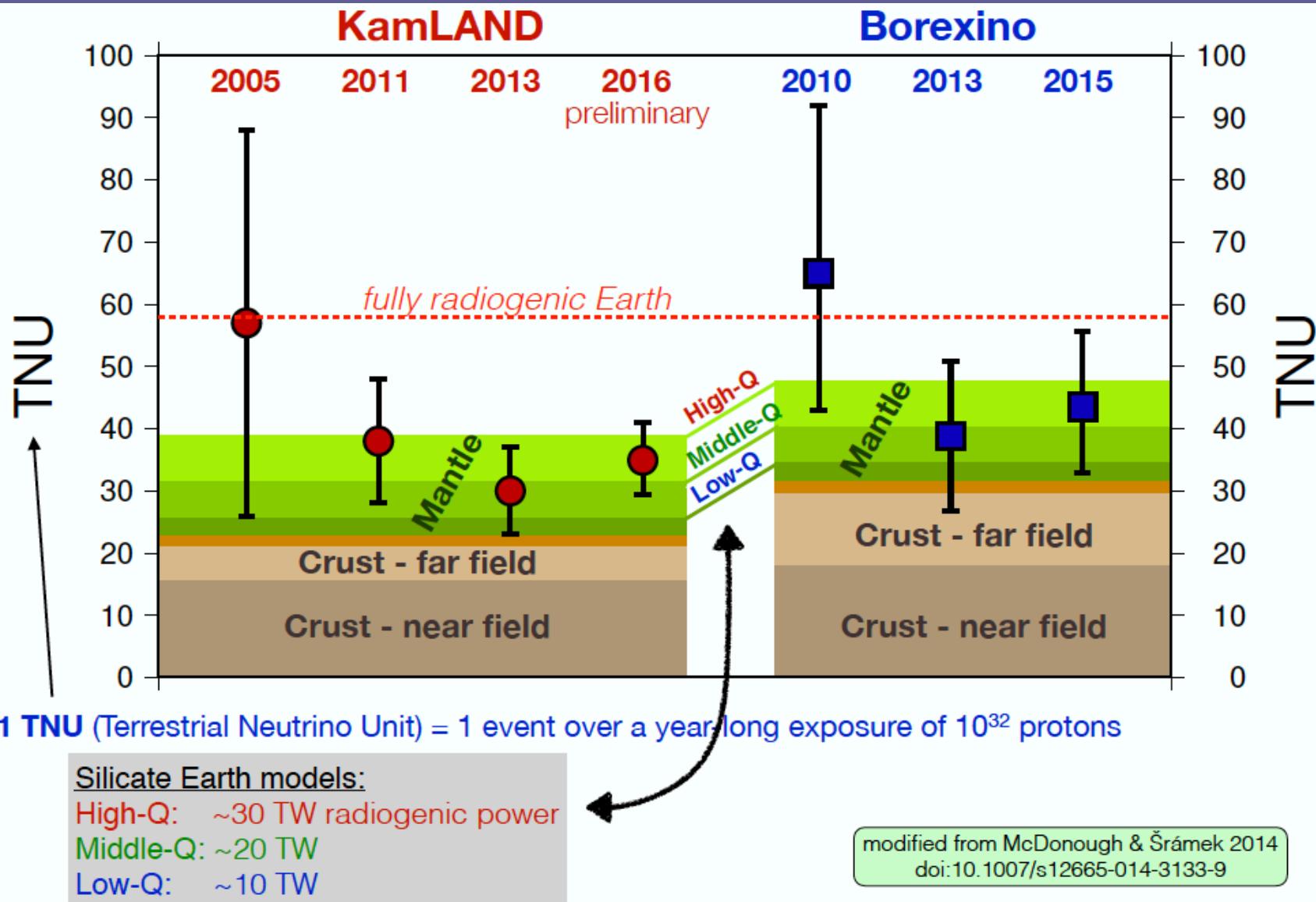
Contents

1. イントロダクション
2. 観測意義
3. KamLAND実験
4. 最新観測結果
5. 将来展望
6. まとめ





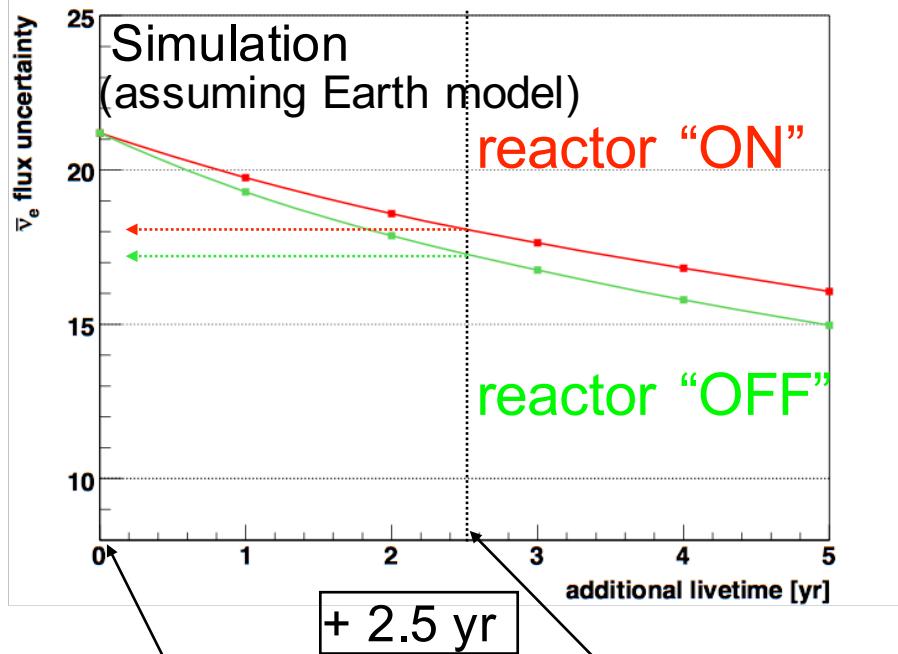
多地点観測によって地殻の種類毎の特徴を抽出→地球化学進化の理解



地球ニュートリノ観測

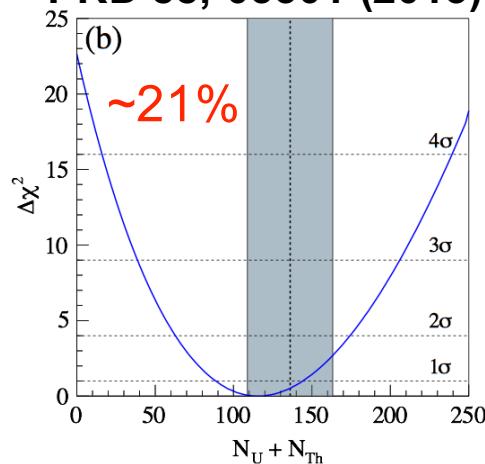
- 合計の放射化熱を与える
- BSE Modelのテスト

地球ニュートリノフラックス観測エラーの時間変化

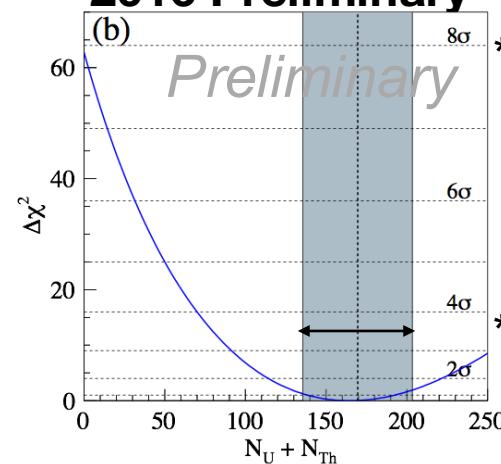


- 地球ニュートリノ観測のエラーの改善は予想と一致
- 観測のエラーはモデルのエラーを初めて下回った
- 地球モデルの改善、特に地殻モデルの改良が重要な課題

PRD 88, 03301 (2013)



2016 Preliminary



* best fit with $\pm 1\sigma$
 $3.9^{+0.7}_{-0.6} \times 10^6 / \text{cm}^2/\text{s}$: ~18%

* uncertainty of Earth model prediction : 20%

現在参照しているフラックスモデル(EPSL 258, 147(2007))

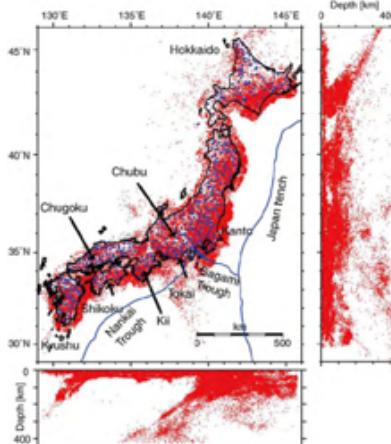
- 日本近郊のU, Th : 世界平均を適用 もっと少ない?
- 日本の局地性 : 不定性として考慮
- 地殻と堆積層の厚さ : 水平方向の解像度
約200kmのモデルを使用 もっと薄い?



地球科学者との共同研究

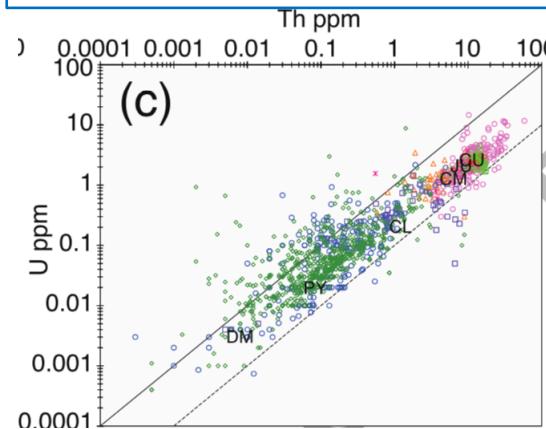
改善版フラックスモデル(PEPI 6222(2019))

* 日本近郊の地震波観測データから厚さを見積もる



- 日本全域を網羅
- 15年以上の地震波データ
- 高解像度: 水平5-10km, 垂直20km

* 日本国内の捕獲岩サンプルのU, Th濃度分析結果を使用



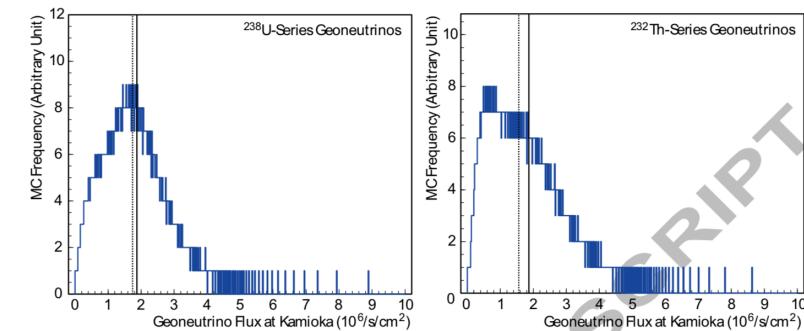
- 2200 サンプル
- 岩石タイプ毎の見積もりが可能に

日本近郊の平均

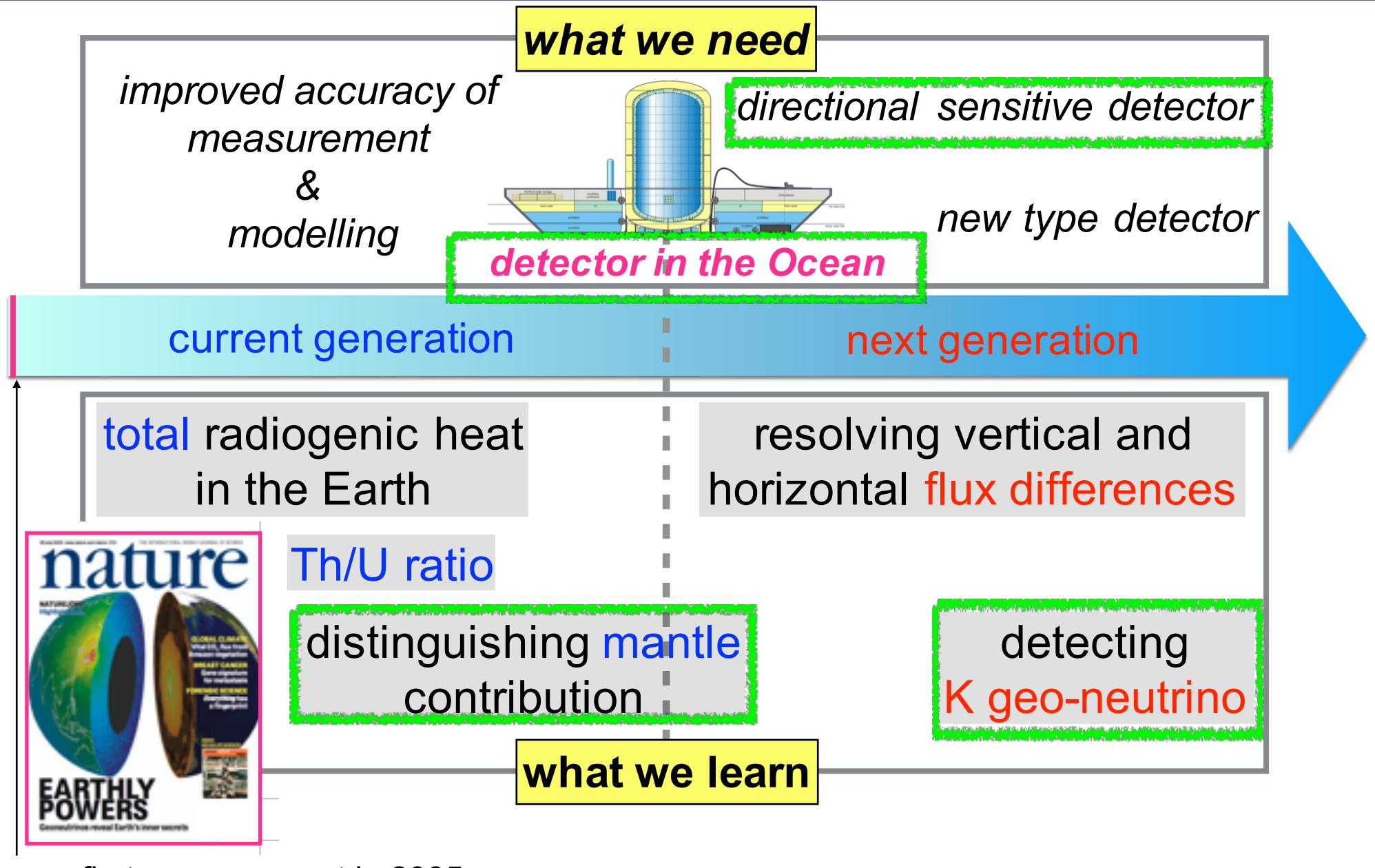
	U(ppm)	Th(ppm)
Togashi(2000)	2.32	8.3
Taylor & McLennan(1999)	2.8	10.7
Wedepohl(1995)	2.5	10.3

世界平均

* 地球ニュートリノフラックスをエラー付きで求める方法を開発



- 確率密度関数を使って機械的に
- 相関も考慮
- 現在は最大相関を仮定。今後地球科学の知見を使って相関度合いを見積もる。



►次の目標：マントルの寄与の観測

1. 観測値 - 地殻の寄与 = マントルの寄与

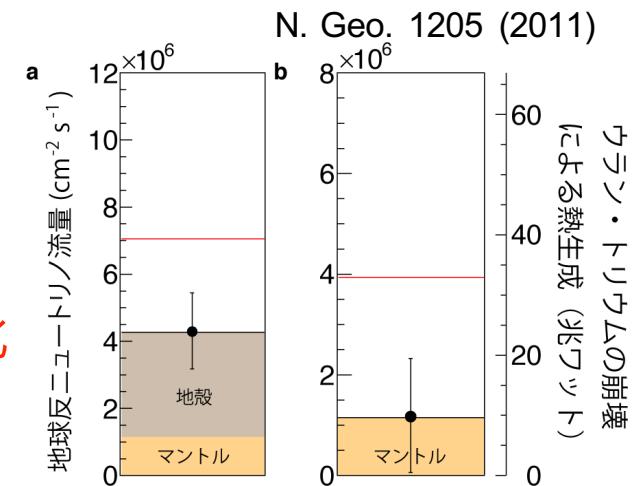
17% error
(2016, KamLAND)

20% error
不定性の見積もり方法が未確立

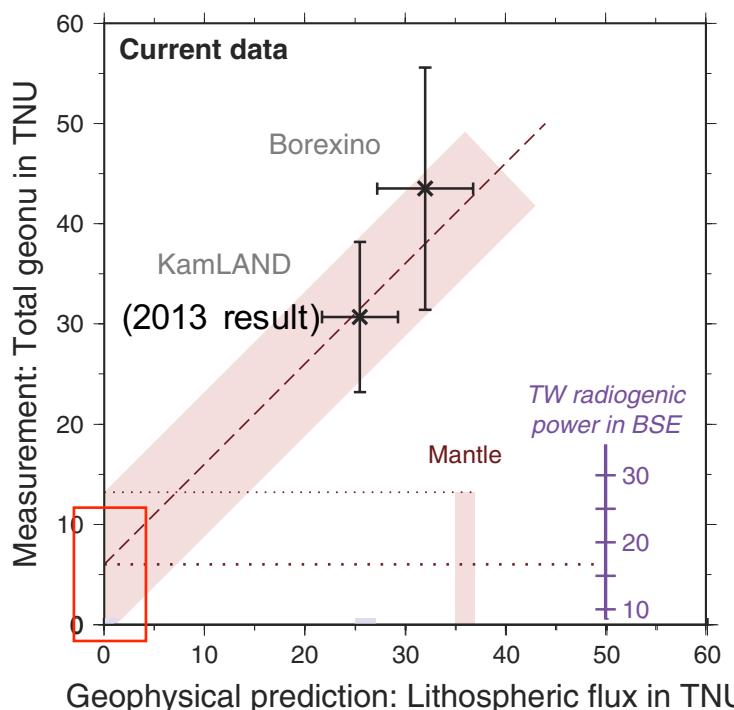
地球科学の知見を結集

- 地震波観測
- 地球化学 (岩石サンプル分析)
- 熱流量観測 etc

モデル計算の高信頼度化
・高精度化が必要

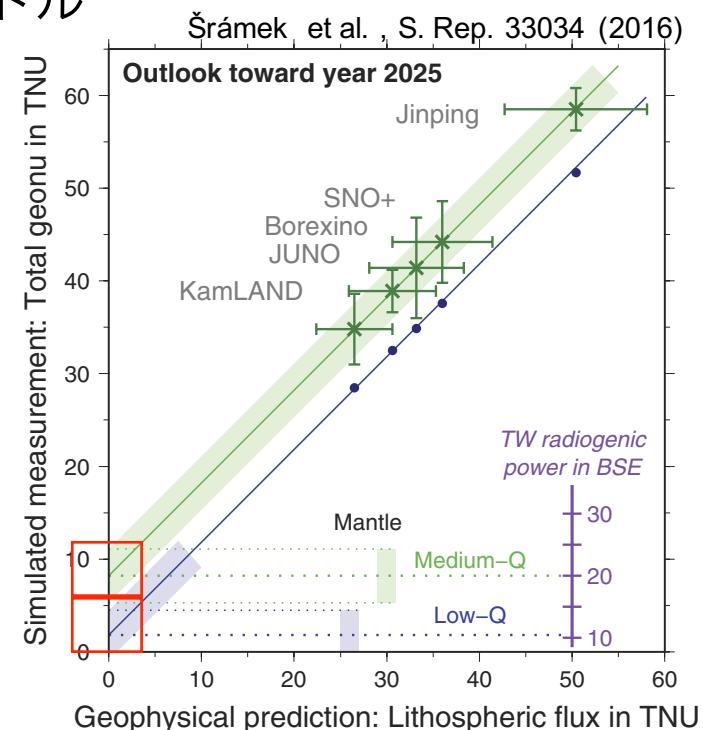


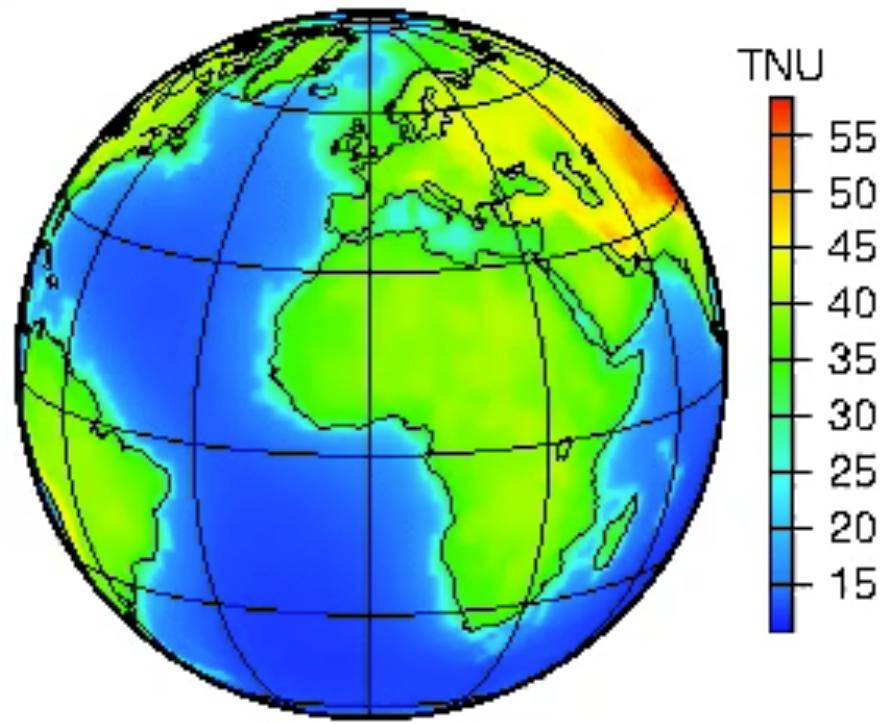
2. 多地点観測



$$\text{観測値} = \text{地殻} + \text{マントル} \\ (y = x + b)$$

+ 10年分データ
+ 新実験





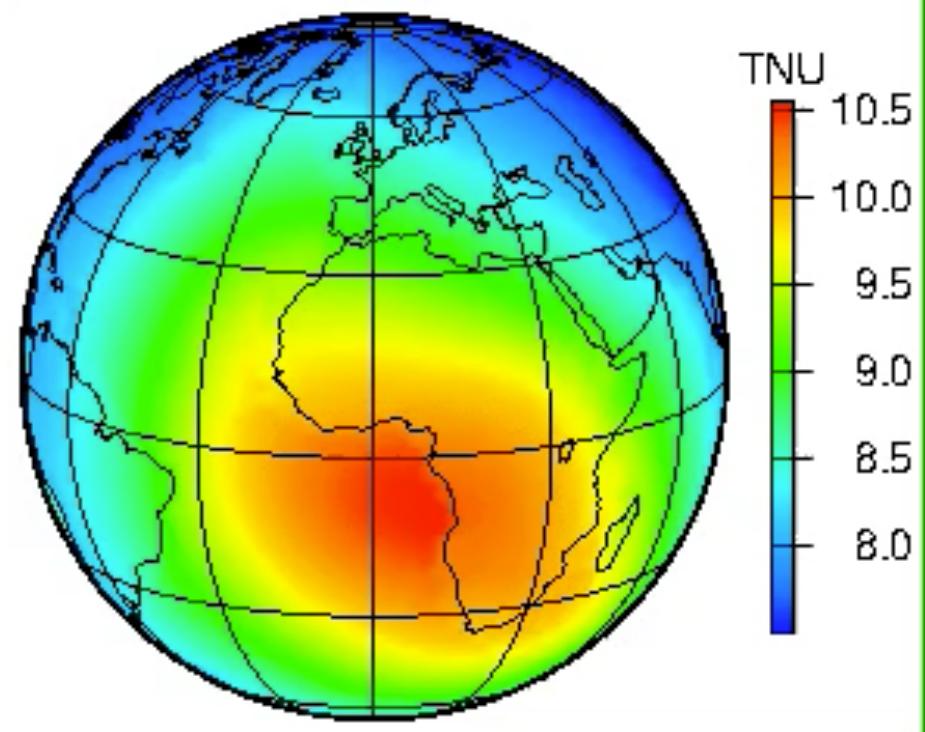
Yu Huang et al (2013) G-cubed [arXiv:1301.0365](https://arxiv.org/abs/1301.0365)

Mantle flux at the surface

dominated by deep mantle structures

Total flux at surface

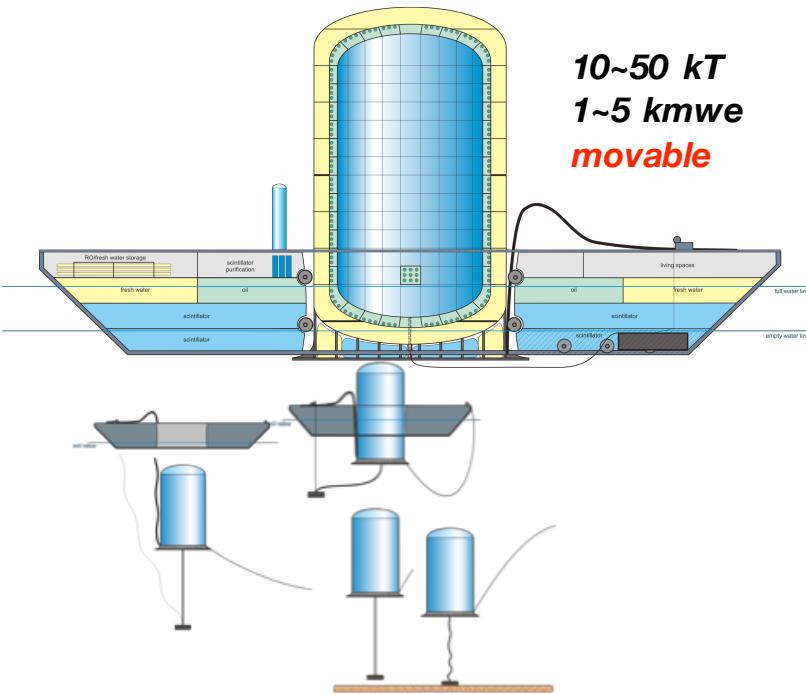
*dominated by
Continental crust*



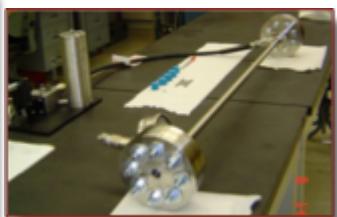
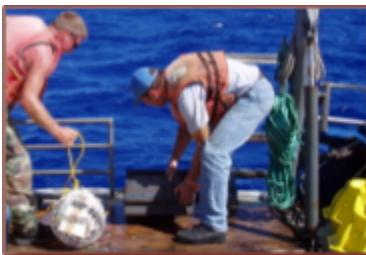
Šrámek et al (2013) EPSL [10.1016/j.epsl.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001); arXiv:1207.0853

▶海上移動実験 : Ocean Bottom Detector(OBD)

35/42

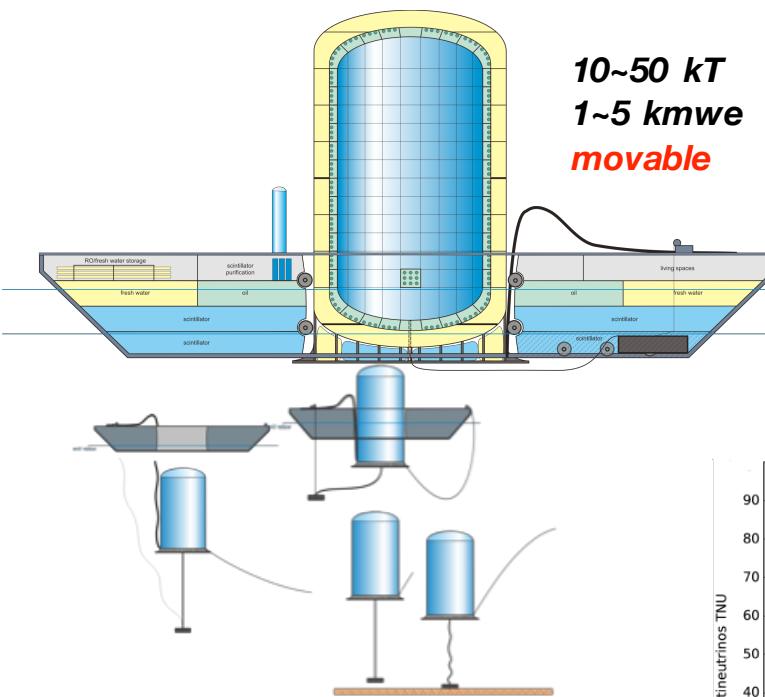


2005年 ハワイで基礎研究スタート

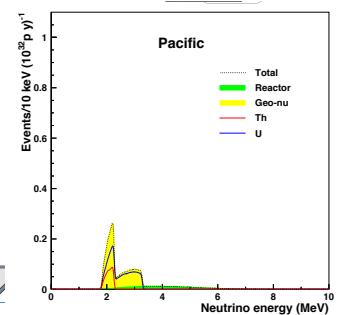
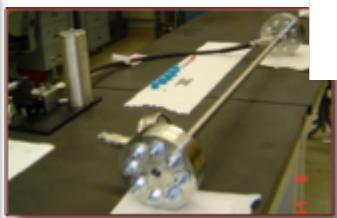


▶海上移動実験：Ocean Bottom Detector(OBD)

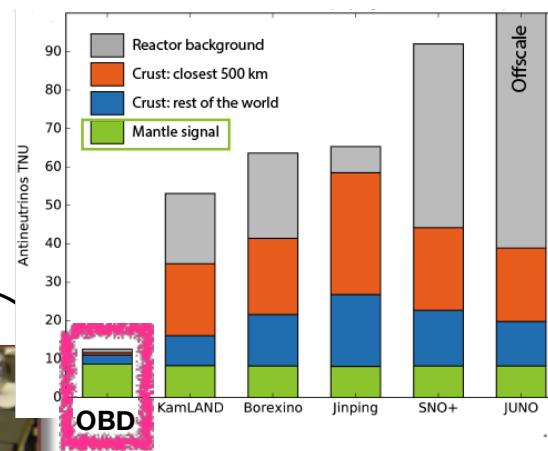
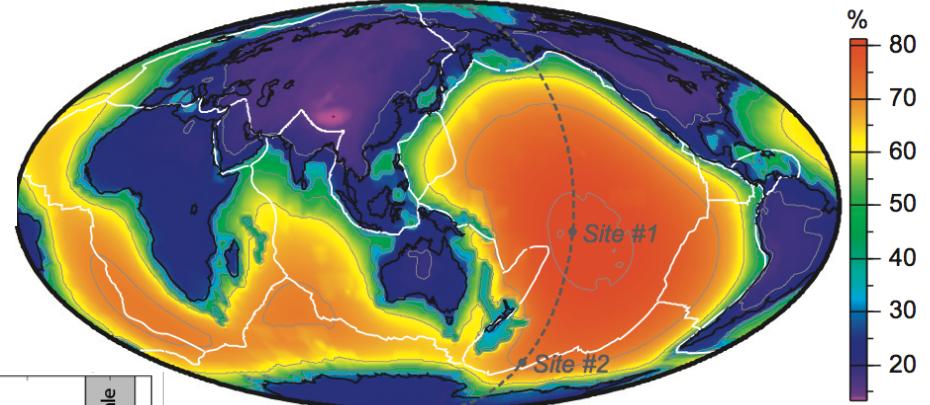
36/42



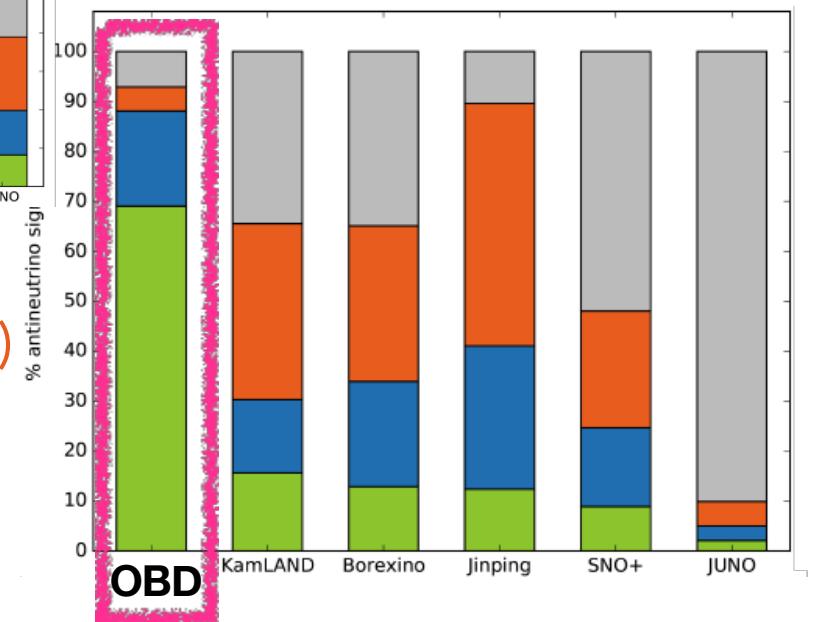
2005年 ハワイで基礎研究スタート



Šrámek et al (2013) EPS, [10.1016/j.epsl.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001)
Mantle / Total



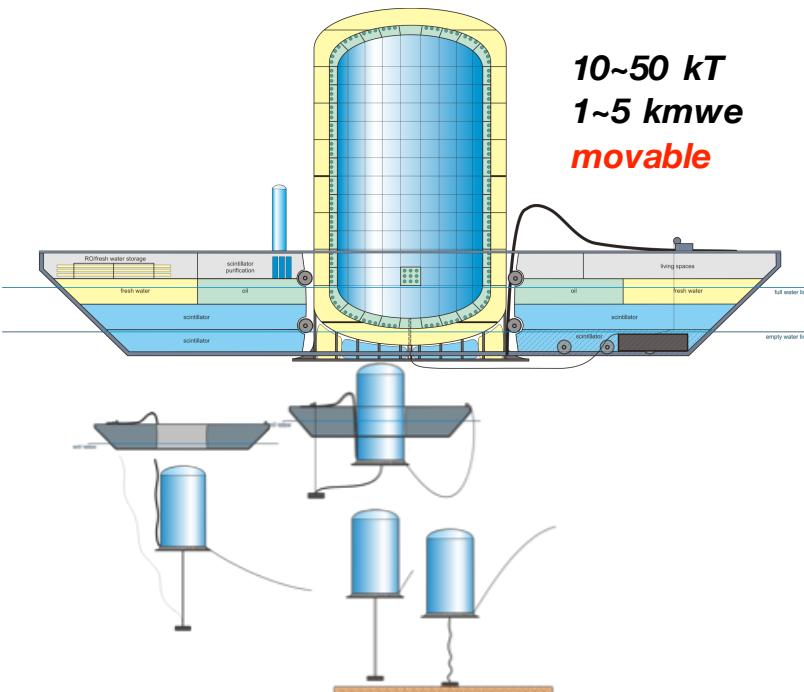
原子炉
地殻(<500km)
地殻(その他)
マントル



- マントルの寄与の直接測定
- 地球モデルのテスト
- 地球深部の様子をニュートリノで明らかに!

▶海上移動実験 : Ocean Bottom Detector(OBD)

36/42

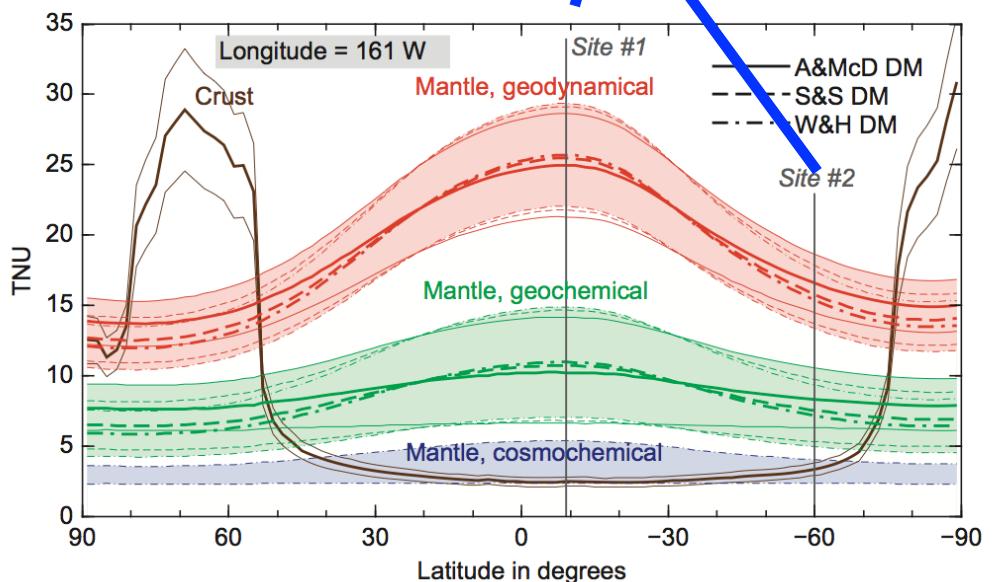
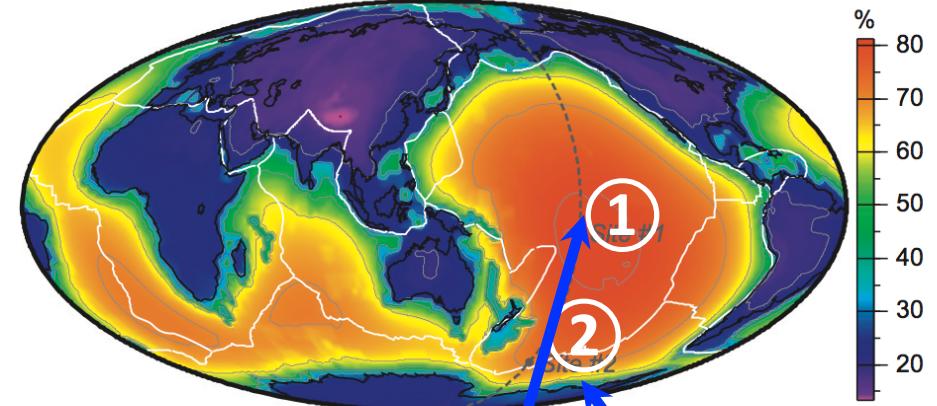


2005年 ハワイで基礎研究スタート



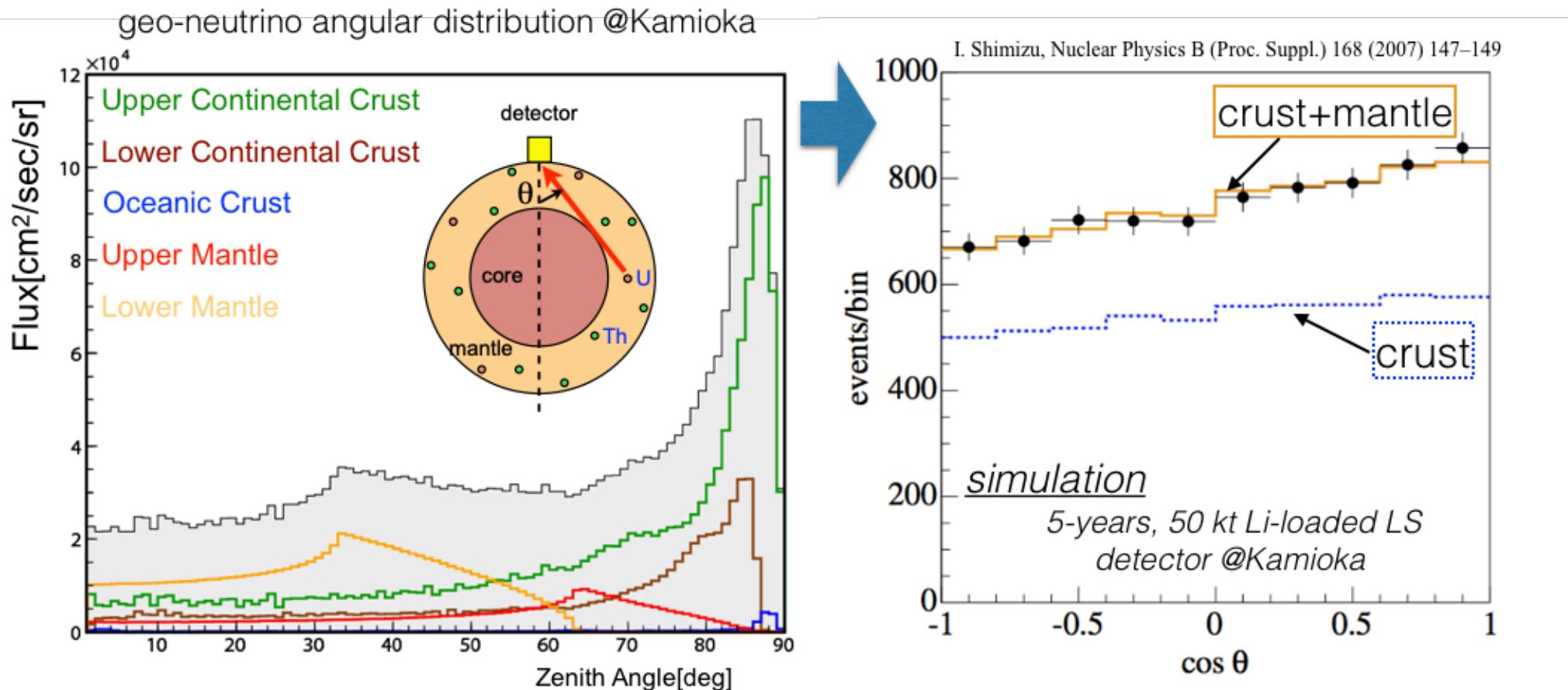
- マントルの寄与の直接測定
- 地球モデルのテスト
- 地球深部の様子をニュートリノで明らかに!

Šrámek et al (2013) EPS, [10.1016/j.epsl.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001)
Mantle / Total



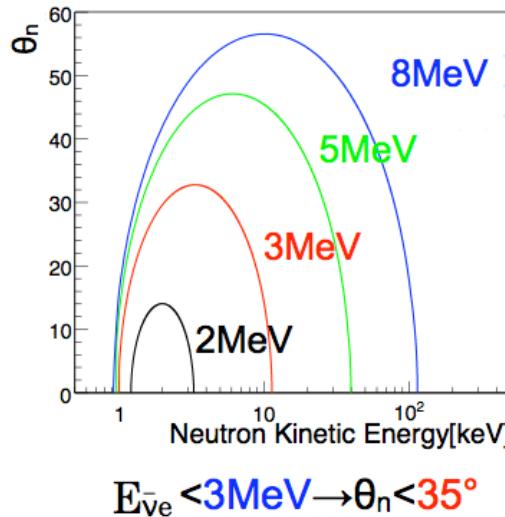
大型検出器 (1ton~)

1. マントルと地殻の成分を分離
2. 原子炉ニュートリノのバックグラウンドを分離 (原子炉の運転状況に依らない低バックグラウンド環境を実現)



▶到來方向検出：検出方法

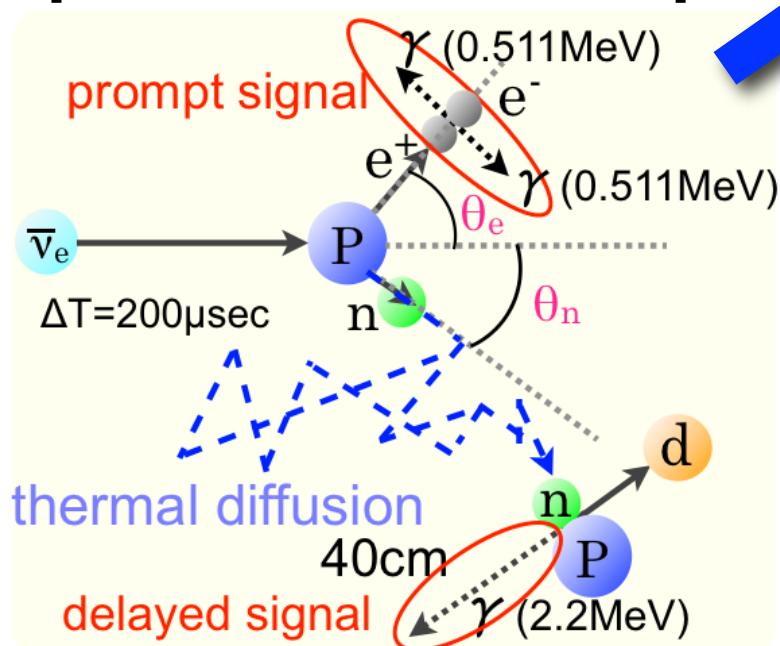
38/42



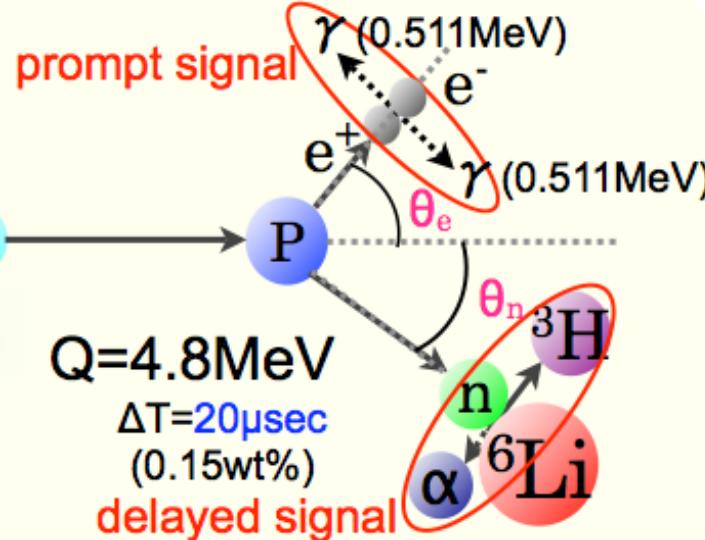
中性子は到来方向情報を持つ

$$E_{\bar{v}e} < 3 \text{ MeV} \rightarrow \theta_n < 35^\circ$$

[現在の液体シンチレーター]



[Li含有液体シンチレーター]

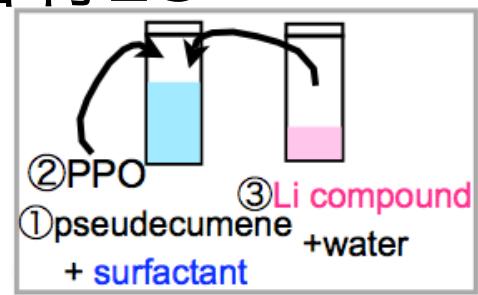


- 中性子捕獲断面積大
(${}^6\text{Li}$ 940 barns vs ${}^1\text{H}$ 0.3 barns)
- α 線は液体シンチレーター中をほとんど移動しない
- + 高位置分解能検出器
- 2cm以下の位置分解能 (PMT ~10cm)

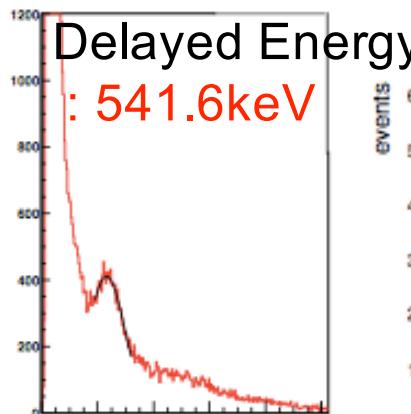
▶到來方向検出：開発状況

^6Li 含有LS

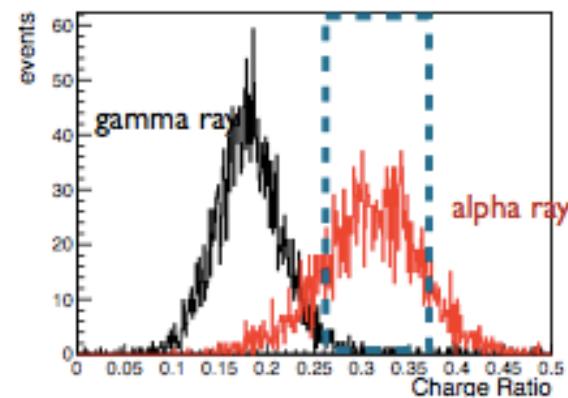
LiBr water
solution
+surfactant +P
C+PPO



- * We have developed ^6Li -LS by the original method
 - * enough quality for small size detector
 - * confirm > 2.5 years stability
- * ^6Li neutron capture measurement



Charge Ratio

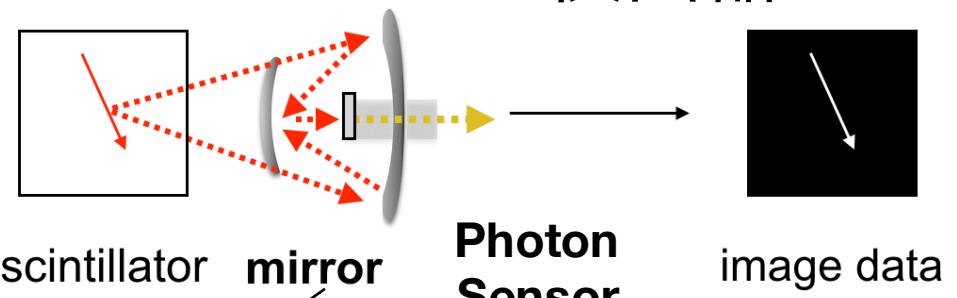


PSD quality

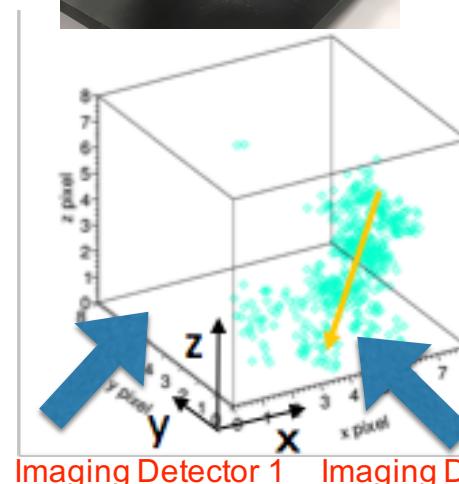
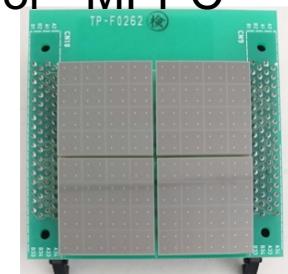
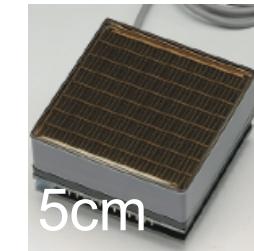
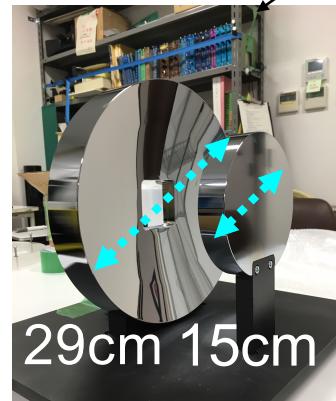
α acquisition efficiency: 90%

γ rejection efficiency: 94.27%

イメージング検出器



Multi Anode PMT or MPPC



Ongoing Studies

- * ミラー系の改善
- * 複数検出器による3次元再構成

▶新しいアイディア : ^{40}K geoneutrino

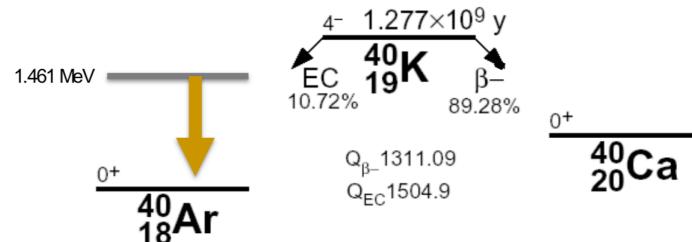
40/42

Motivation

- 地球の放射化熱の約16%を占めると考えられている
- 核にも存在する可能性あり
→量と場所を測定する手段としてニュートリノは有効

^{40}K Decay

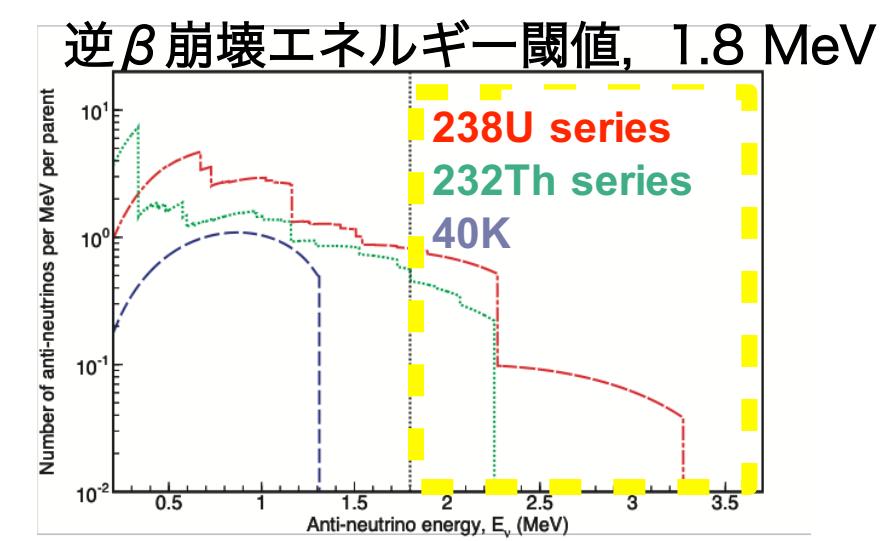
- 89.28 % $Q_{\beta} = 1.311 \text{ MeV}$ $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e$ $(5-15) \times 10^6 / \text{cm}^2/\text{s}$ → 希望あり ?
- 10.72 % $Q_{EC} = 1.505 \text{ MeV}$ $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e$ $(5-15) \times 10^5 / \text{cm}^2/\text{s}$
 - 10.67 % to 1.461 MeV state ($E\nu = 44 \text{ keV}$)
 - 0.05 % to g.s. ($E\nu = 1.5 \text{ MeV}$) $(2-6) \times 10^3 / \text{cm}^2/\text{s}$ → 絶望的



^{40}K Anti-neutrino

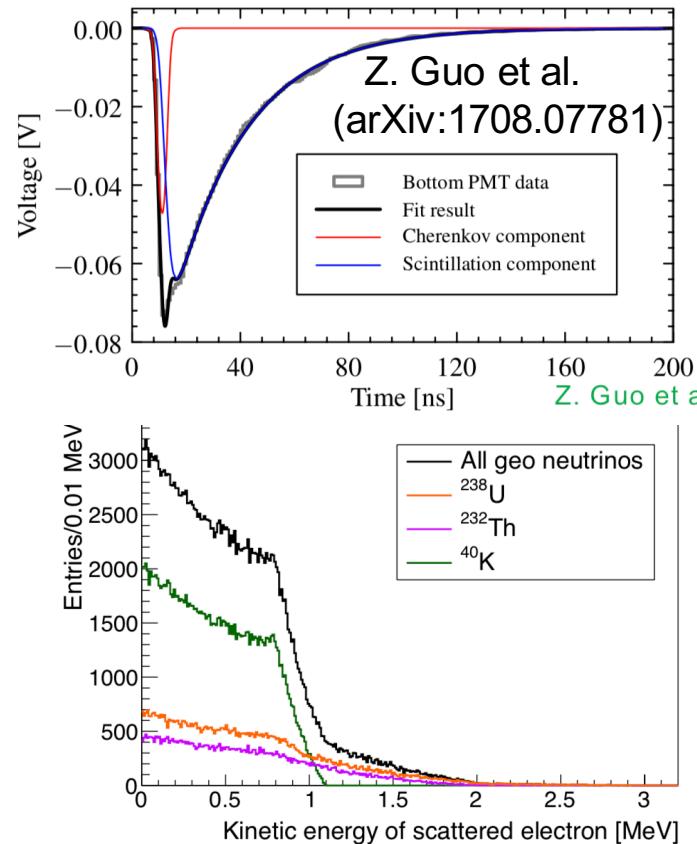
$\bar{\nu}_e - e$ scattering

- 有力候補
- ただし、バックグラウンド低減のため
反跳電子の方向情報が必要



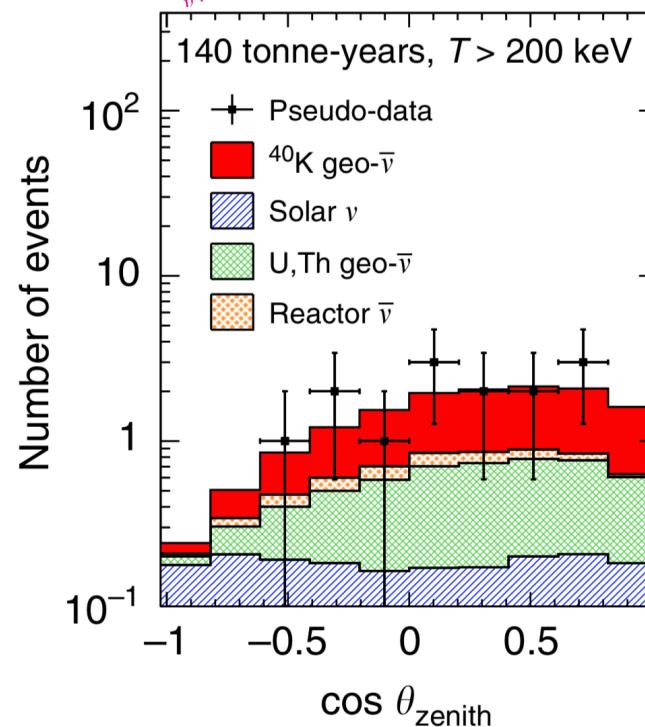
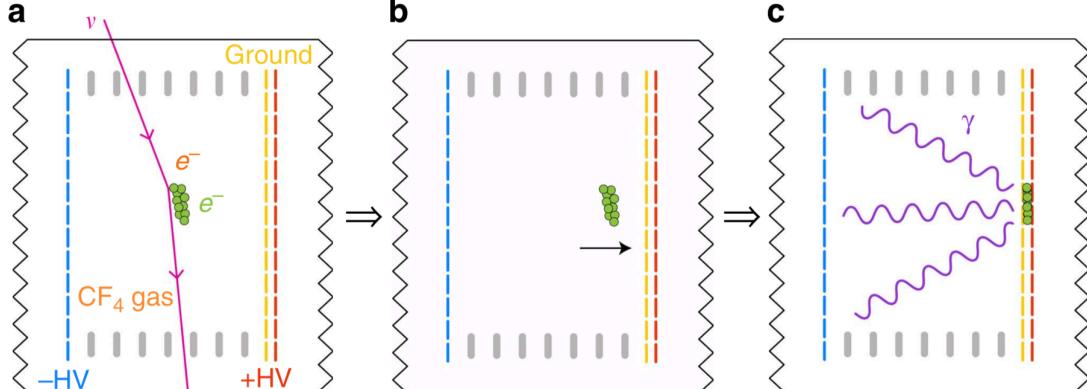
Liquid Scintillator Cherenkov Neutrino Detector

Z. Wang & S. Chen (arXiv:1709.03743)



Gas TPC

M. Layton et al.(Nat. Comm. 15989(2018))



- CF_4 等の巨大ガスチャンバー
- 技術的にかなり難しい

- 時間スペクトルの違いを使って CherenkovとScintillationの両方を観測
- Cherenkov → 方向情報
- Solar ν や放射性不純物のバックグラウンドがシリアルズ

Contents

1. イントロダクション
2. 観測意義
3. KamLAND実験
4. 最新観測結果
5. 将来展望
6. まとめ

▶ニュートリノの高い透過性を利用し天体内部の理解に利用することが可能に
"ニュートリノ地球科学"

▶KamLANDによる地球ニュートリノ観測結果

- 低原子炉運転期間 : ~3.5 年分 (全データの33%), 地球ニュートリノの明らかな
寄与を観測
- 地球ニュートリノイベント数観測 : 17% uncertainty (164 ⁺²⁸₋₂₅ events)
 - 地球モデルのエラーを下回る初めての結果
- 地球科学的知見
 - Th/U 重量比: 4.1 ^{+5.5}_{-3.3}, 隕石分析結果、BSE modelsと矛盾しない
 - 放射化熱: BSEモデルとconsistent, Low Q modelを排除し始めた

▶将来展望

- 地球科学分野との連携による結果が出てきた
- より深部のマントルからの寄与を観測に向けて
 - 地殻モデルの高信頼度化・高精度化が必要
 - 海上移動実験 OBD (Ocean Bottom Detector) 計画中！
- 現存する検出器の原理的不可能を可能にする到来方向観測技術を開発
- ⁴⁰K観測のための新しいアイディアも考えられている

ニュートリノは地球を直接調べる新たな観測値を与える