

「海洋にまつわる放射線計測」

海洋底ニュートリノ観測による 地球深部理解への挑戦

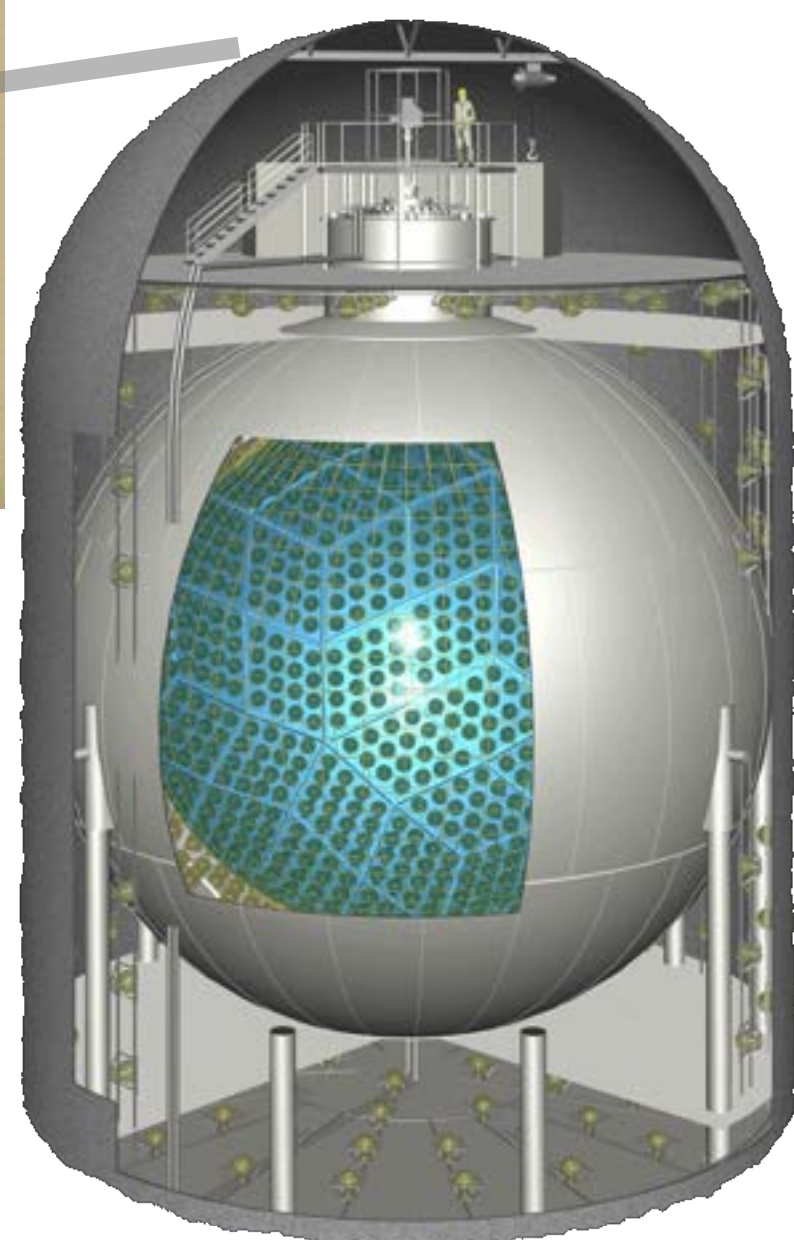
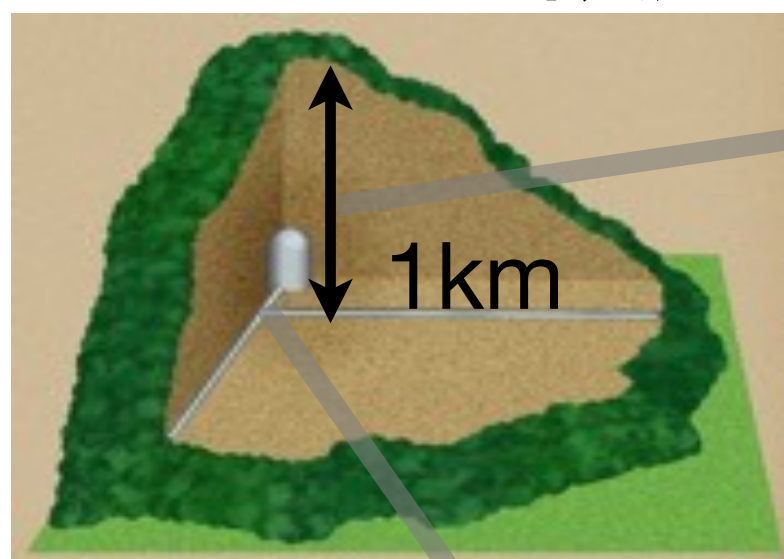
渡辺 寛子 (hiroko@awa.tohoku.ac.jp)

東北大学ニュートリノ科学研究センター

研究室HP

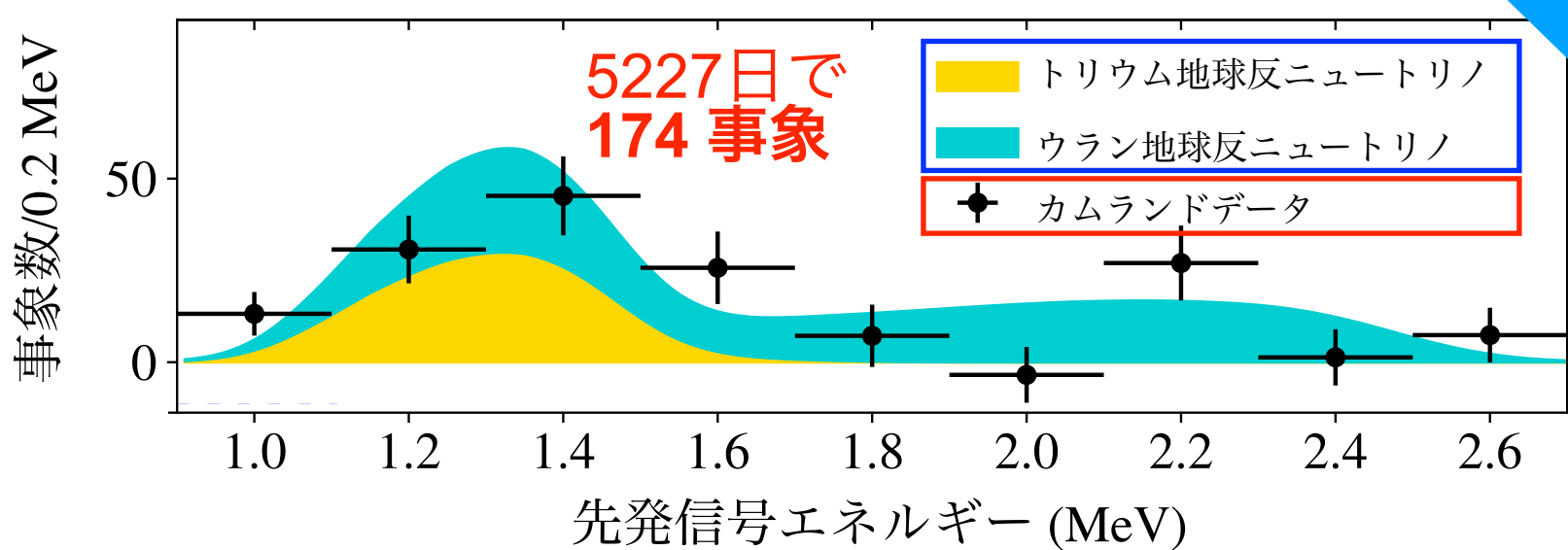


ニュートリノ観測

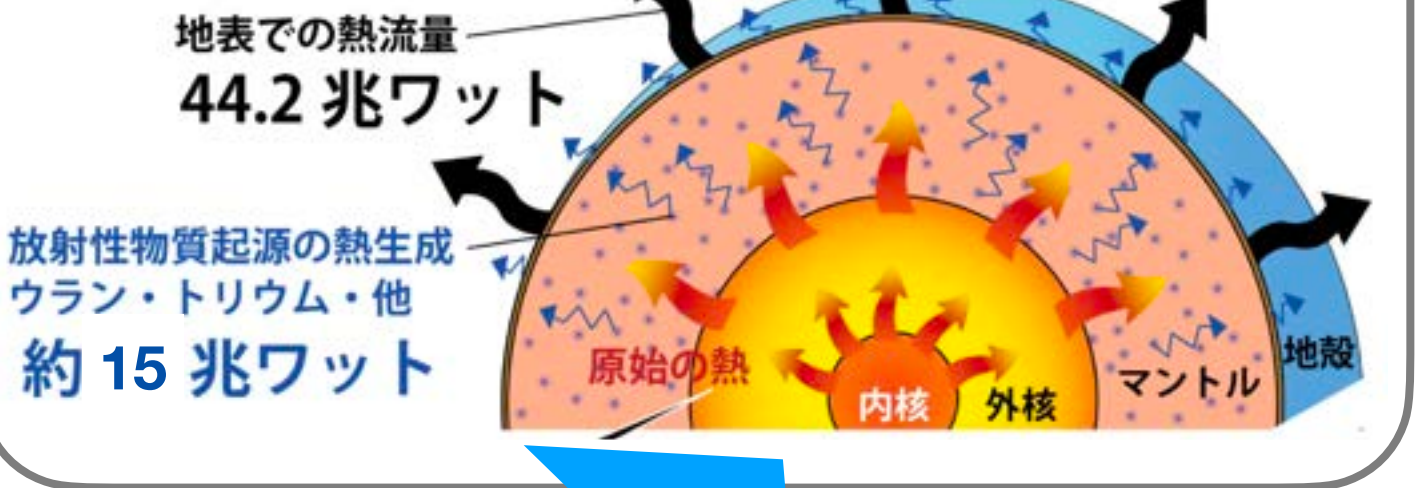


岐阜県神岡鉱山内

2022年発表観測結果



放射化熱量



海洋底ニュートリノ観測



地球科学的知見へ翻訳

地球科学

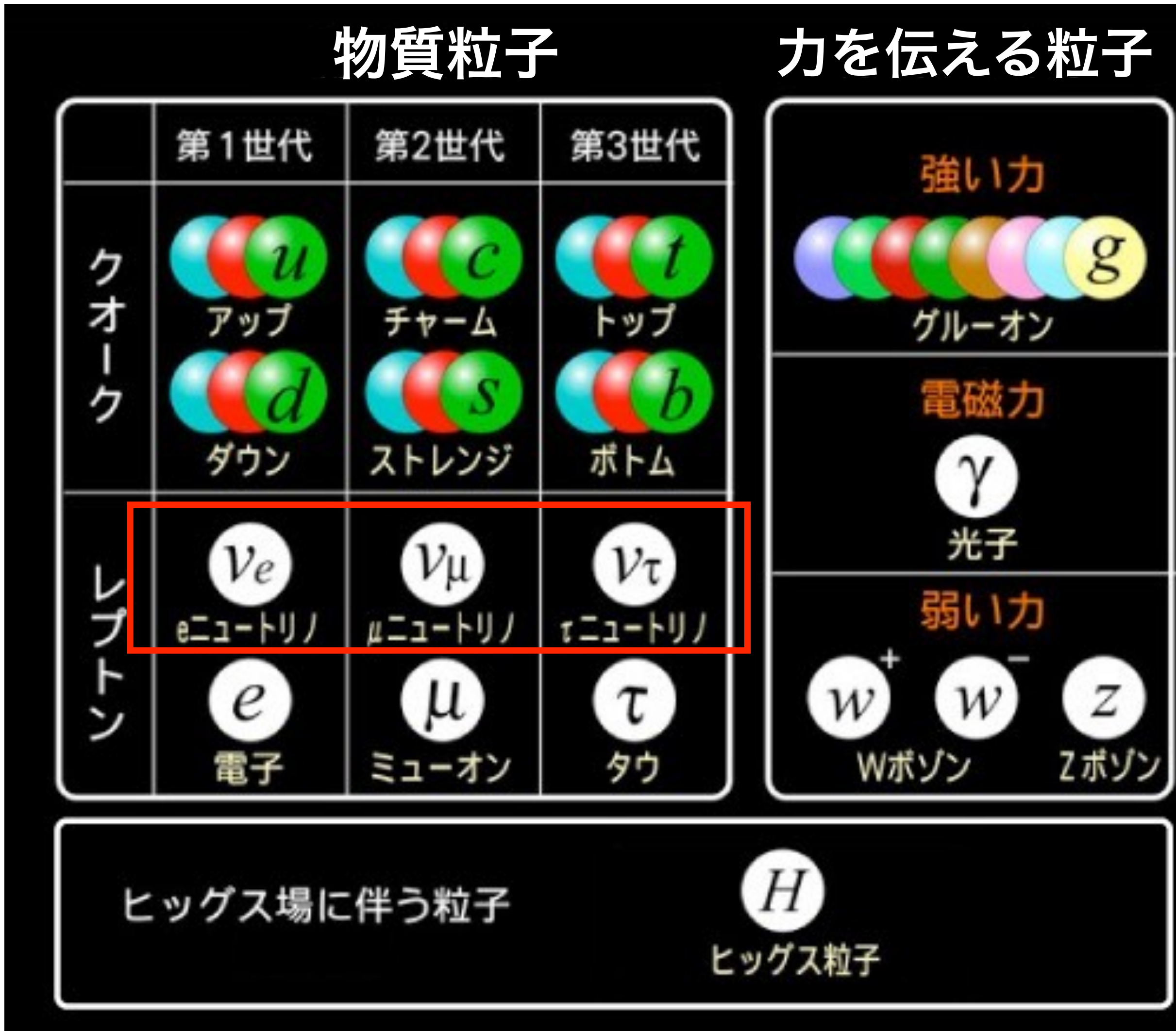
素粒子物理

海洋技術

新たな連携

新研究分野の創出へ

素粒子の種類



非常に軽い

電子の質量の10万分の1

電荷を持たない

多量に存在

他の素粒子: 1億分の1個/cm³

ν : 300個/cm³

殆ど反応しない

水中を約20光年進んでやっと一回反応する

すべての物質をすり抜ける高い透過率を持つ素粒子

熱源物質 = 放射性物質

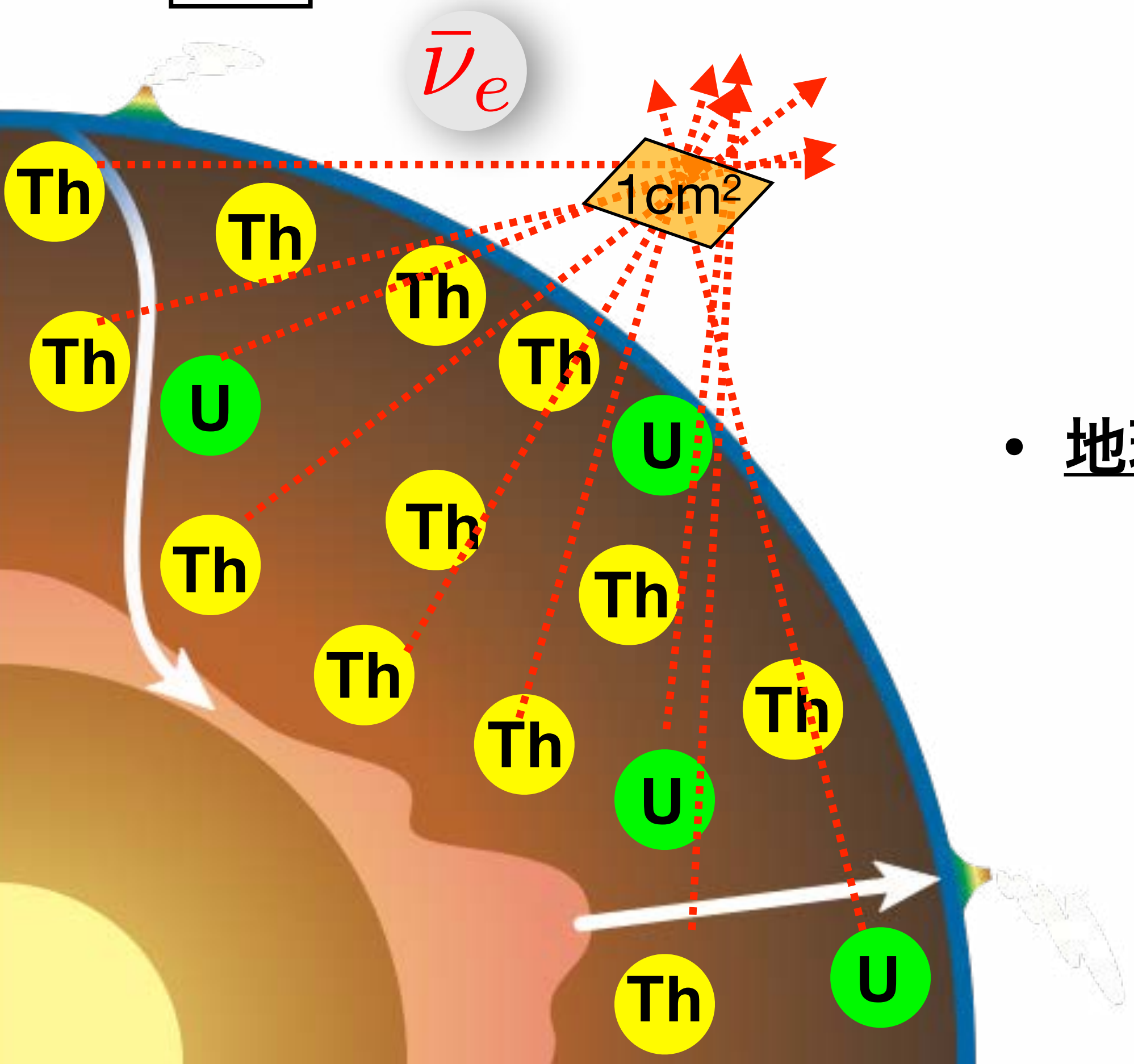
- 地球ニュートリノとは
地球内放射性物質の崩壊によって生じる反ニュートリノ

観測 1ヶ月に1事象/1kt検出器

流量 1秒間に400万個/1cm²

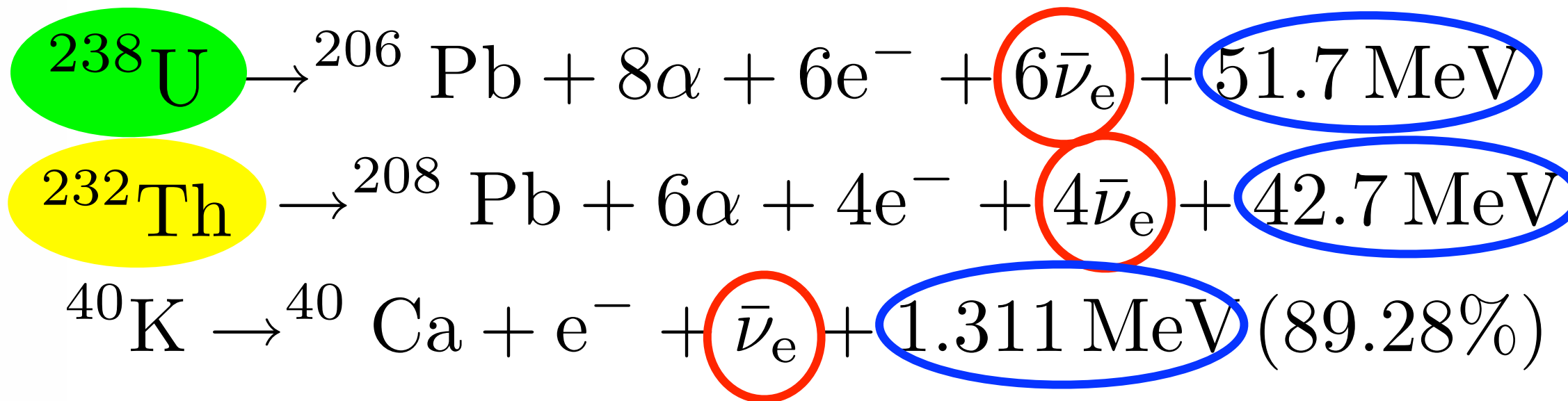
地球の熱源

他と反応せず長距離飛行
(水中を20光年飛んで1回反応)



β崩壊

地球ニュートリノ



地球ニュートリノの観測

- 2005年にKamLAND(神岡, 日本)が世界初観測!
以降, 世界最高精度で観測を継続中
- これまでの観測実績: 世界で2実験のみ
(もう一つはイタリアのBorexino実験。2021年終了。)

Kamioka Liquid Scintillator anti-neutrino detector

- 岐阜県飛騨市神岡鉱山内, 地下1000m 地上の1/10万の静かさ 神岡液体シンチレーター反ニュートリノ検出器

- 1000トンの超純液体シンチレーター

世界最大, 通常物質の1/1兆の放射性物質量

液体シンチレーター = 光る油

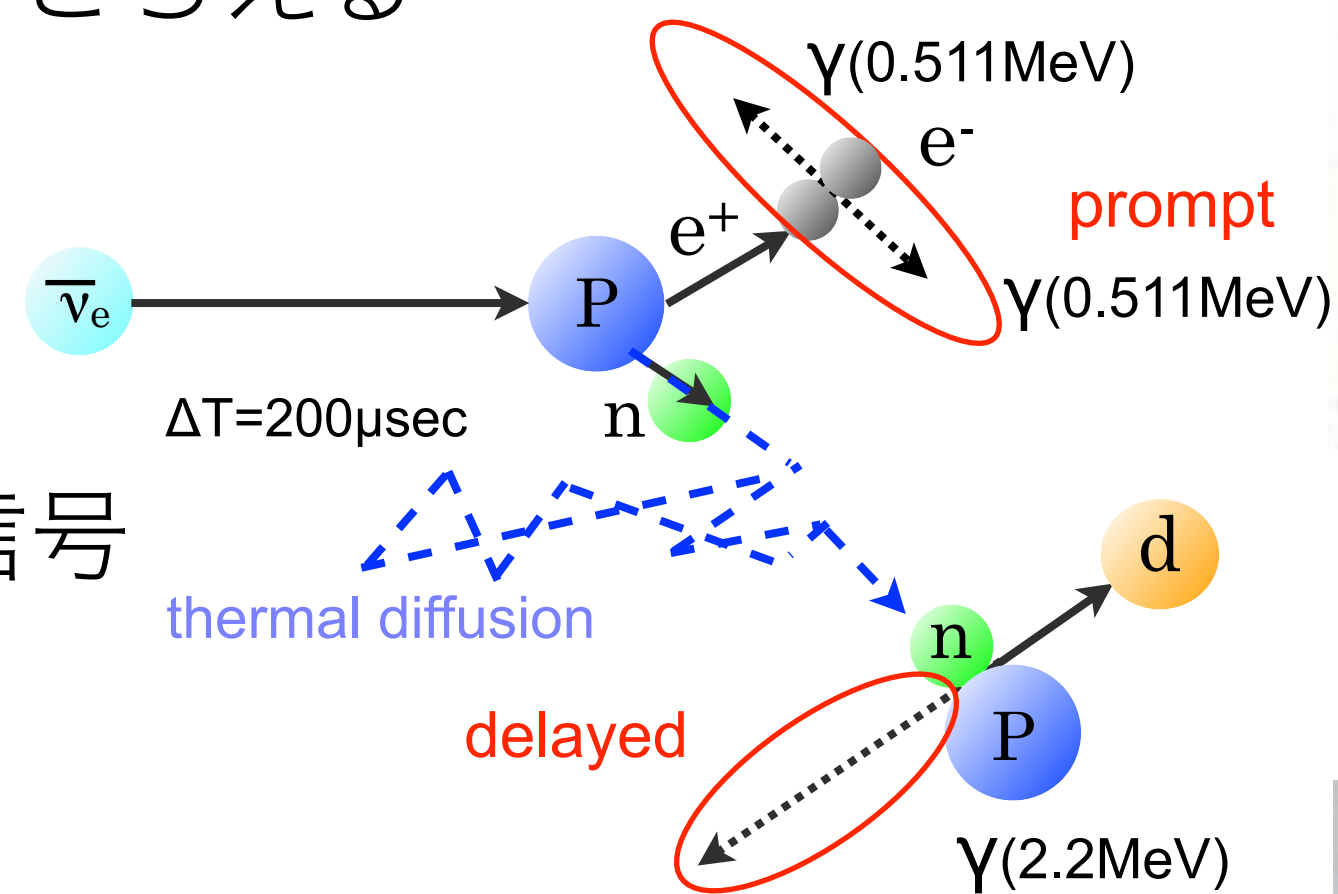
1,879本の光電子増倍管で光をとらえる

- 光の量 \propto 粒子のエネルギー

逆ベータ崩壊反応を利用

2つの時間・空間相関のある信号

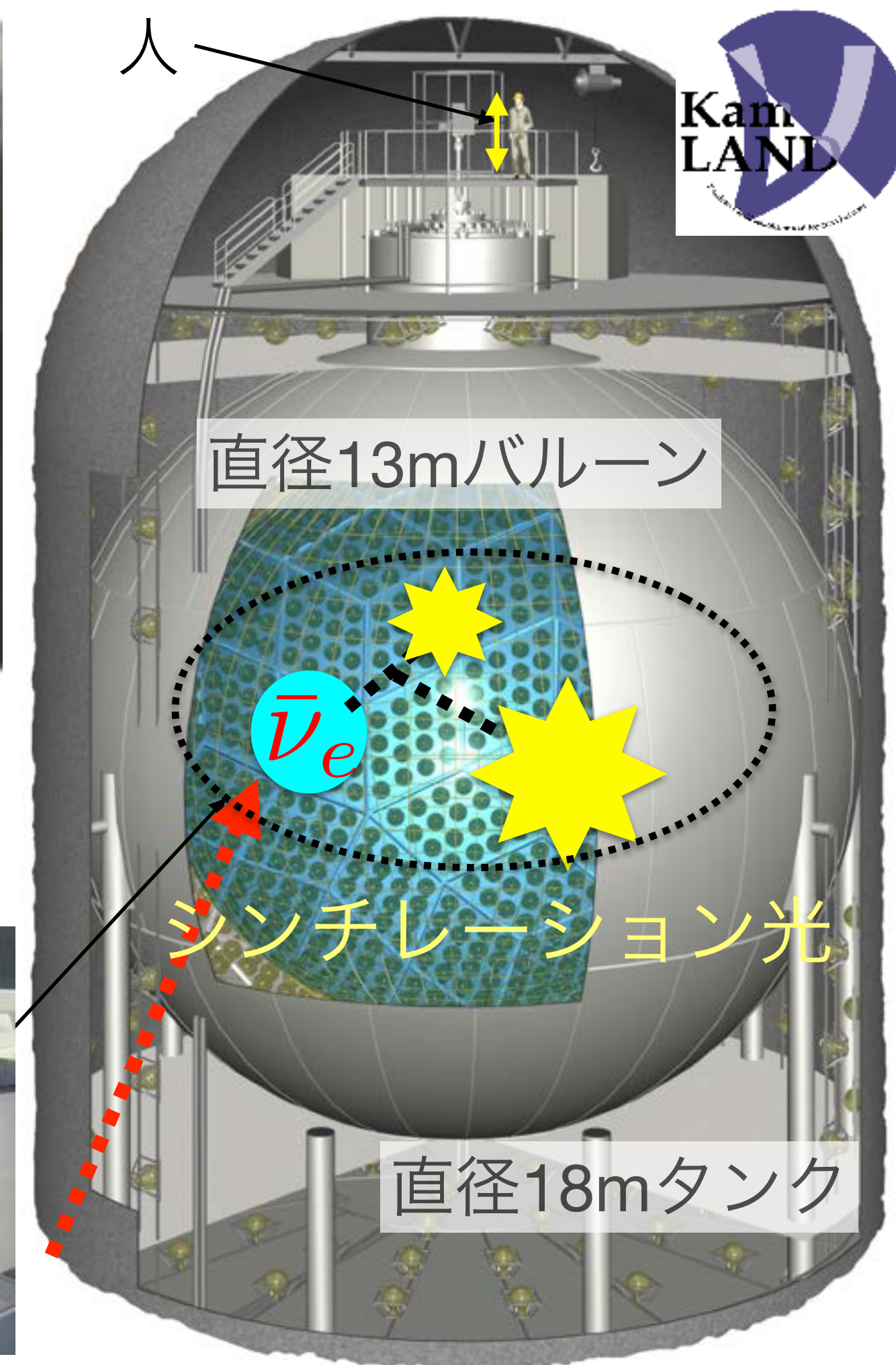
→バックグラウンドを1/10⁴に

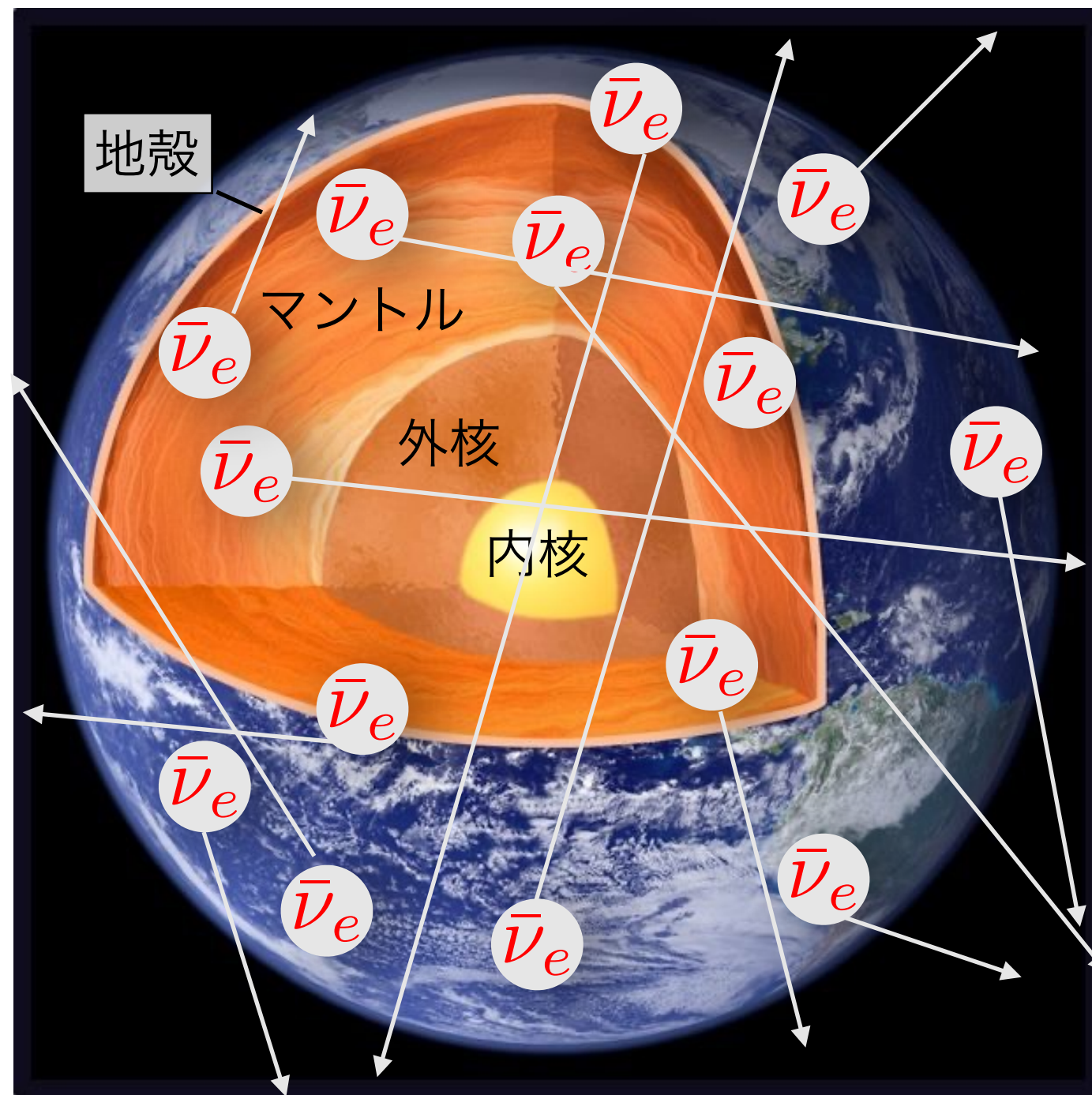


水の約100倍明るい



光電子増倍管





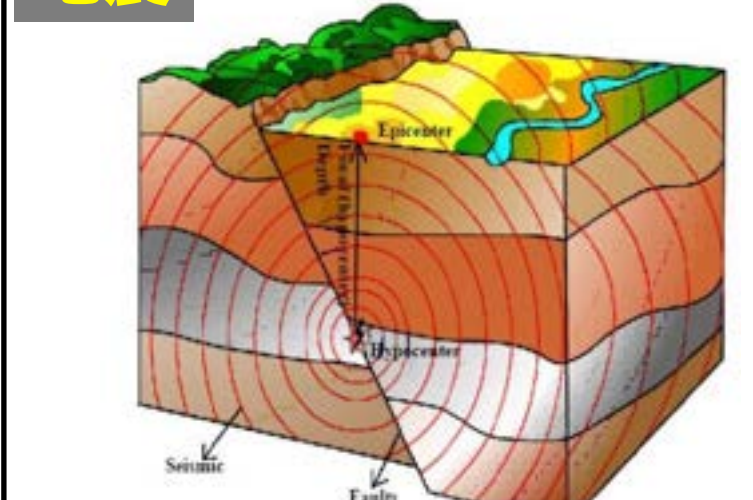
問い：地球を駆動する熱とは？その量は？
私たちの住む地球の未来は？

様々な地球活動

山脈形成



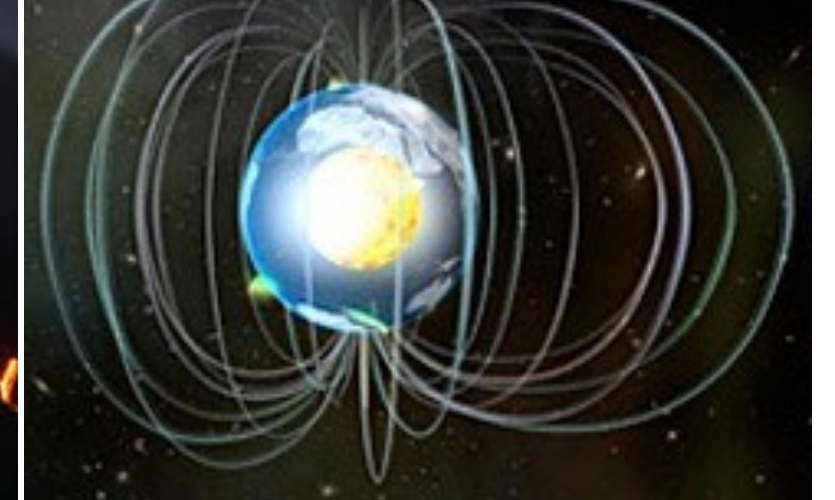
地震



火山の噴火



地磁気

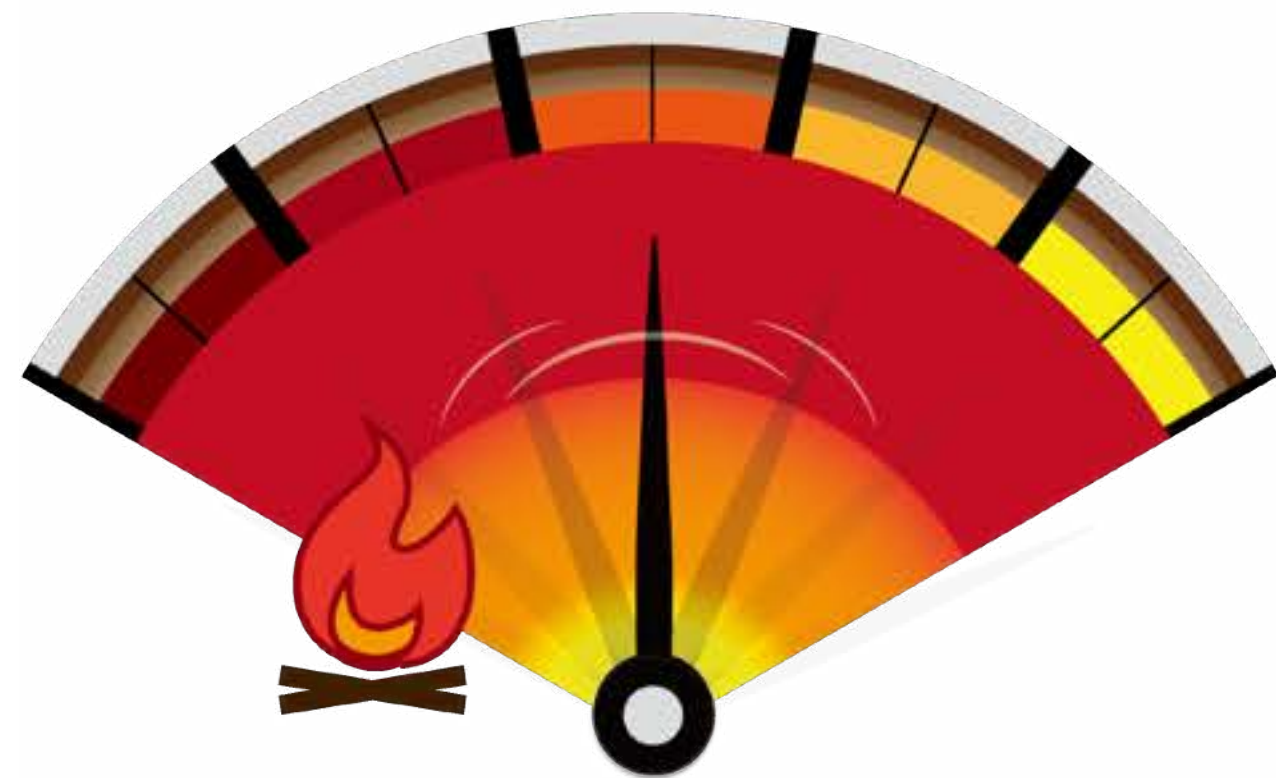


地球活動の源 = 地球内の熱

地球ニュートリノで観測可能！

未解決の謎：熱量は？分布は？

地球の熱量 = 「原始の熱」と「放射化熱」のハイブリッド



原始の熱

46億年前の地球形成時の熱

(金属核形成による重力エネルギー)



それぞれの
熱量は
バランスは



地球ニュートリノ観測で分かる！



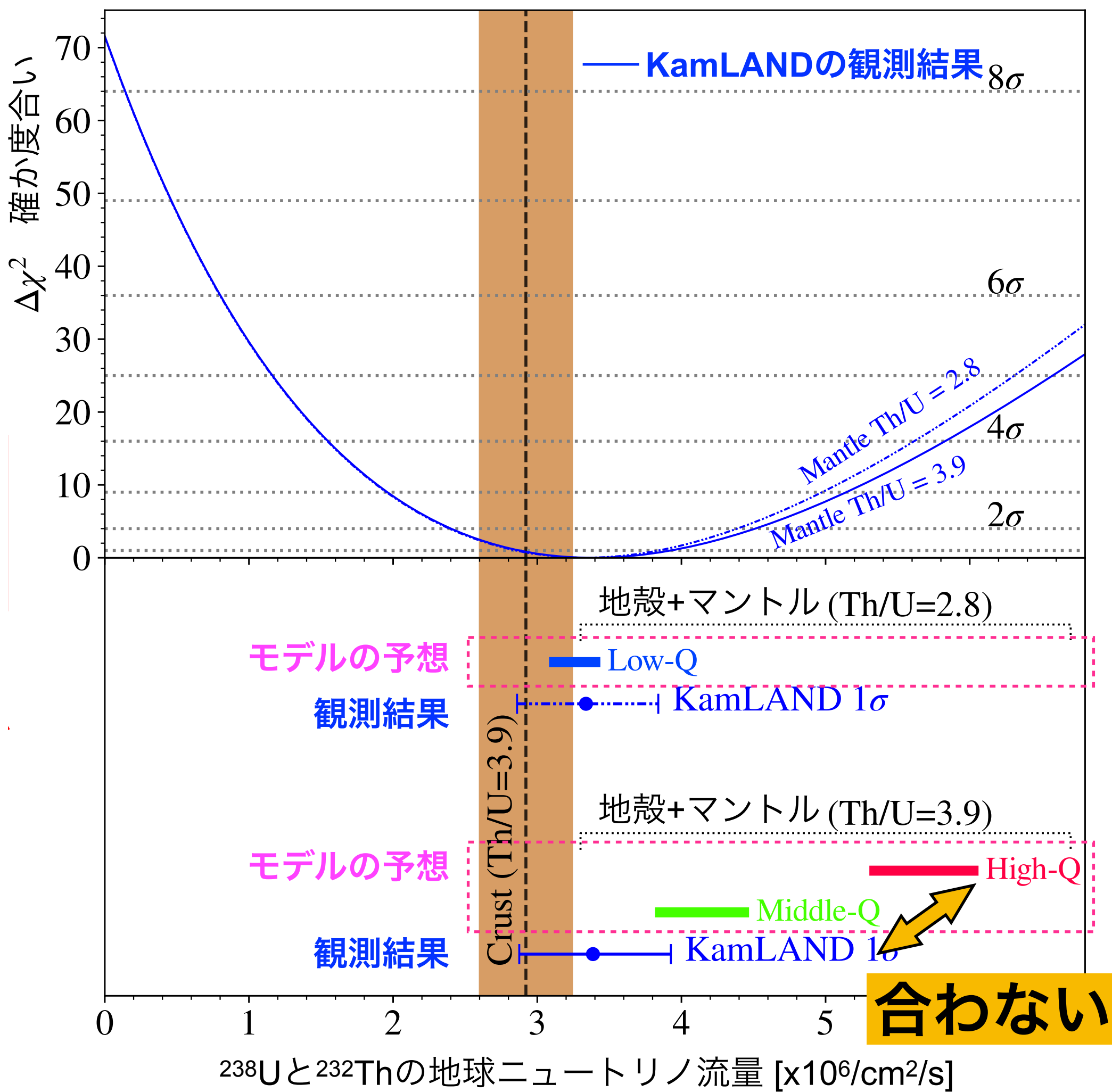
放射化熱

放射性物質起源

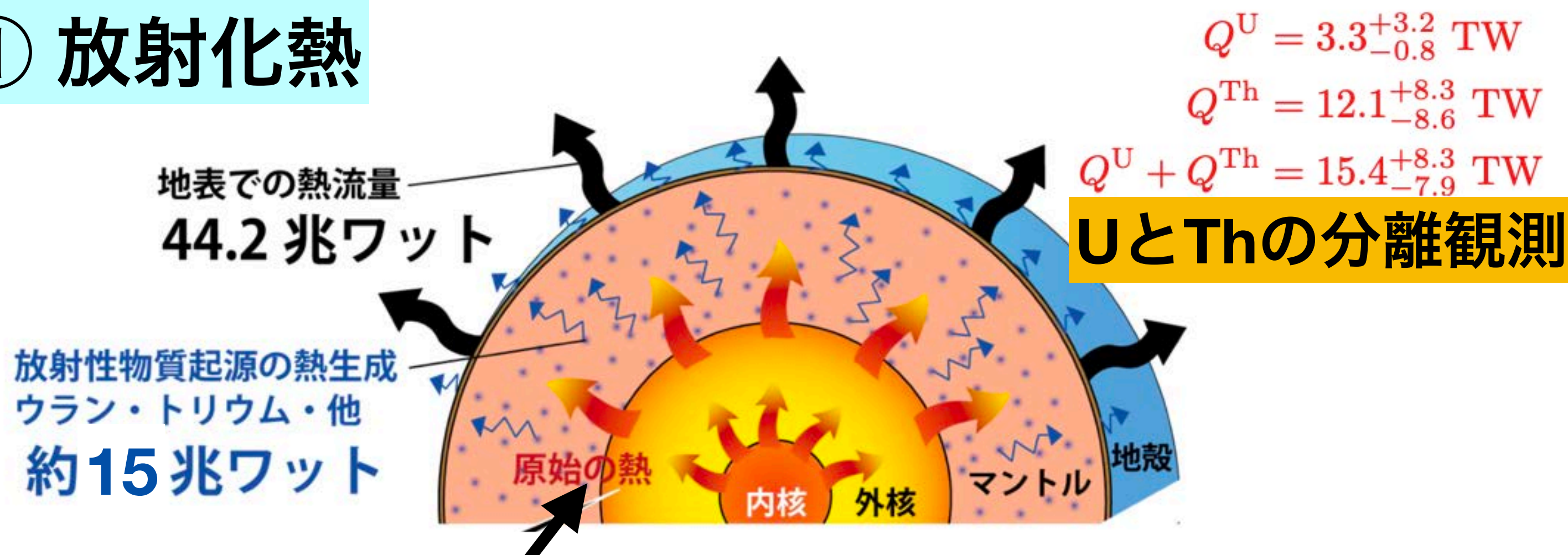
(U・Th・K)



を放出

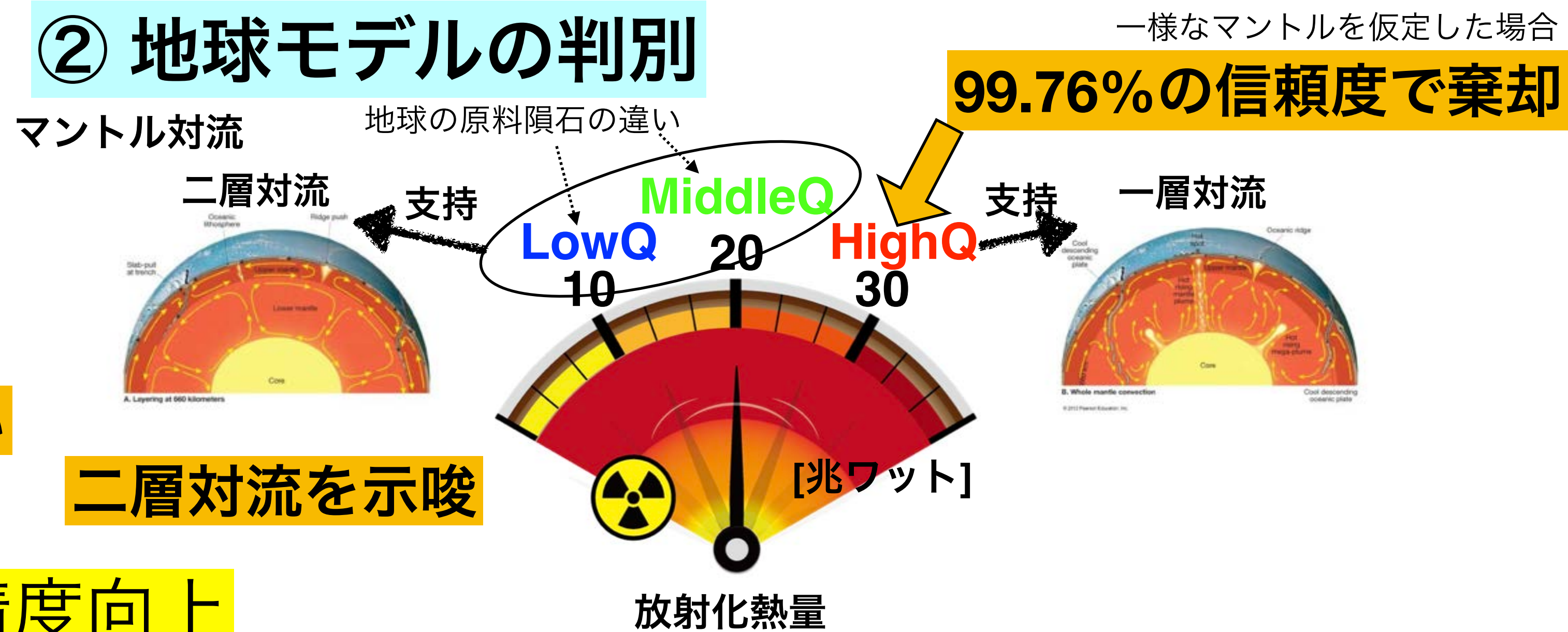


① 放射化熱



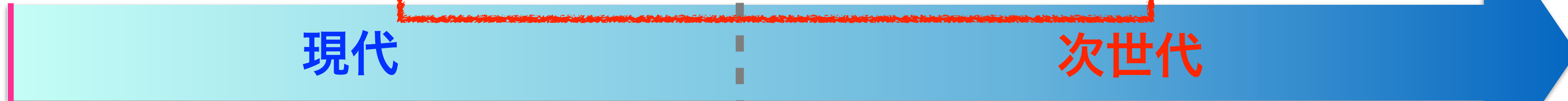
地球形成時の原始の熱がまだ残っている

② 地球モデルの判別

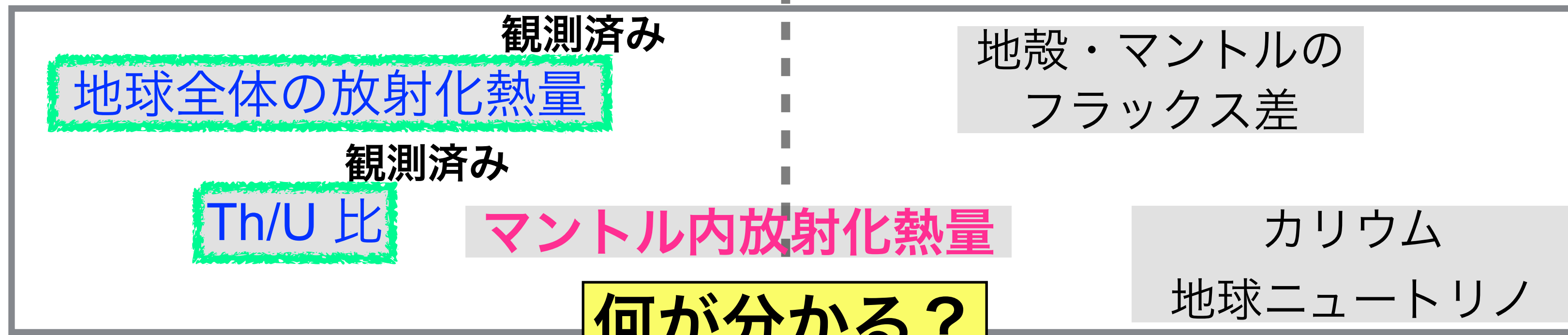


地球科学的知見を得られるまで精度向上

何が必要？



何が分かる？



2005年 世界初観測

現代の大陸上の検出器不可能を克服・地球深部の理解に変革

● マントルの寄与の直接測定

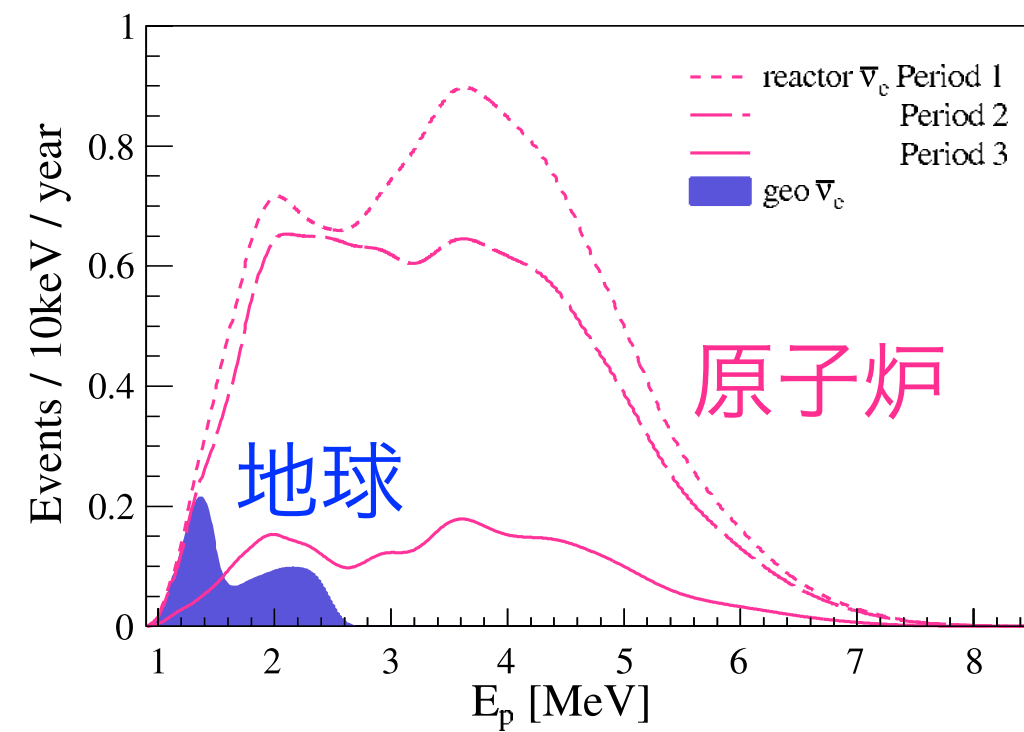
地殻から離れる必要有り
原子炉からも離れられる

● 複数点観測可能

地球深部の謎を解き明かす！

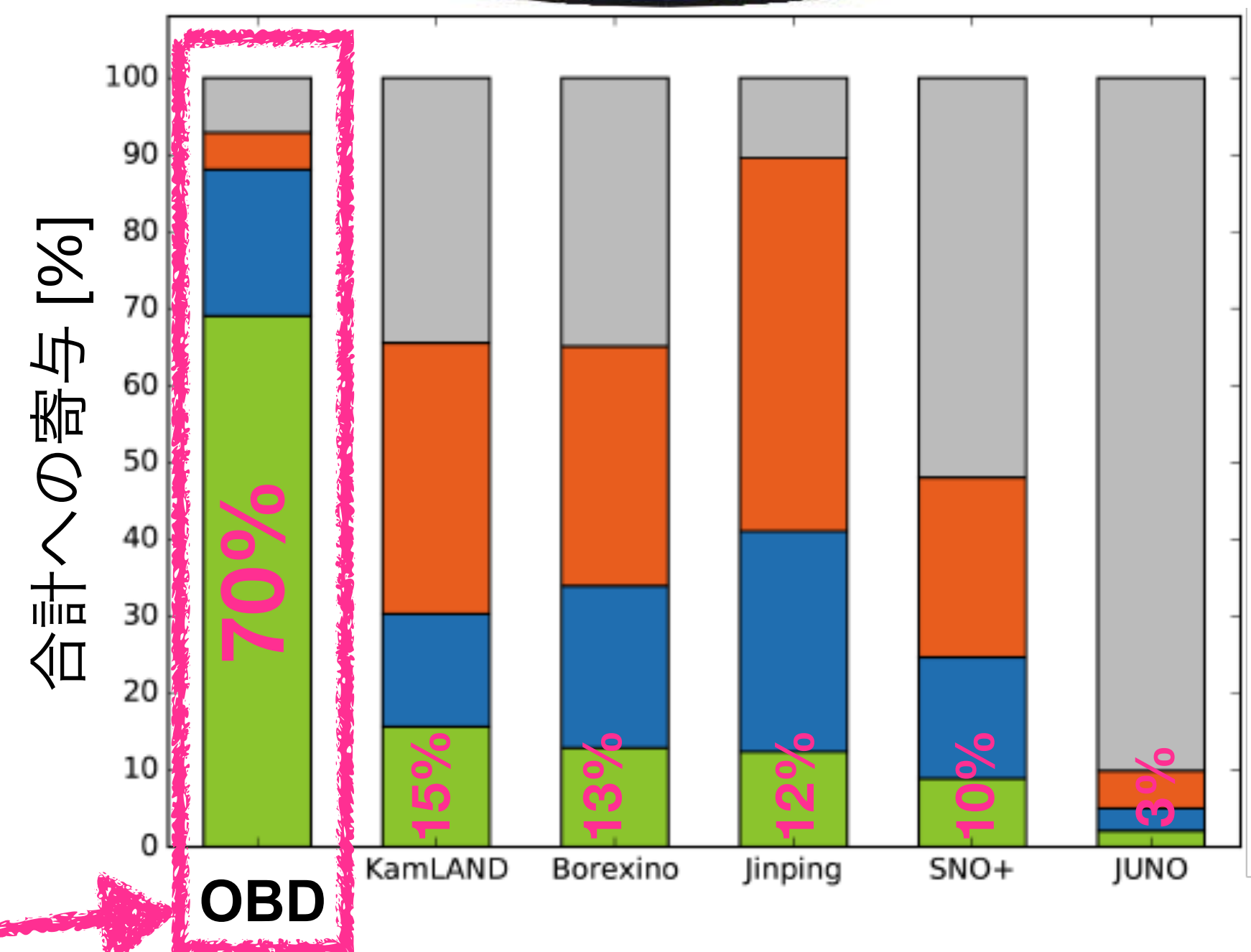
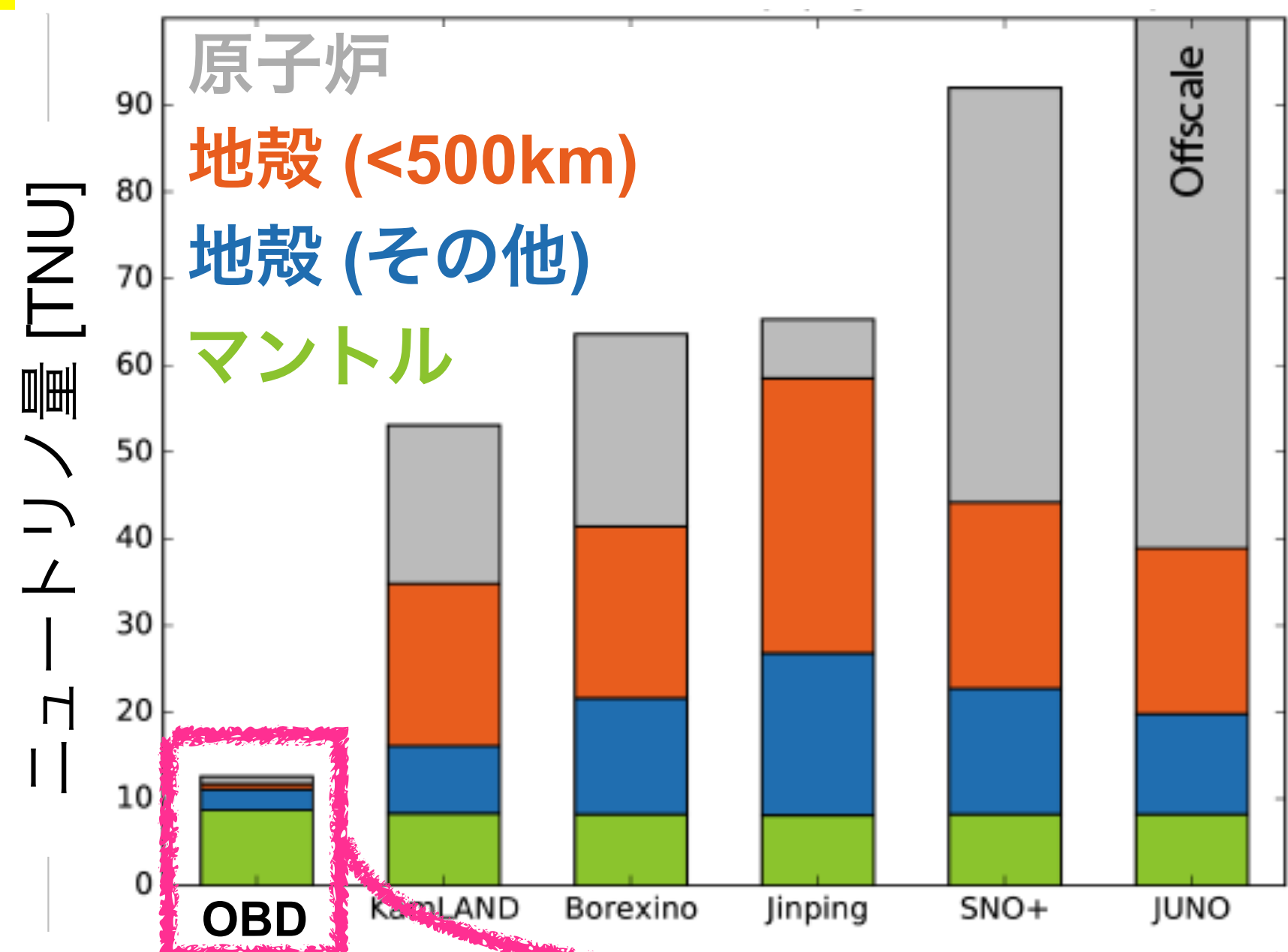
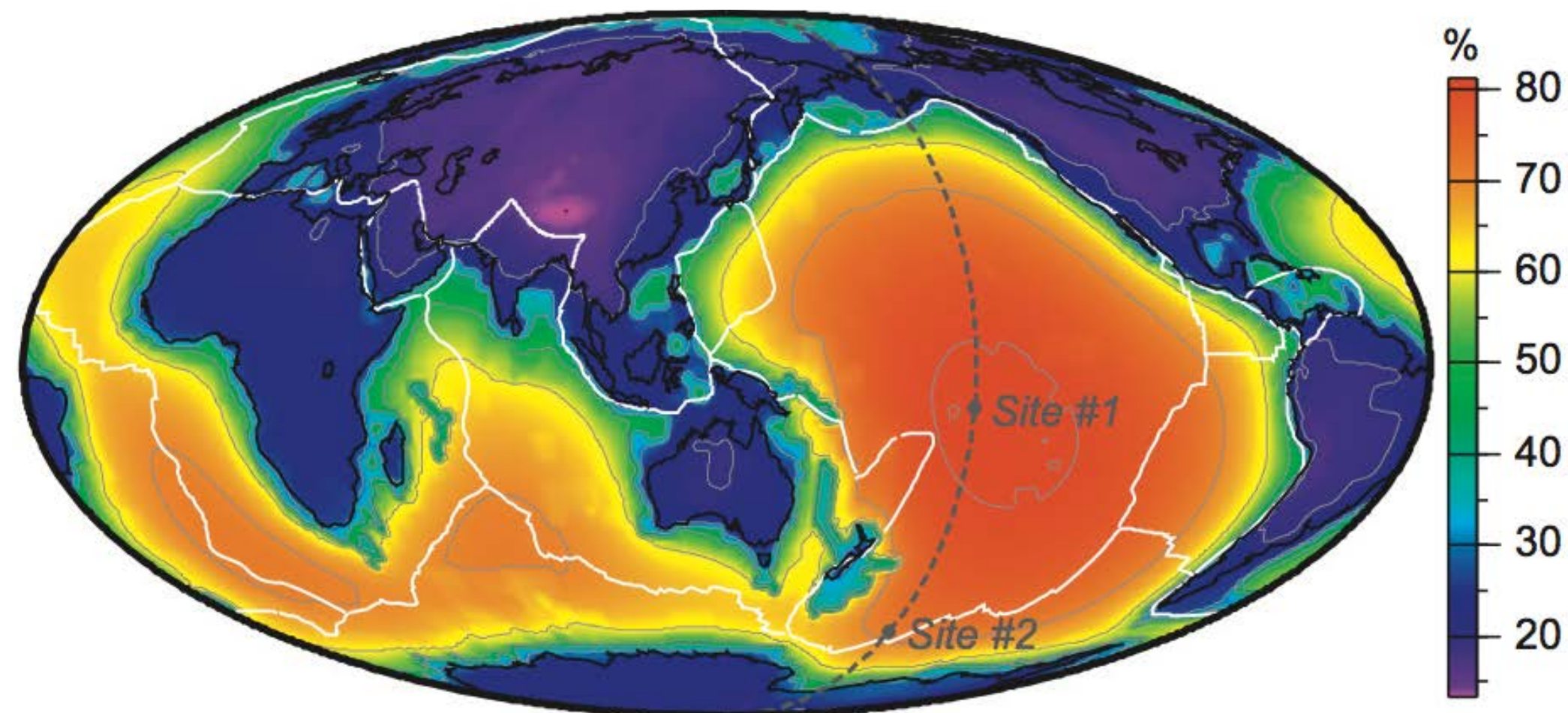
● 分野横断的研究

素粒子物理
地球科学
海洋工学



Šrámek et al (2013) EPS, 10.1016/j.epsl.2012.11.001

マントル/合計



• マントルの寄与の直接測定

地殻から離れる必要有り
原子炉からも離れられる

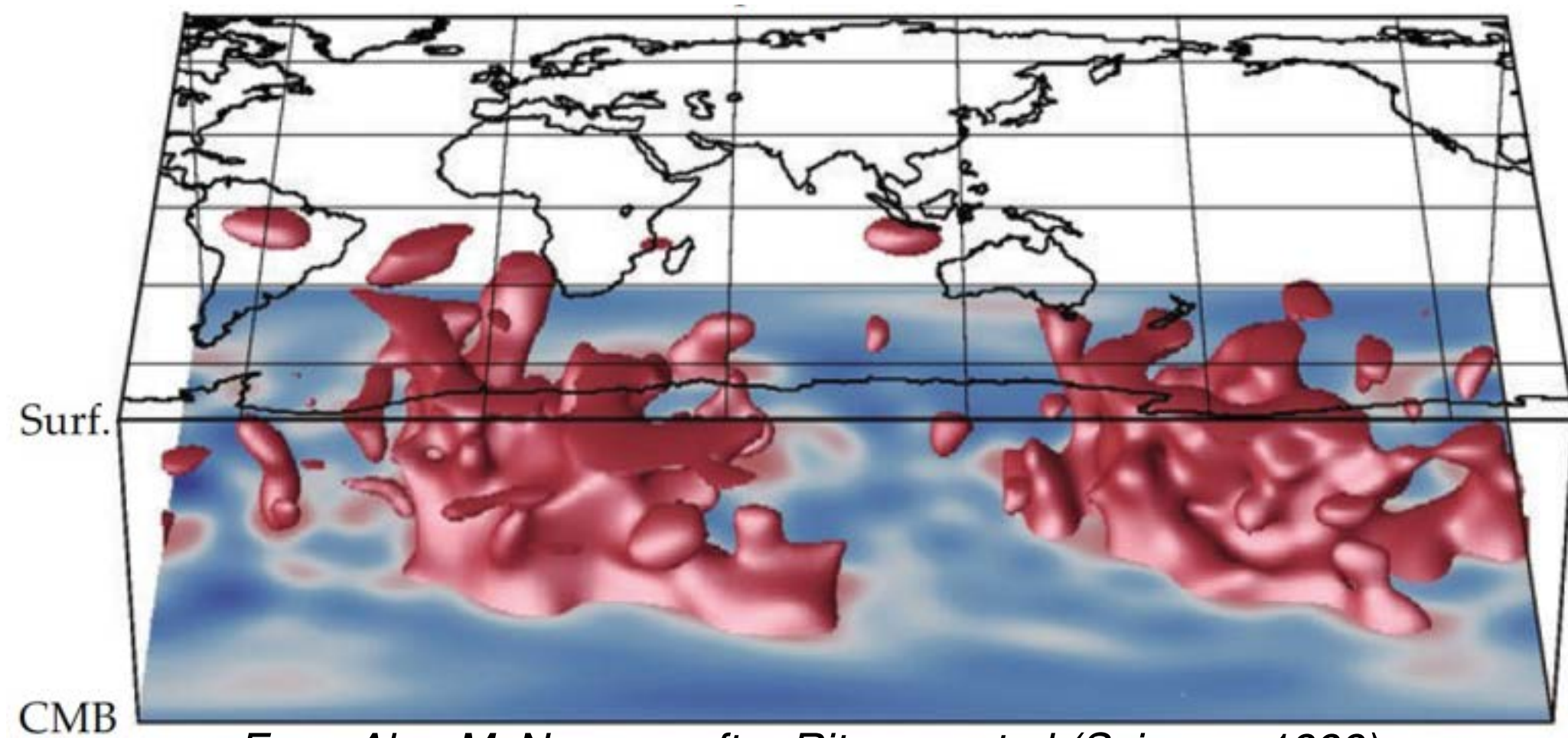
• 複数点観測可能

地球深部の謎を解き明かす！

• 分野横断的研究

素粒子物理
地球科学
海洋工学

Seismically slow “red” regions in the deep mantle

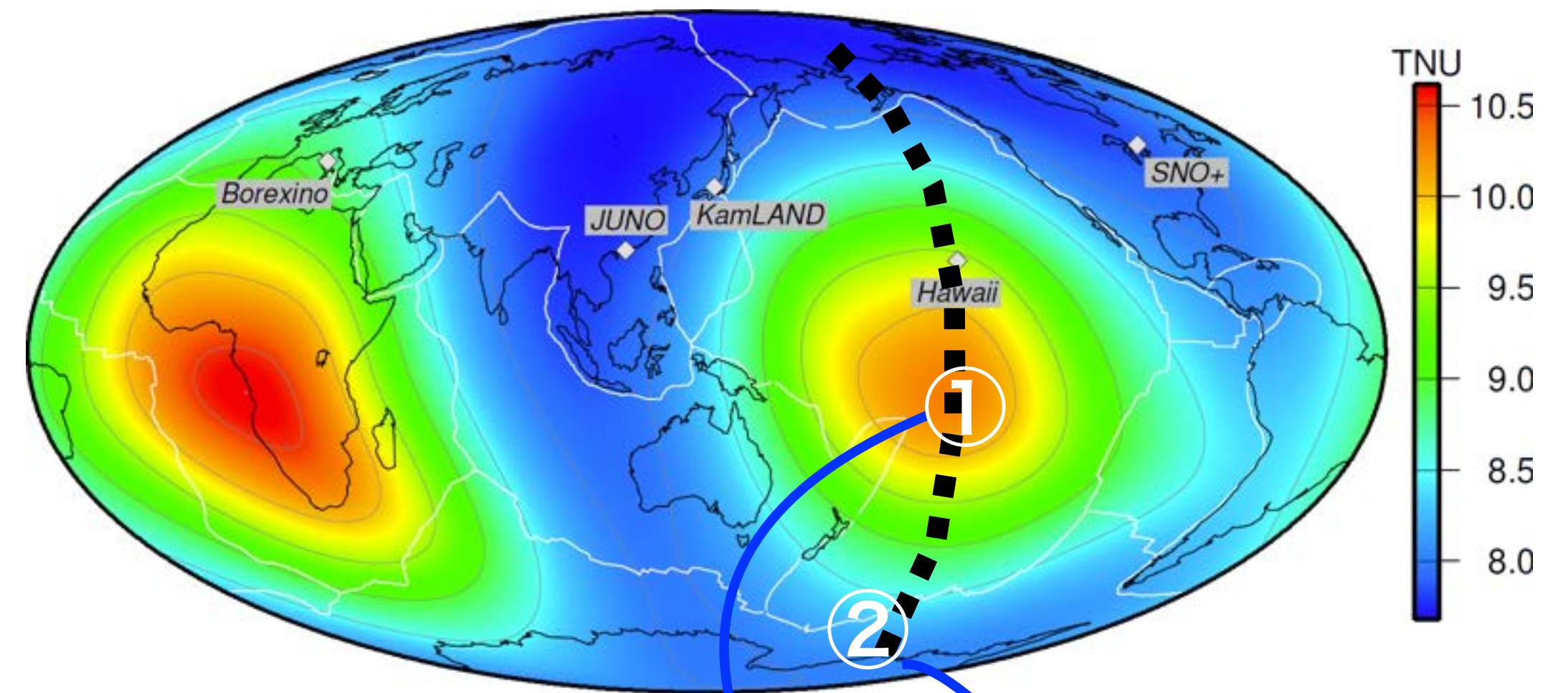


From Alan McNamara after Ritsema et al (Science, 1999)

Red = Pacific & south Atlantic LLSVP

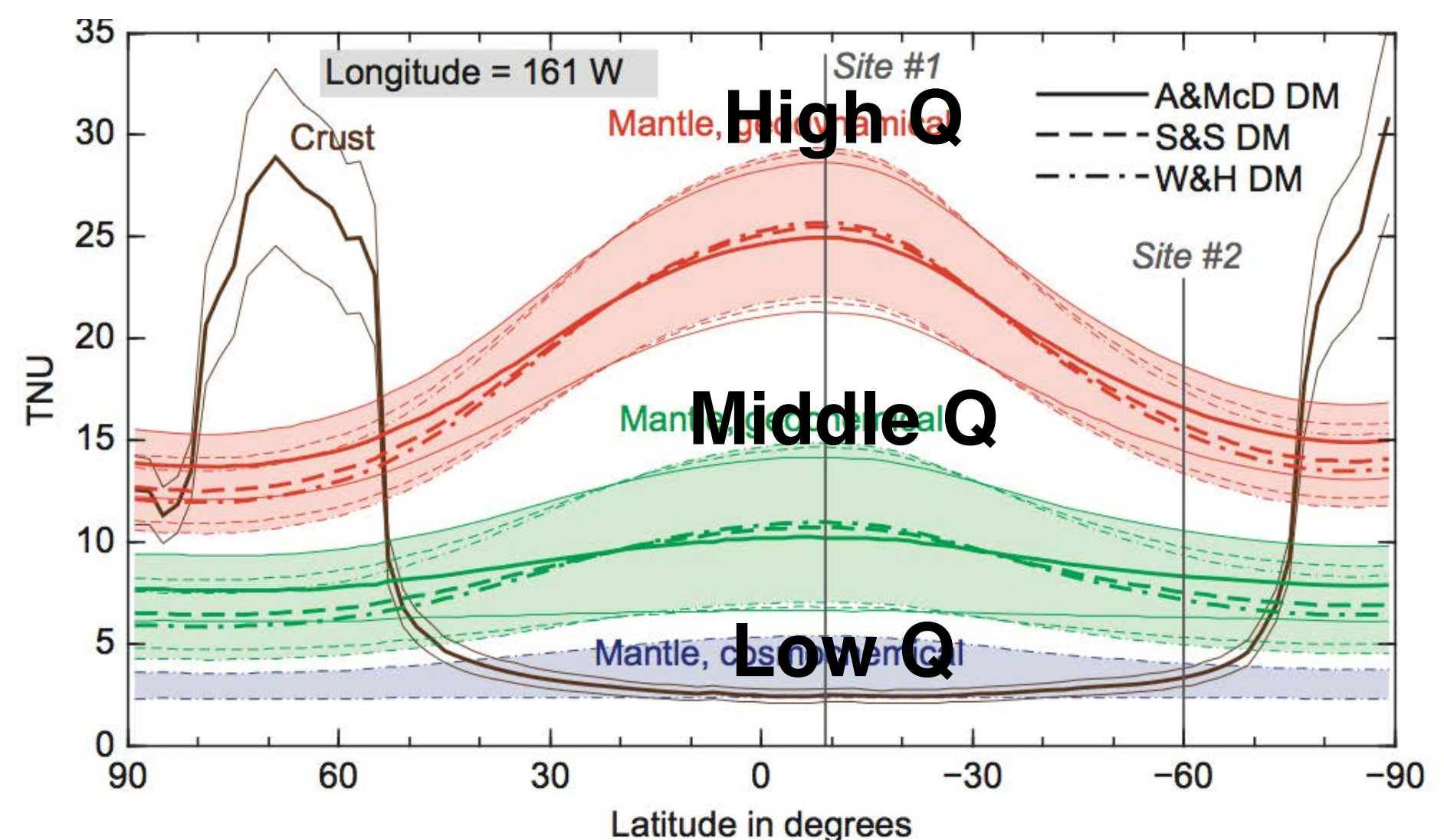
Šrámek et al (2013) EPS, 10.1016/j.epsl.2012.11.001

マントル地球ニュートリノフラックス



site 1

site 2



マントルの寄与の直接測定

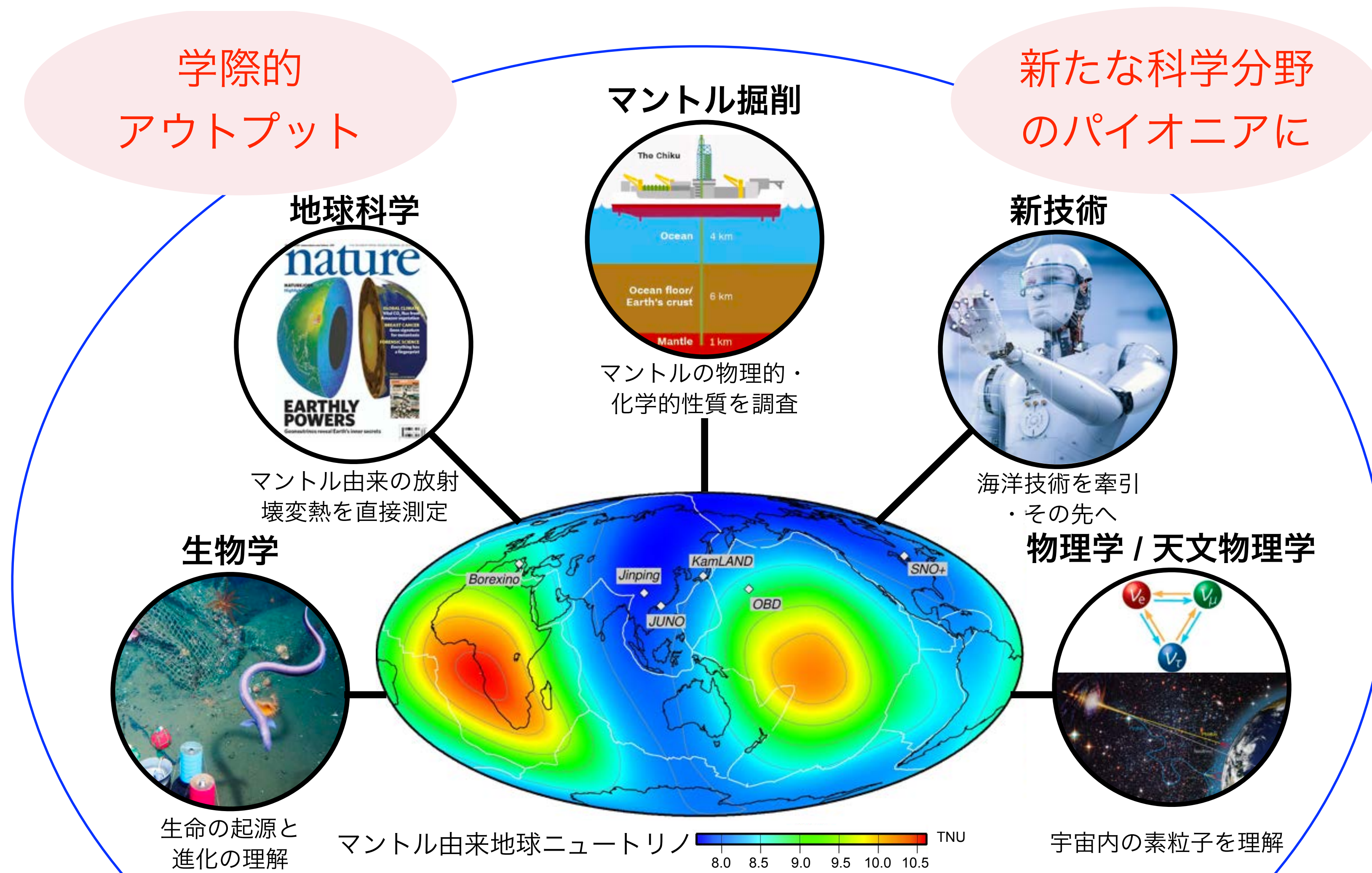
地殻から離れる必要有り
原子炉からも離れられる

複数点観測可能

地球深部の謎を解き明かす！

分野横断的研究

素粒子物理
地球科学
海洋工学



海洋研究開発機構・東北大で共同研究スタート (JAMSTEC)

7/9 @ちきゅう
キックオフワークショップ



working group始動
(素粒子物理 + 地球科学 + 海洋工学)

大型化に向けた
* 技術開発
* コミュニティの拡充

we are here
2020-2022
~20 kg

1-10 t

次のステップ


~1.5 kt

10-50 kt
マントル地球ニュートリノ観測

2005
ハワイで発案

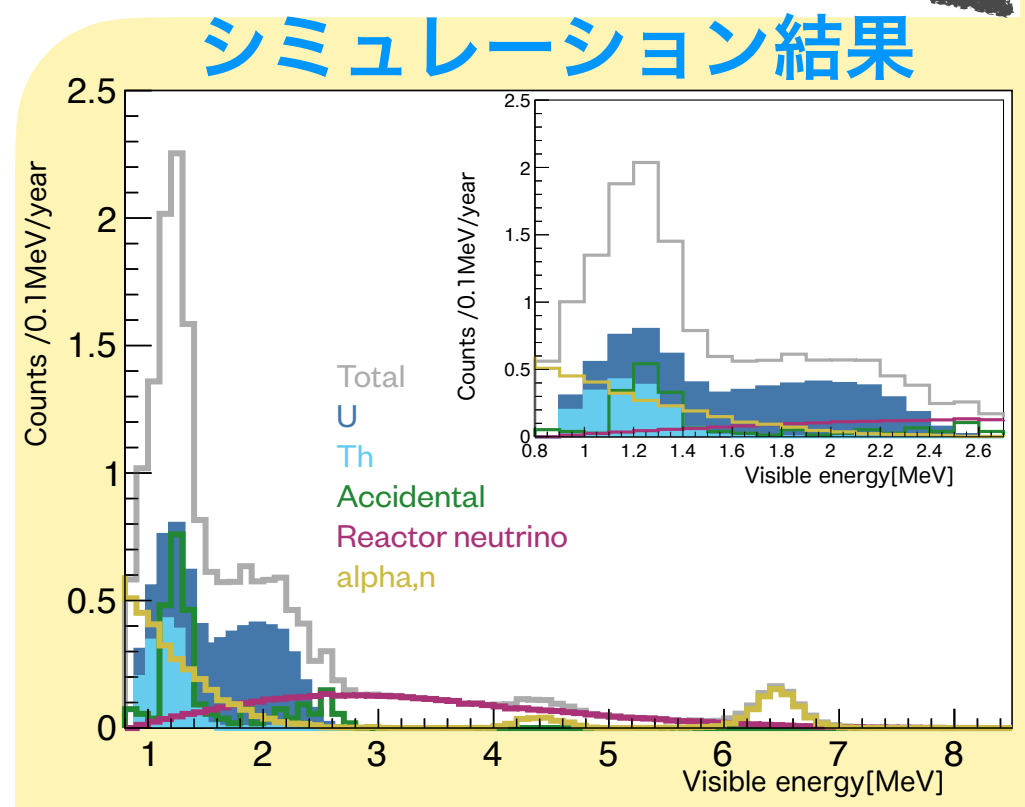
2019
進展なし

1km海洋底での液体シンチレータ観測機の稼働
初島観測所



世界初

- 技術開発を集約
- 大型検出器デザインに必要なデータの測定



予想事象数 (1年) (マントル)

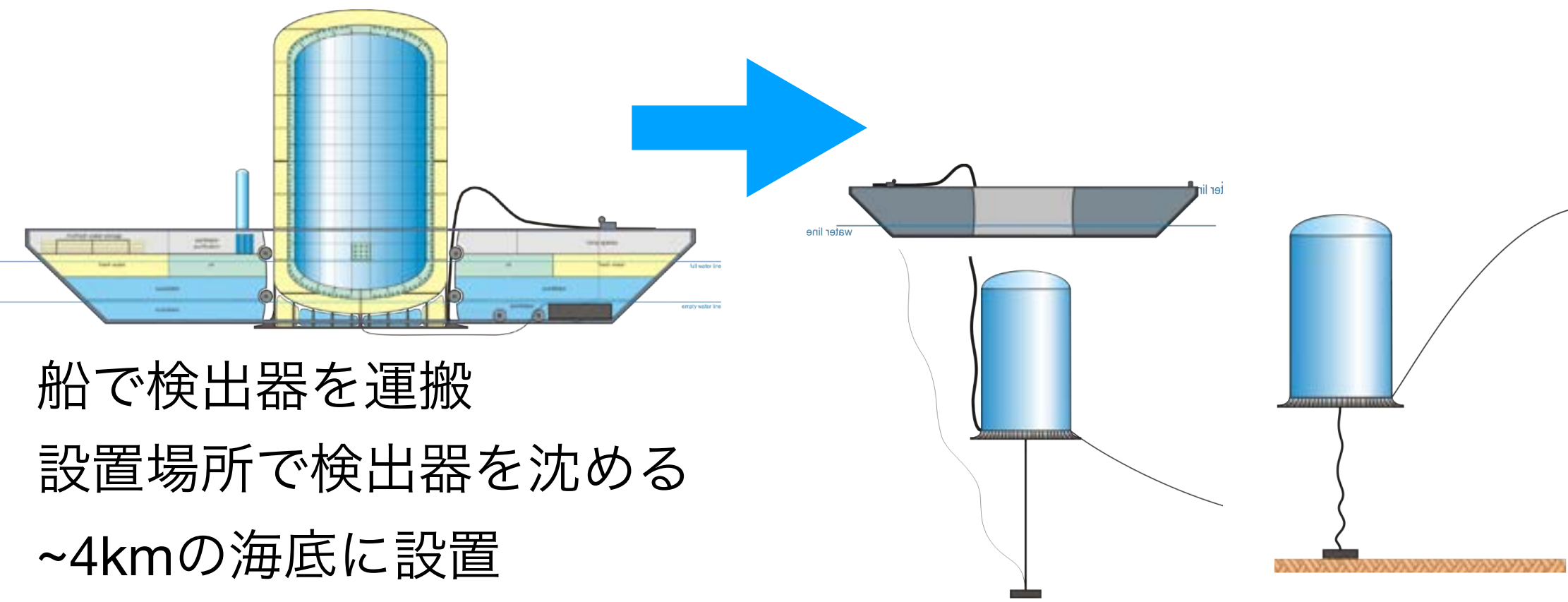
地球ν U : 6.6 (4.6)
Th : 1.6 (1.1)

バックグラウンド : 6.4

地球ν > バックグラウンド



(MiddleQの場合)
3年観測でマントル起源熱量を
優位に測定可能!



- * 検出器サイズ : 1.5 kt (ニュートリノ観測可能な最小)
- * 設置場所 : ~4 kmの深海, ハワイ沖が有力候補
日本近郊：南鳥島？
- * 設置期間 : 1年以上/1箇所, 数点で観測する計画
- * 電力 : 数十kWの安定供給
- * データ : 数百GB/day



現存する大陸上の検出器とは全く異なる環境

海底 (~4km) → 高圧 (~40MPa) ・ 低温 (2-4度)
電気・通信：隔絶された環境

これまでにない開発が必要

- * 光電子増倍管耐水圧シールド ^{開発中}
- * 高圧・低温下での液体シンチレータ性能評価 ^{開発中}
- * 省電力
- * 安定した電力供給・通信方法
- * 検出器運搬・設置・運転・回収方法 など

* 光電子増倍管耐水圧シールド

要求：低放射性物質質量, 高透過, 耐圧

イメージ(IceCube実験)

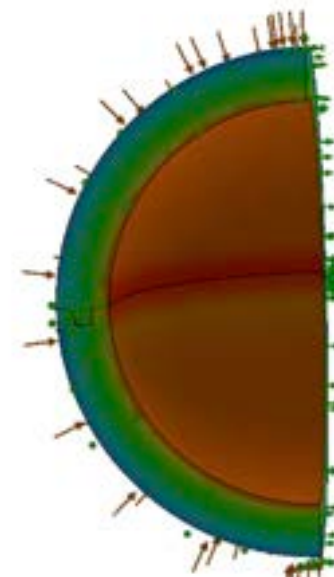


アクリル

- 放射性物質質量は問題なし
- 強度：40MPaもたず破壊。内部の赤道部に応力集中。



加圧テスト@JAMSTEC



構造計算

使用不可

ガラス (岡本硝子様との共同研究)

- 耐圧強度は問題なし
- 放射性物質低減必須

	[g/g]		
	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
目標値	1x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁸
普通のガラス	~1x10 ⁻⁷	~1x10 ⁻⁷	~1x10 ⁻⁷
達成値	1.4x10⁻⁸	<5.0x10⁻⁹	3.4x10⁻⁹
低減率	1/10	1/500	1/300

- * 材料物質の再選定
- * 溶融時に使う坩堝表面をPtコーティング

↓
大型化(20inch直径)へ

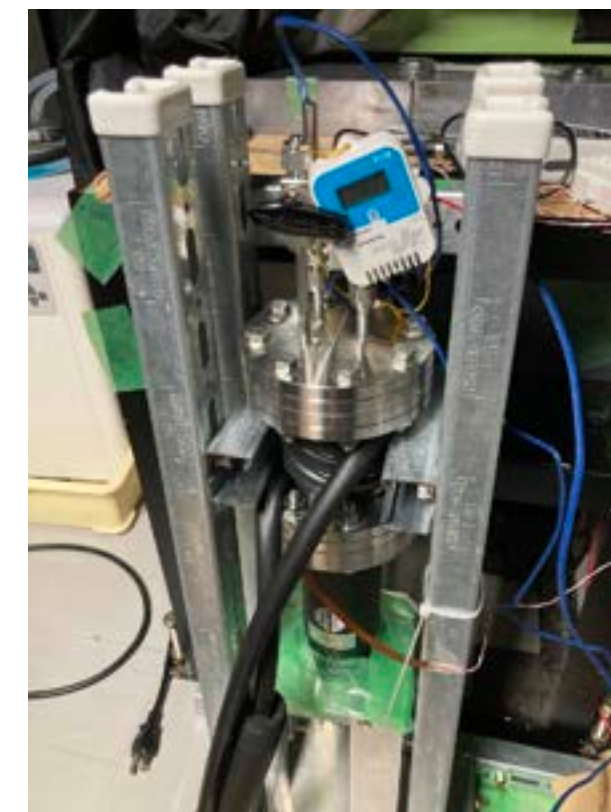
使用可能

* 高圧・低温下での液体シンチレータ性能評価

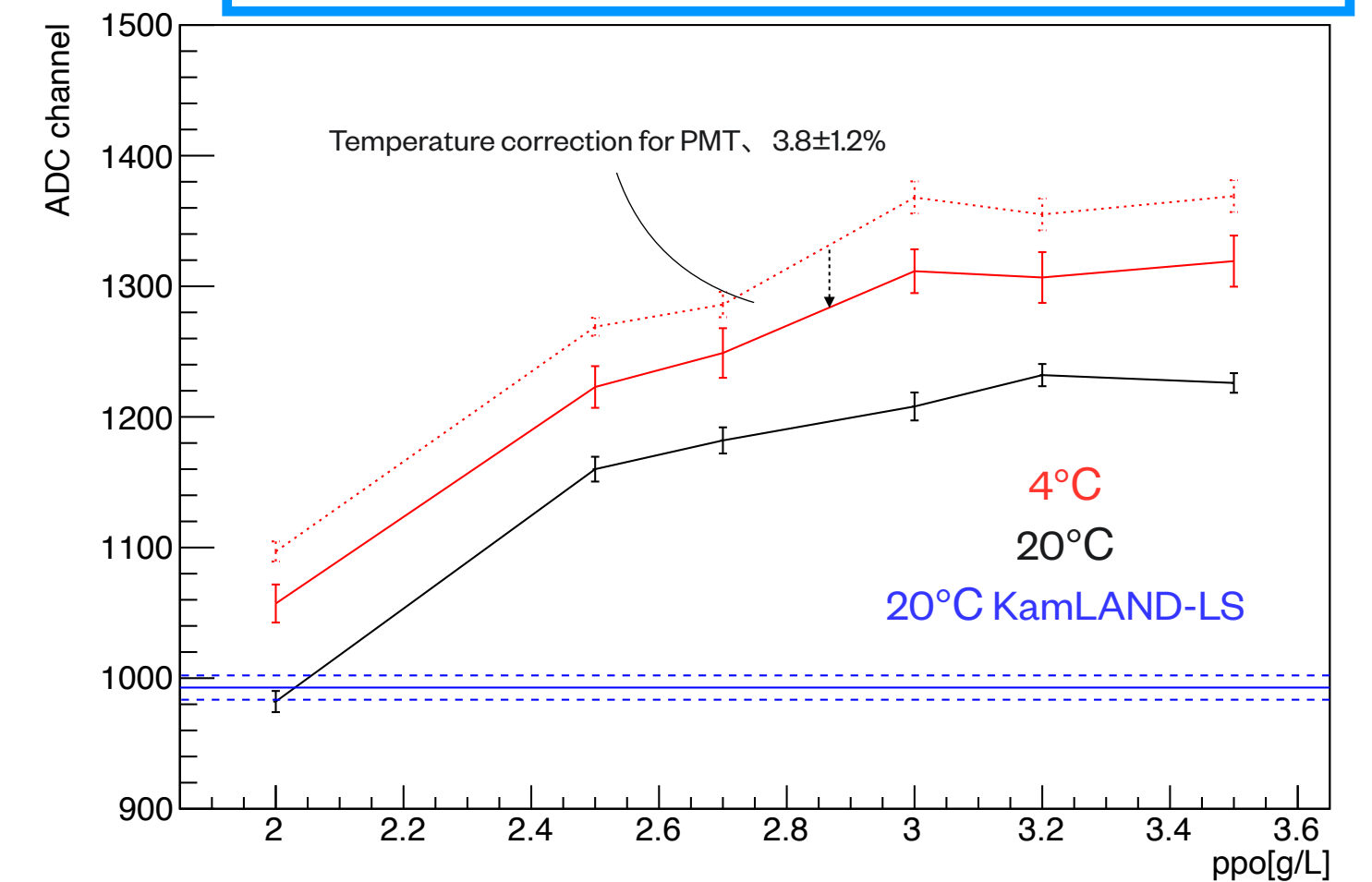
リニアアルキルベンゼン(油) + PPO(蛍光物質)

低温下でチェック (高圧下は今後)

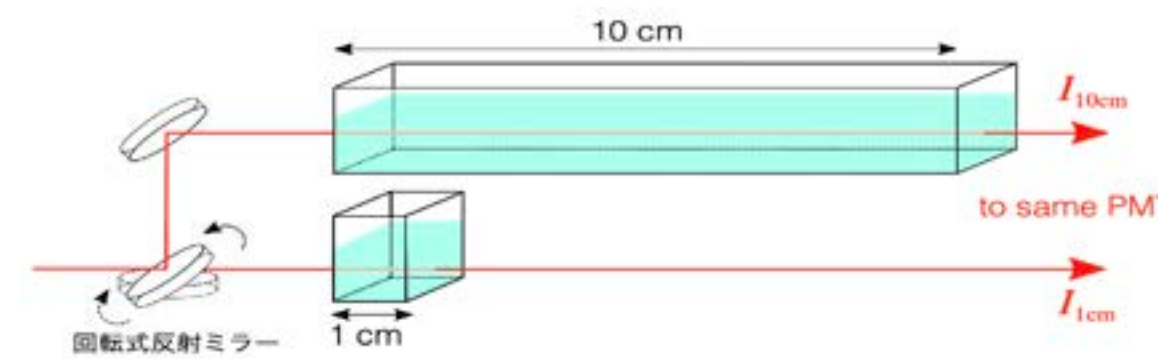
発光量



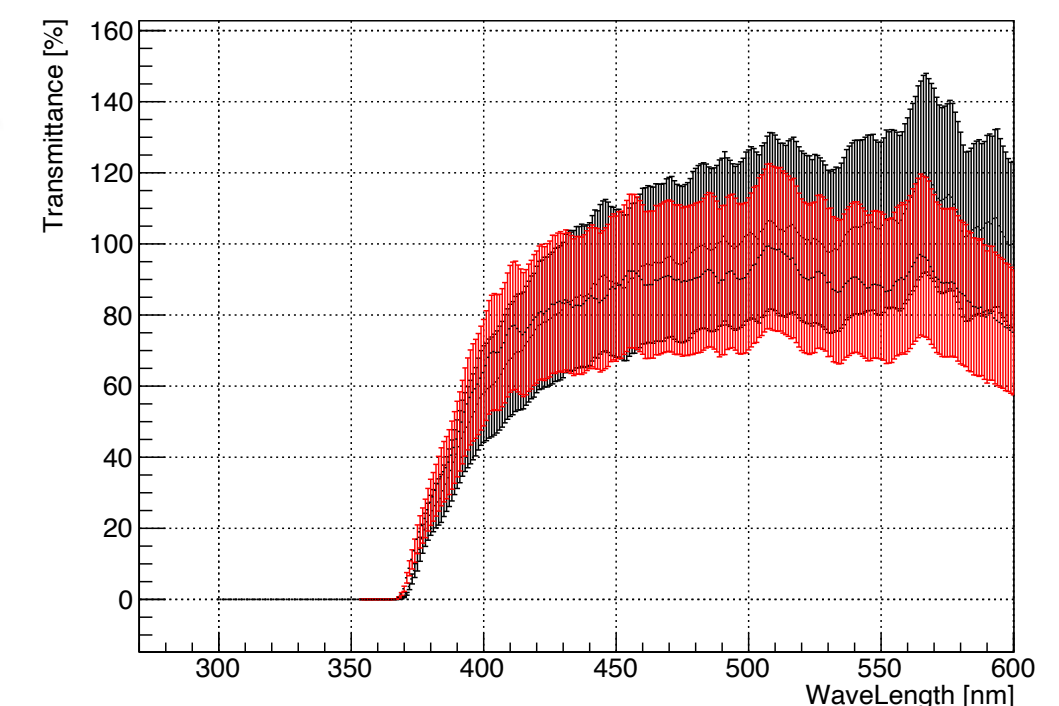
20°Cより4°Cの方が+9%



透過率



低温下でも変化なし



技術開発をスタート

- 地球ニュートリノは地球内部を直接観測する新たなツール

地球内放射性物質量を直接観測する唯一の方法

- KamLANDは2005年に初観測以来、現在も世界最高感度で安定的に観測中

日本発の世界を牽引するサイエンス

- これまでの成果

- 放射性物質起源の熱量を測定
- Th/U重量質量比を測定
- 地球モデルの検証

地球科学的知見を得られる
レベルまで到達

- これからの”ニュートリノ地球科学”

- 海洋地球ニュートリノ検出器 = ブレークスルー
- 海洋実験にしかできない強み： マントル直接測定 & 複数点観測
- 素粒子物理実験としても有用

- 夢の実現に向け

- 海洋実験 + 素粒子物理で実現可能な検出器を議論する場を拡大したい。 海洋技術分野との連携が必須
- 日本発のサイエンス、“新しい目”ニュートリノでの地球深部の直接観測を牽引したい！

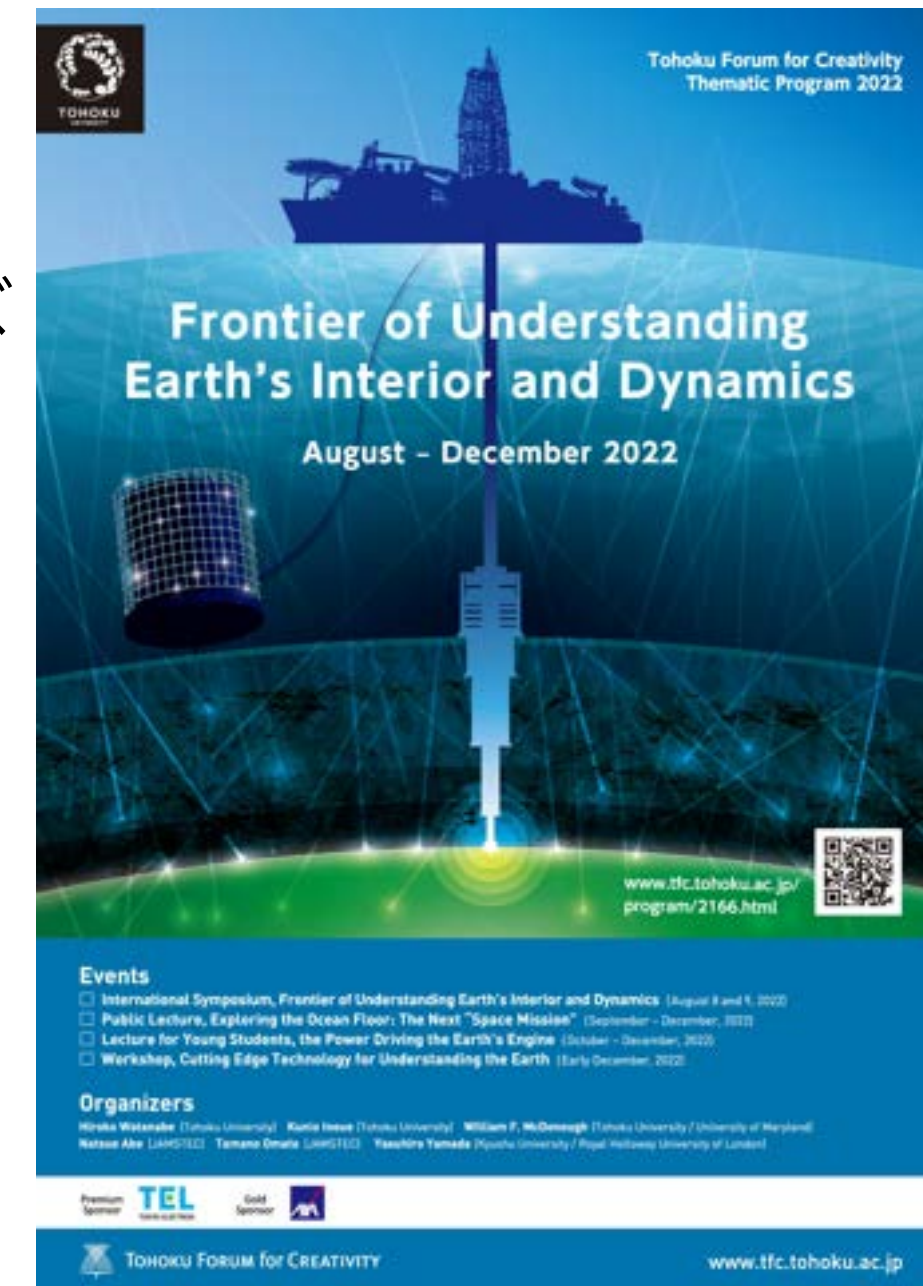
Thematic Program 2022 採択 (Tohoku Forum for Creativity)

- 新分野形成を支援
- 世界的研究者の長期滞在
- 国際ワークショップシリーズ
- 一般向けイベント

* イベント (ハイブリッド)

- * 国際シンポジウム
2022年8月8日-9日

- * 技術関連ワークショップ
2023年1月中旬



参照

* KamLAND地球ニュートリノ観測最新結果 (2022年)

- * 「Abundances of uranium and thorium elements in Earth estimated by geoneutrino spectroscopy」 Geophysical Research Letters, 099566, 2022年
URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL099566>

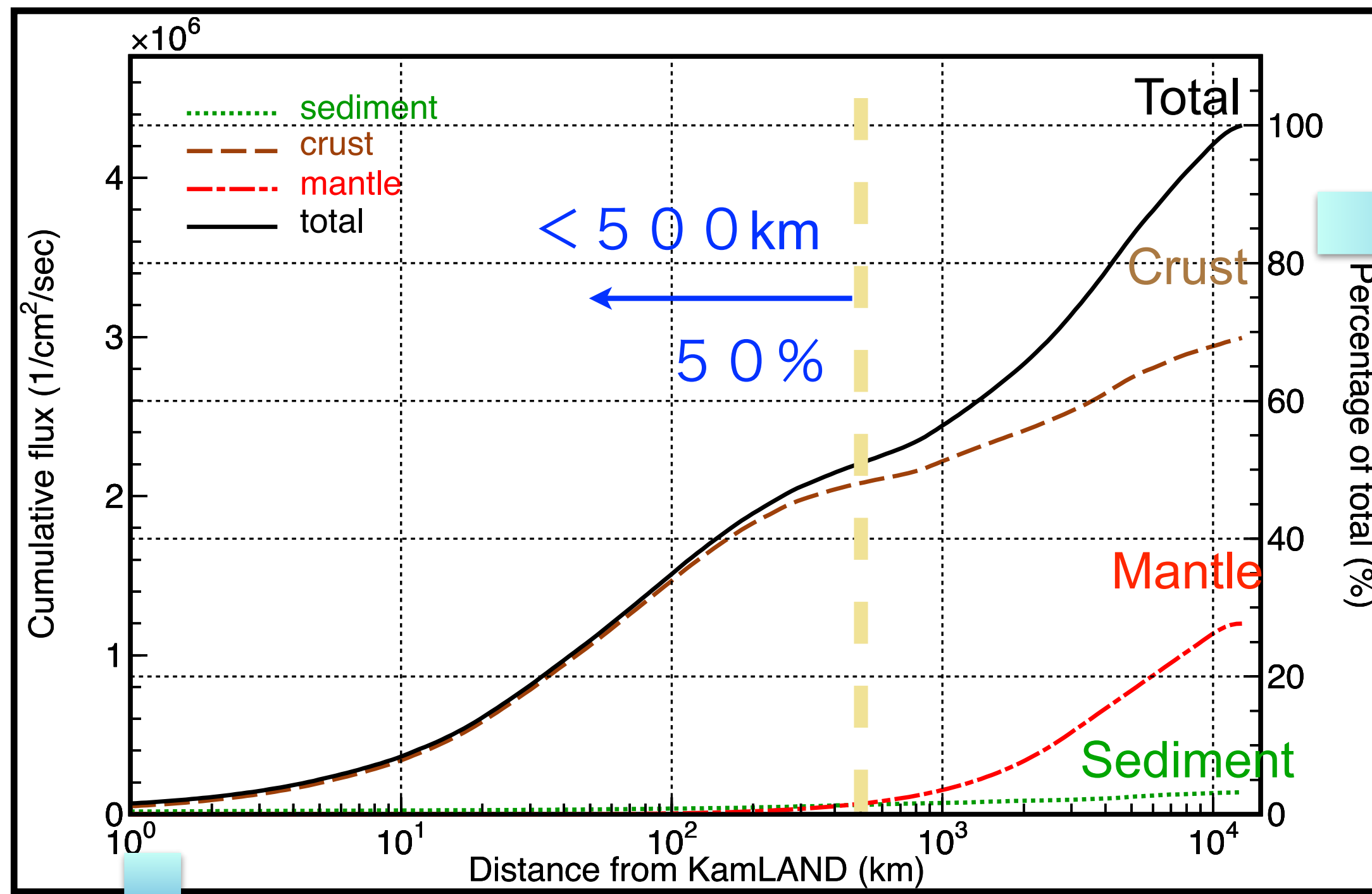
* Ocean Bottom Detector (海洋底ニュートリノ観測プロジェクト)

- * 「Study of Ocean Bottom Detector for observation of geo-neutrino from the mantle」, Journal of Physics: Conference Series, 2156, 012144, 2021年,
T. Sakai et al. (TAUP2021 Proceedings,査読有)
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2156/1/012144>
- * 「Ocean Bottom Detector」, Snowmass 2021-Letter of Interest, 2022年, T. H. Watanabe et al.
URL: https://www.snowmass21.org/docs/files/summaries/NF/SNOWMASS21-NF4_NF10_OceanBottomDetector-201.pdf

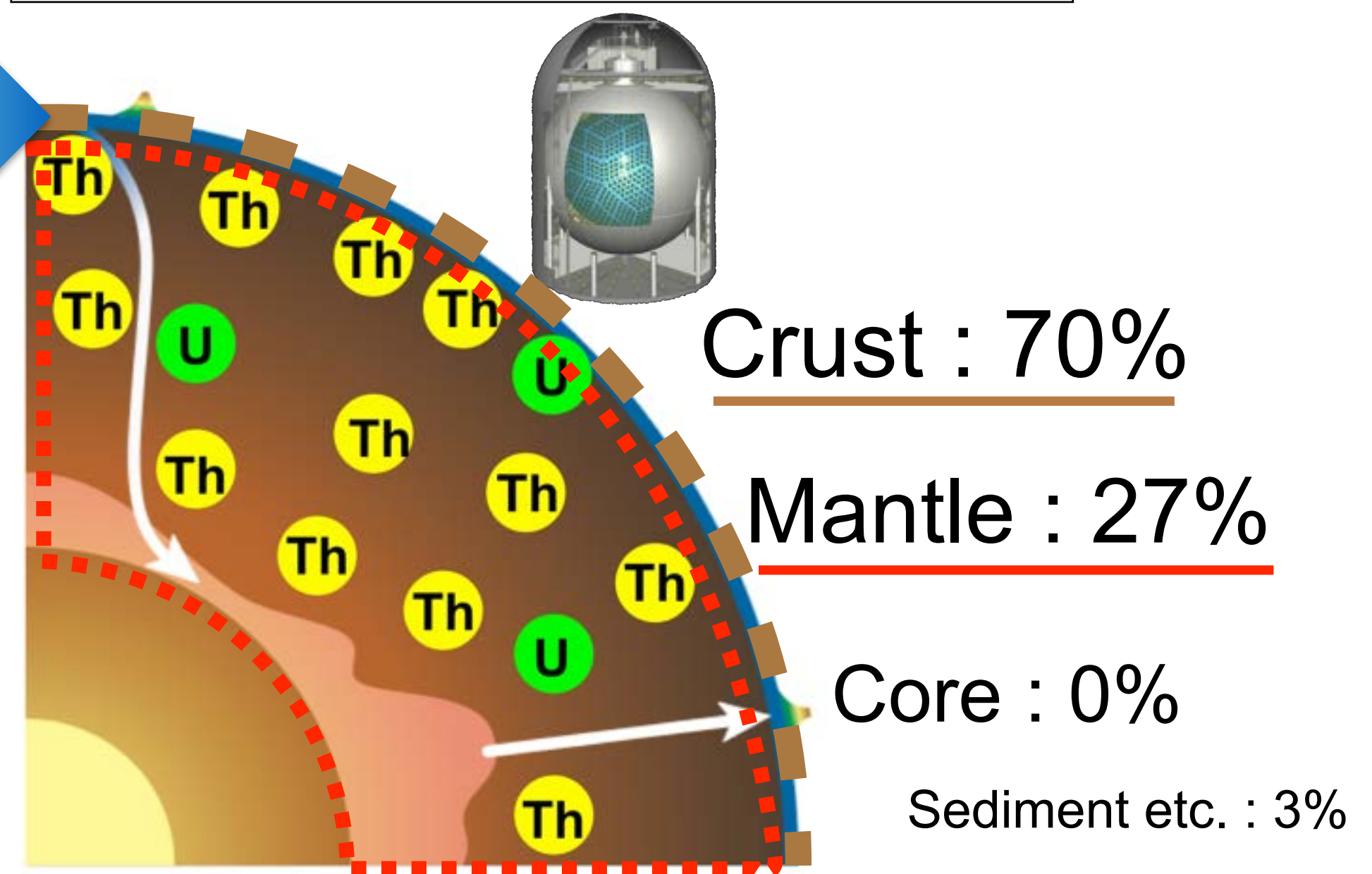
- * 号外地球 海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦-地球最大のフロンティアに挑む-」の12章
「掘削とニュートリノ: マントルを見る」, 海洋出版社, 2022年発行, 渡辺寛子, W. F. McDonough
URL: <https://j-desc.org/publication/> (J-DESC HP内)

- * 東北大学 Thematic Program 2022 「Frontier of Understanding Earth's Interior and Dynamics」
URL: <https://www.tfc.tohoku.ac.jp/program/2166.html>

Geo-neutrino Flux in Kamioka



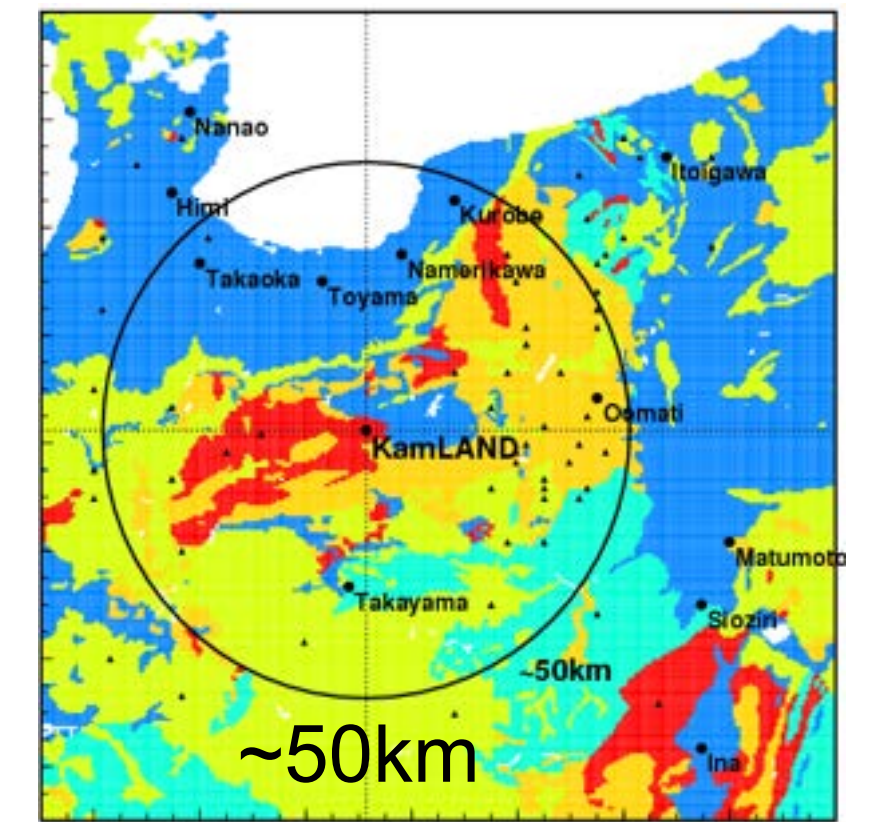
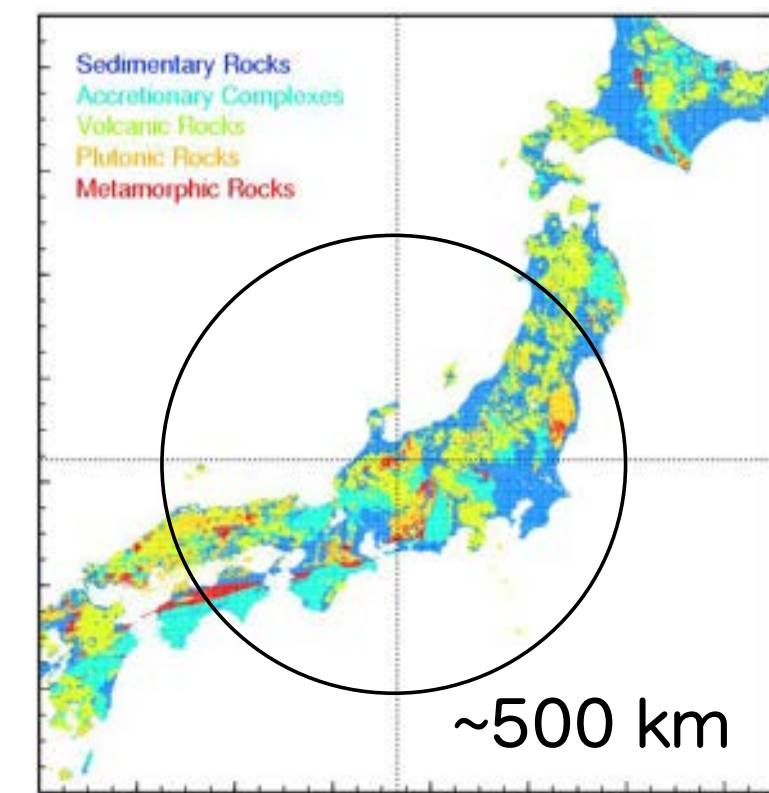
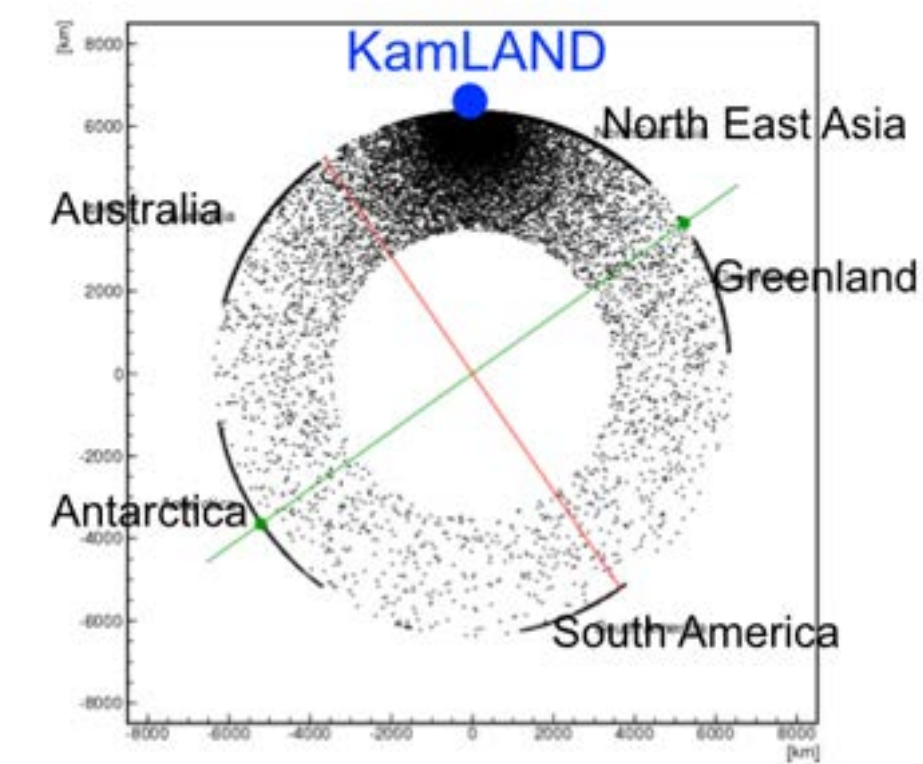
Contributions from each part



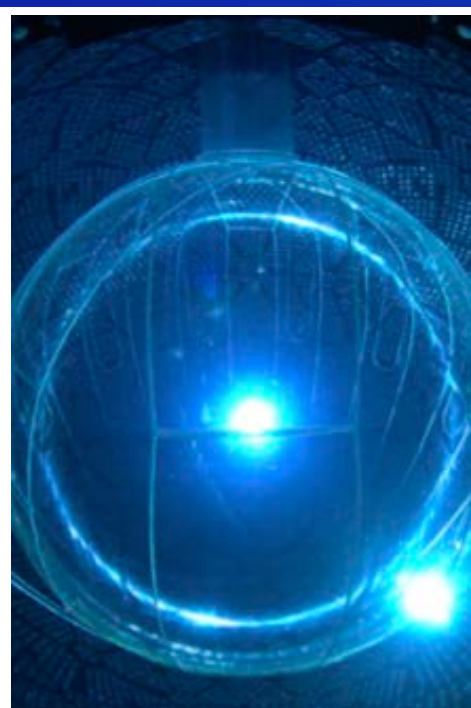
Contributions from each area

- 50%: distance < 500km
- 25%: distance < 50km
- 1~2%: from Kamioka mine

Important to understand local geology



Anti-neutrino Detectors



SNO+

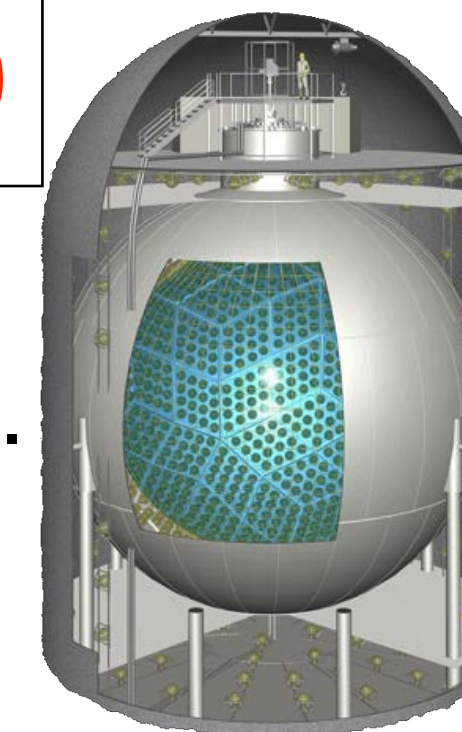
1 kt, LS+, 5.4 km.w.e.
running

Baksan

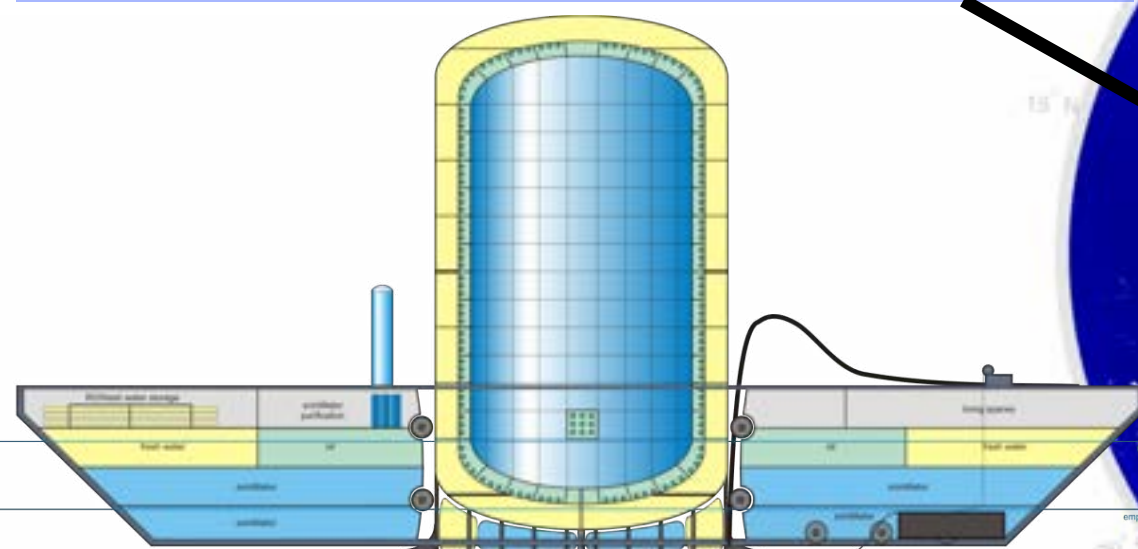
~10 kt, LS
4.8 km.w.e.
R&D

KamLAND

1 kt, LS
2.7 km.w.e.
running



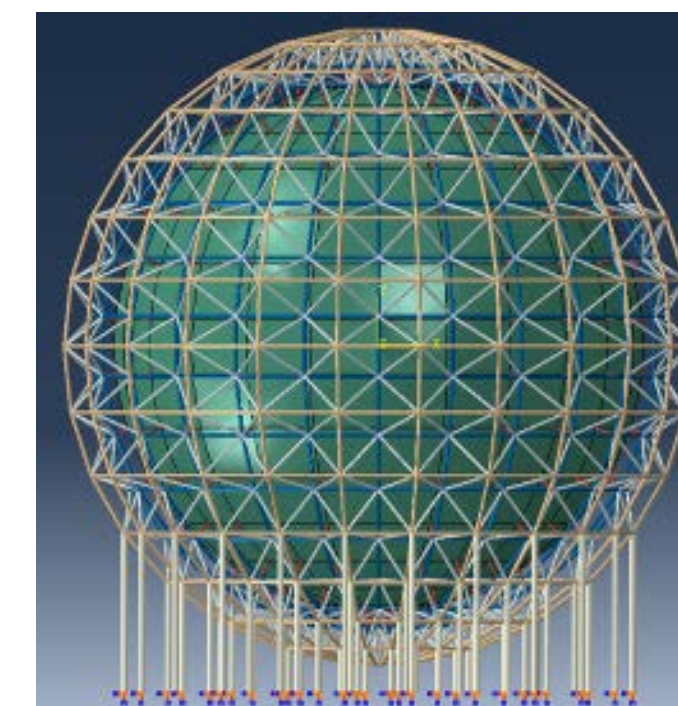
Ocean Bottom Detector



10-50 kt, LS, ~5 km.w.e.
movable, R&D



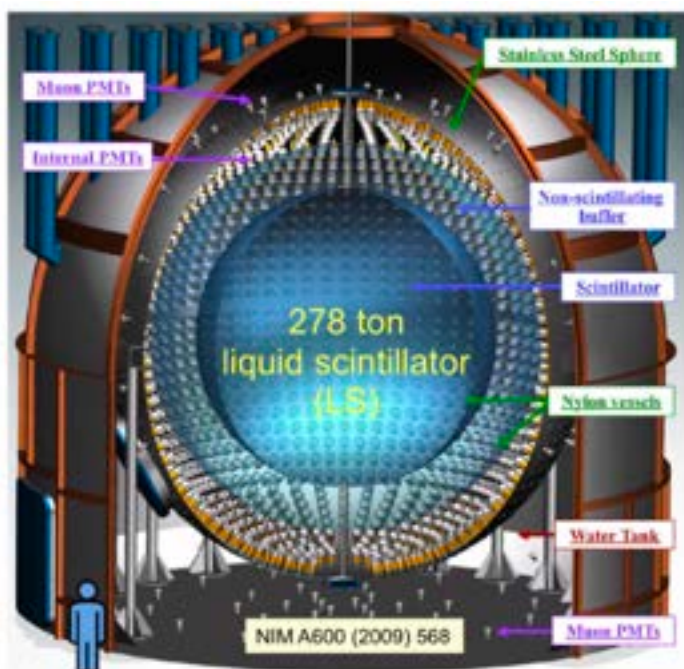
JUNO



20 kt, LS
1.5 km.w.e.
under construction
(2023~)

Borexino

0.3 kt, LS
3.8 km.w.e.
shutdown
October 7, 2021



ANDES

~3 kt, LS
4.5 km.w.e.
R&D

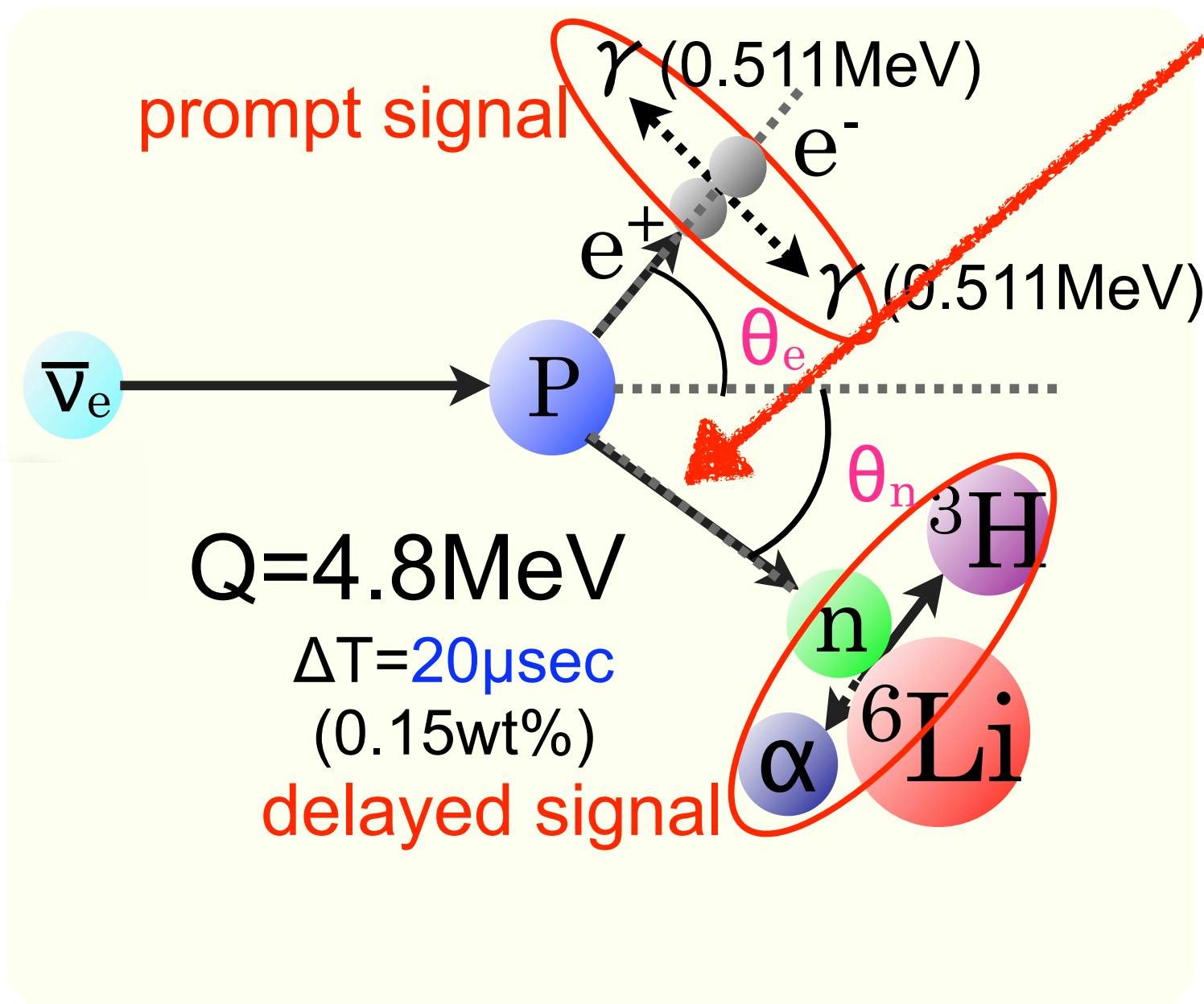
Jinping

1 kt, LS
7.5 km.w.e.
Scheduled



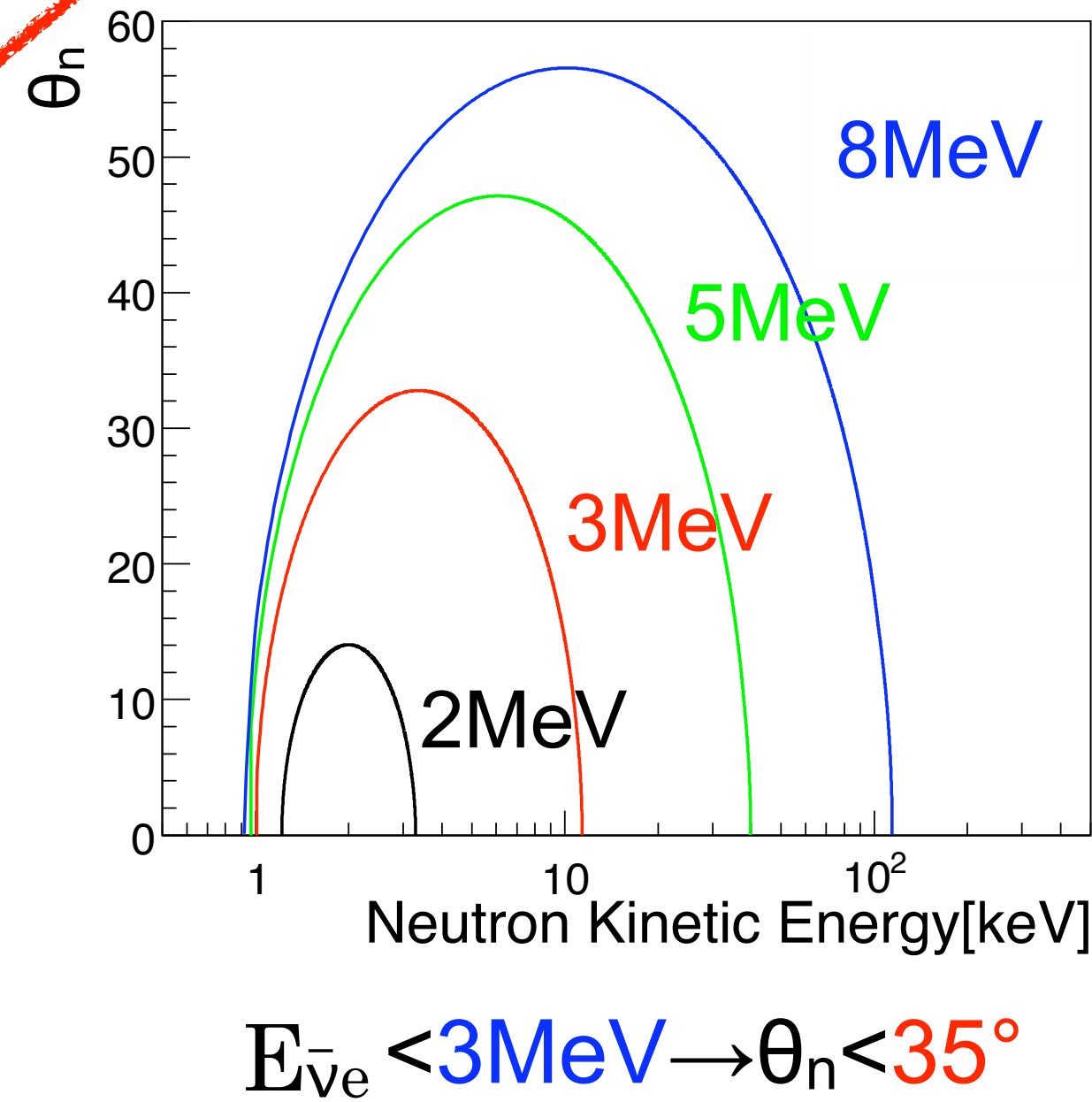
Directionality

Li loaded liquid scintillator

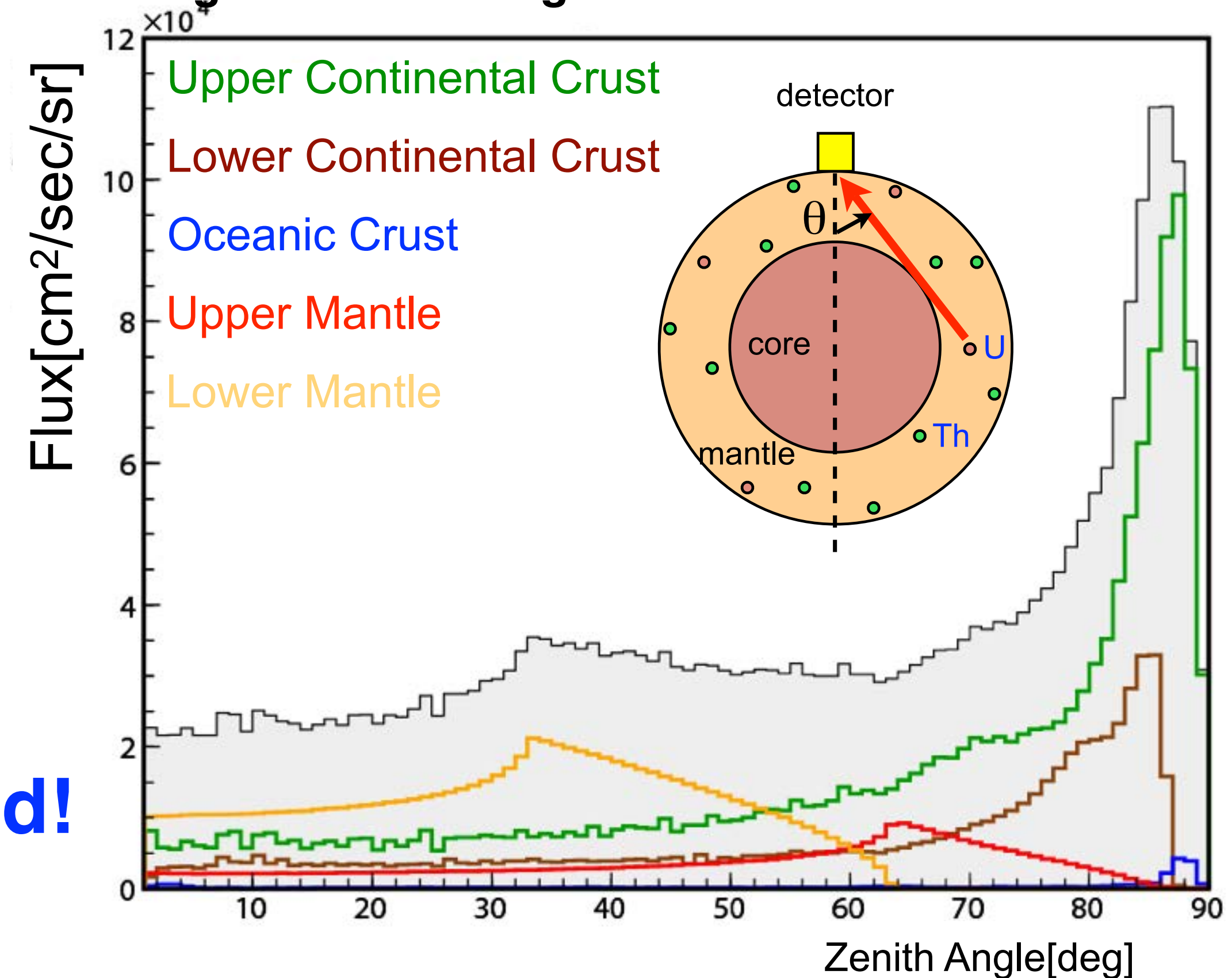


Neutron has directional information of anti-neutrino

PRD 60, 053003 (1999), P. Vogel & J. F. Beacom



geo-neutrino angular distribution @Kamioka



WANTED

${}^6\text{Li}$ loaded liquid scintillator

→ **completed!**

high vertex resolution detector

→ **ongoing**

^{40}K Geo-neutrinos

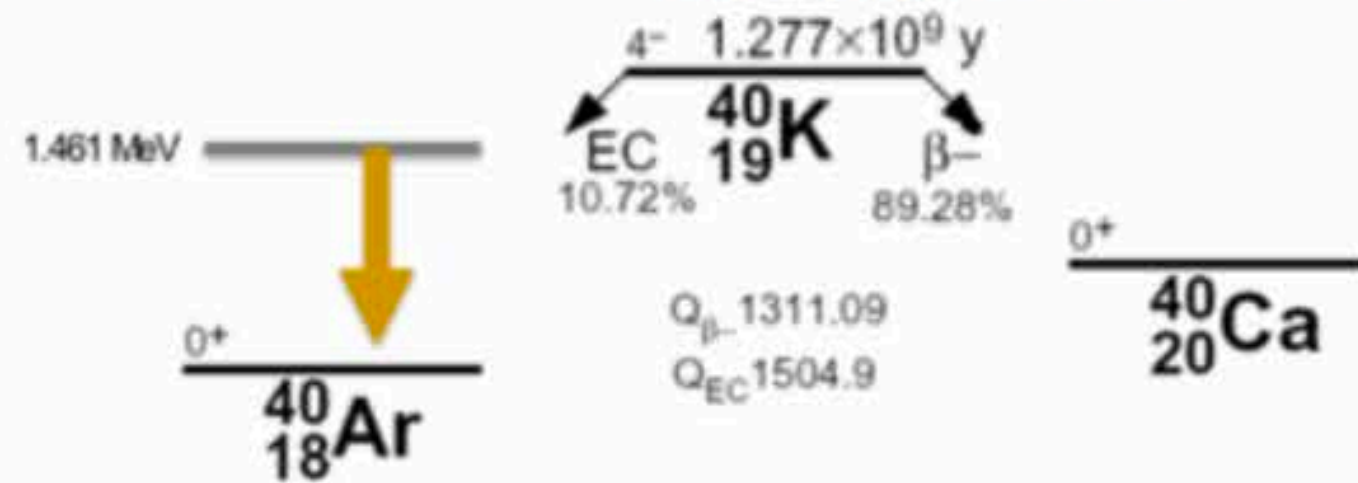
Motivation

- ~16% of Earth's radiogenic heat is from ^{40}K
 - K may reside in the Earth's core?
- ^{40}K geoneutrino measurement is useful to know amount and distribution

^{40}K Decay

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

ref) 1.44 MeV pep solar ν : $1.42 \times 10^8 \text{ /cm}^2/\text{s}$

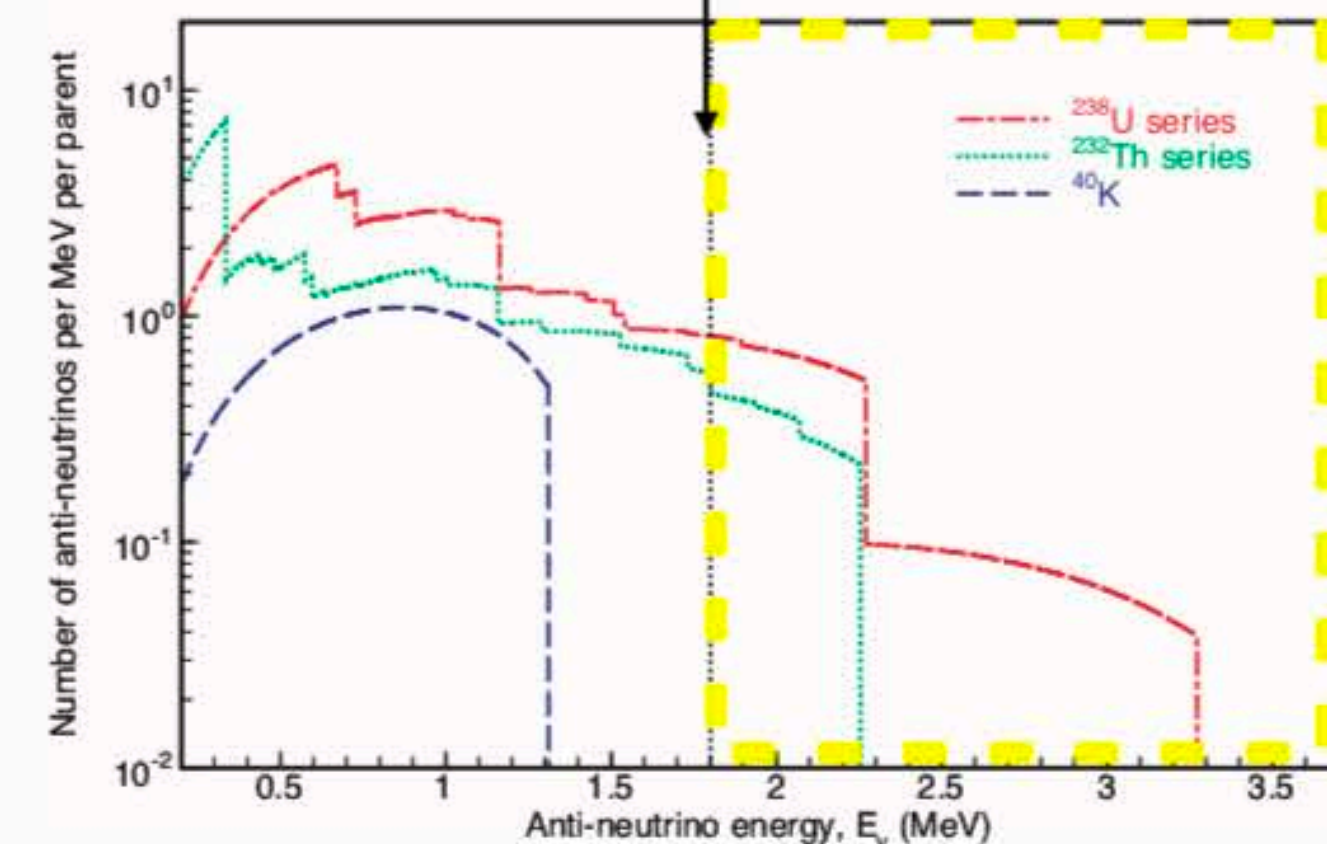


^{40}K Anti-neutrino

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

requires electron recoil directionality due to large flux of solar neutrinos

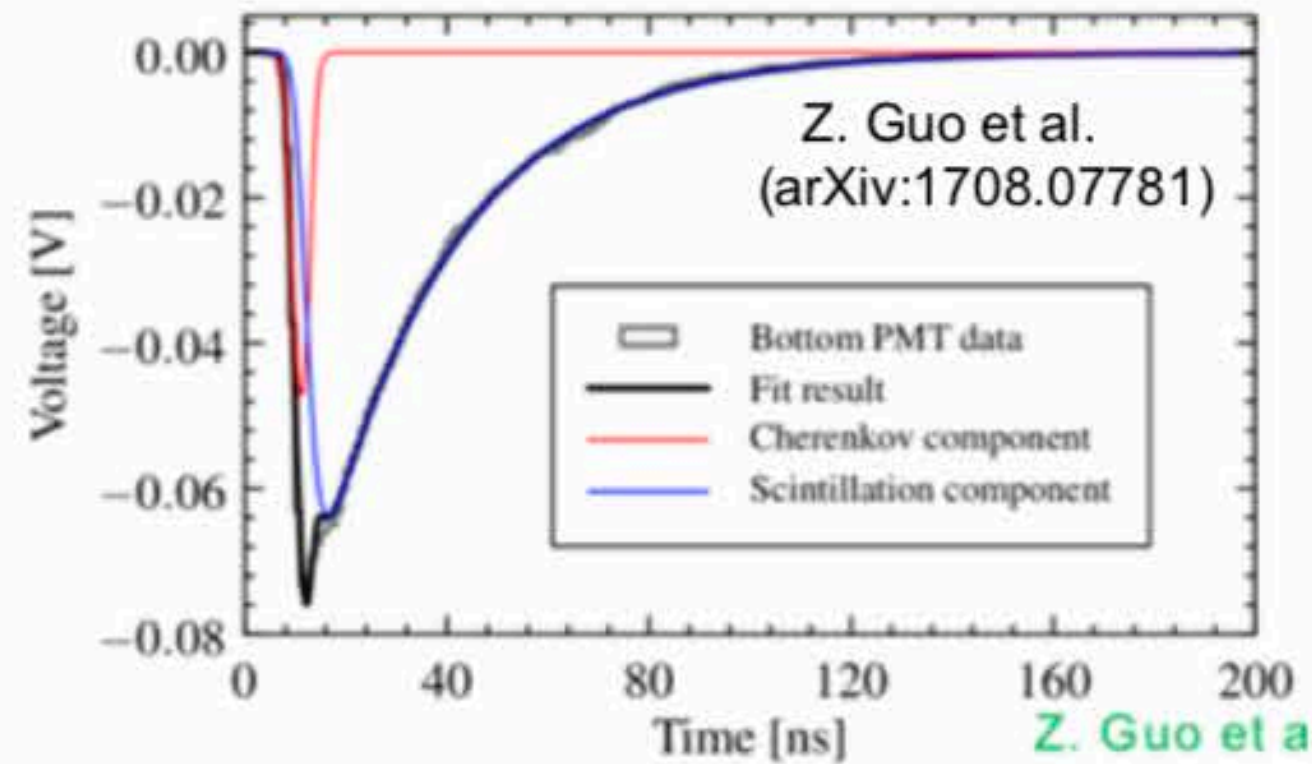
Energy threshold, 1.8 MeV



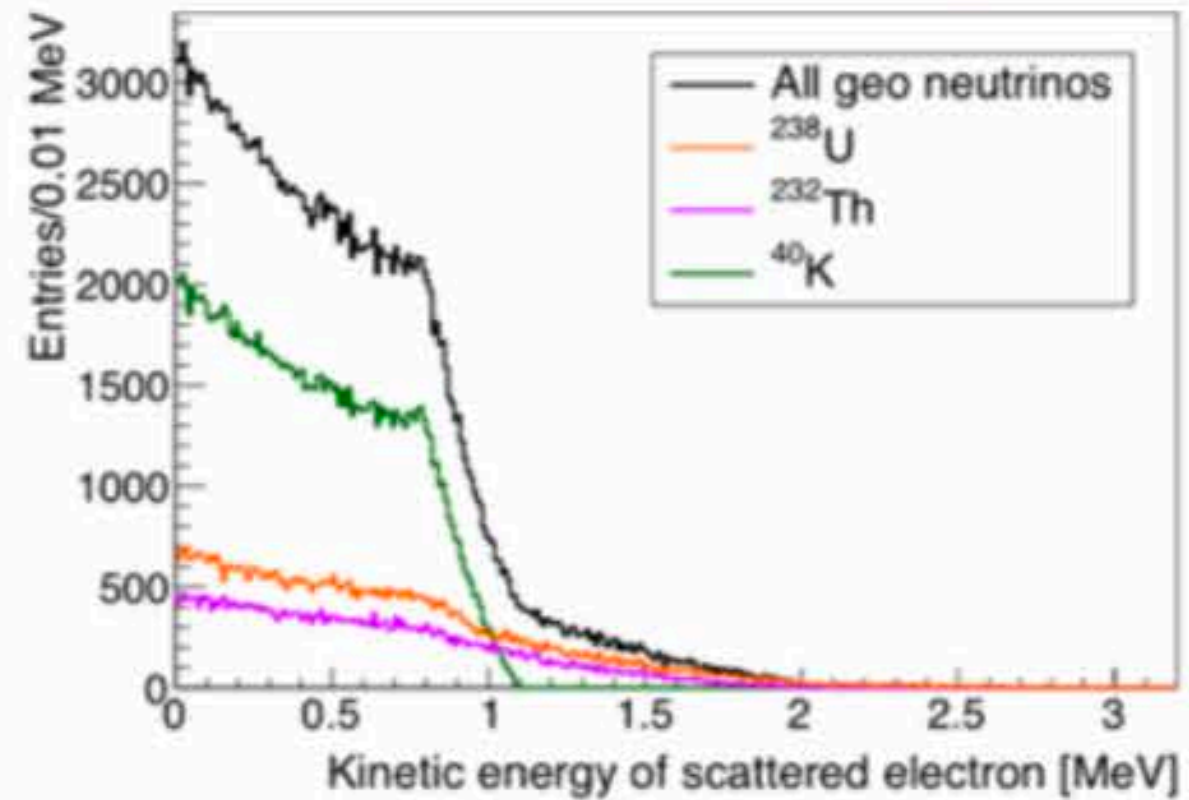
^{40}K Geo-neutrinos: Scattering

Liquid Scintillator Cherenkov Neutrino Detector

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



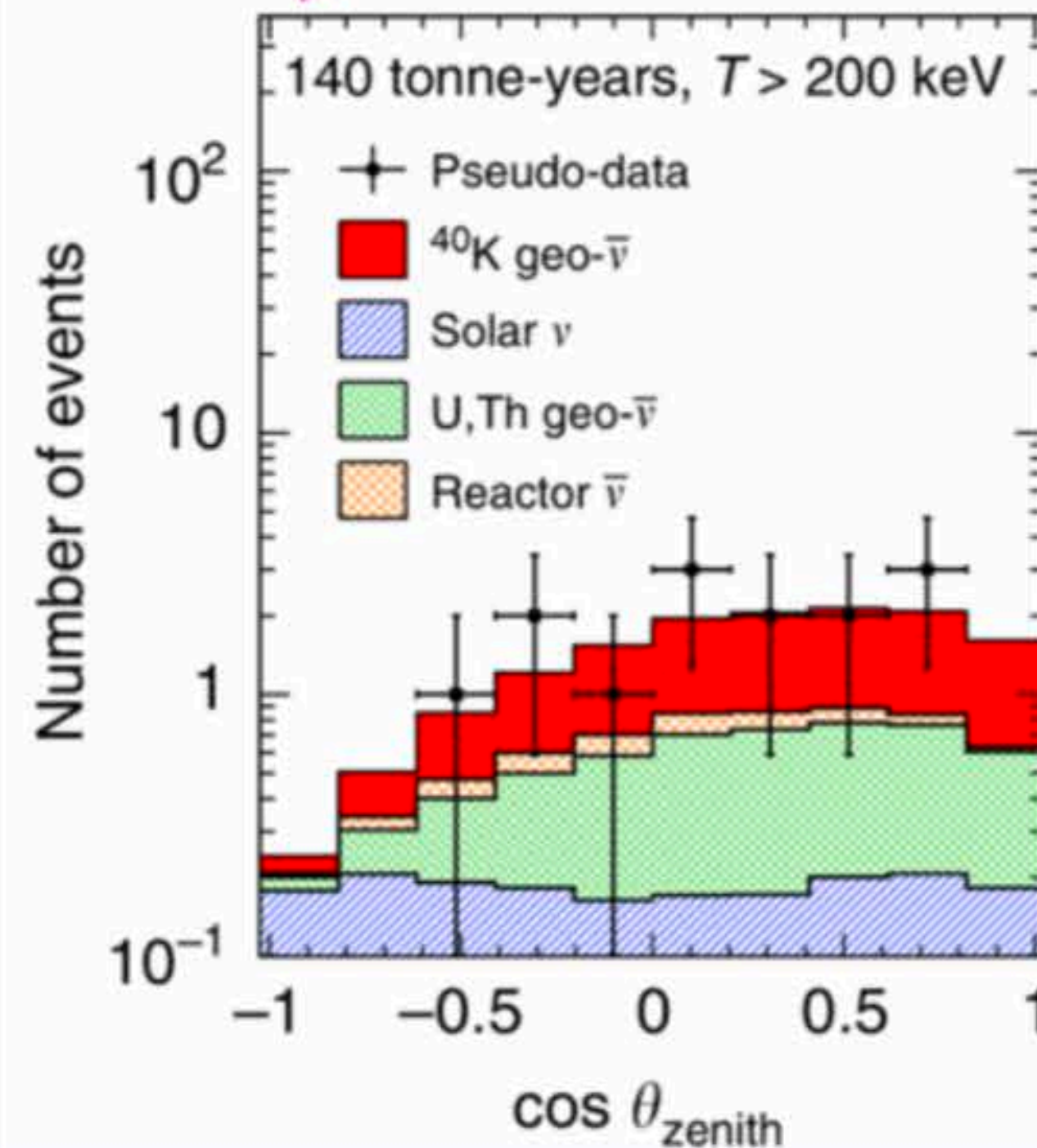
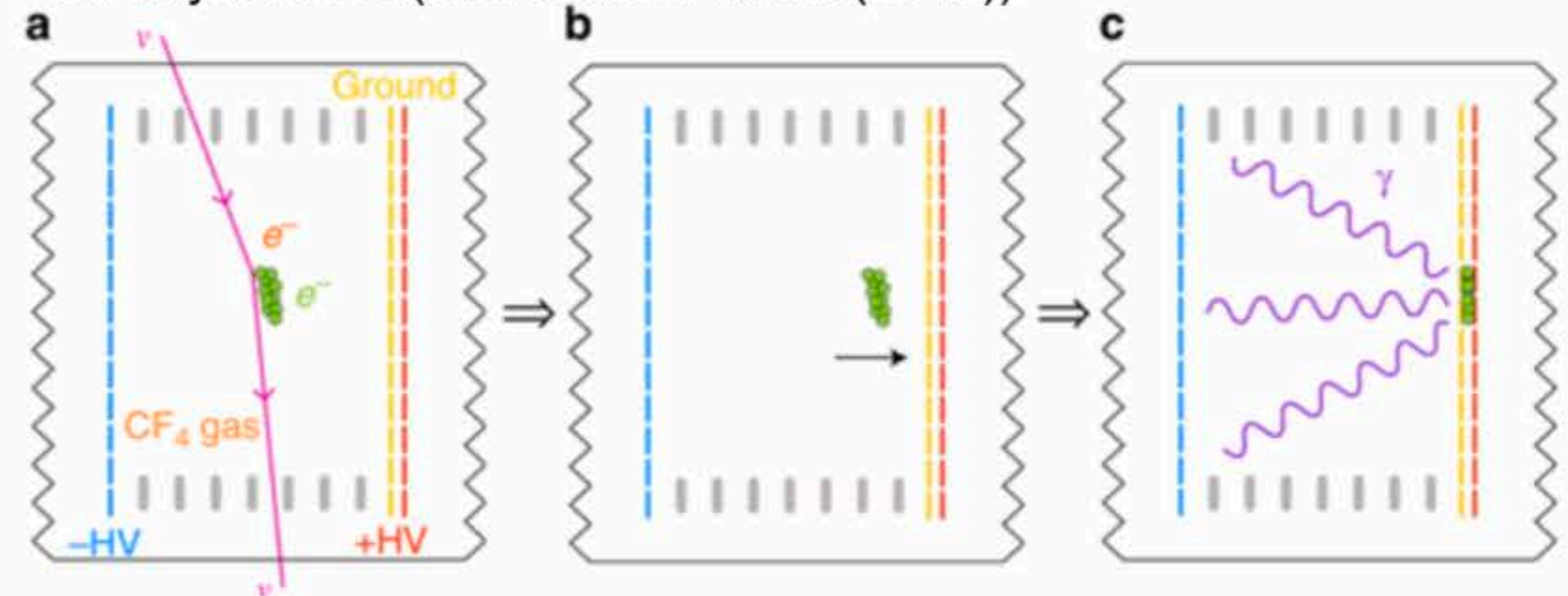
Z. Guo et al. (arXiv:1708.07781)



- Slow LS. Cherenkov and scintillation can be measured.
- Cherenkov \rightarrow Directional information
- Serious effects from solar ν and radioactive background

Gas TPC

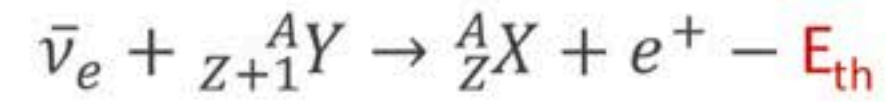
M. Layton et al. (Nat. Comm. 15989(2018))



- Huge gas chamber (cf. CF_4)
- Technically difficult

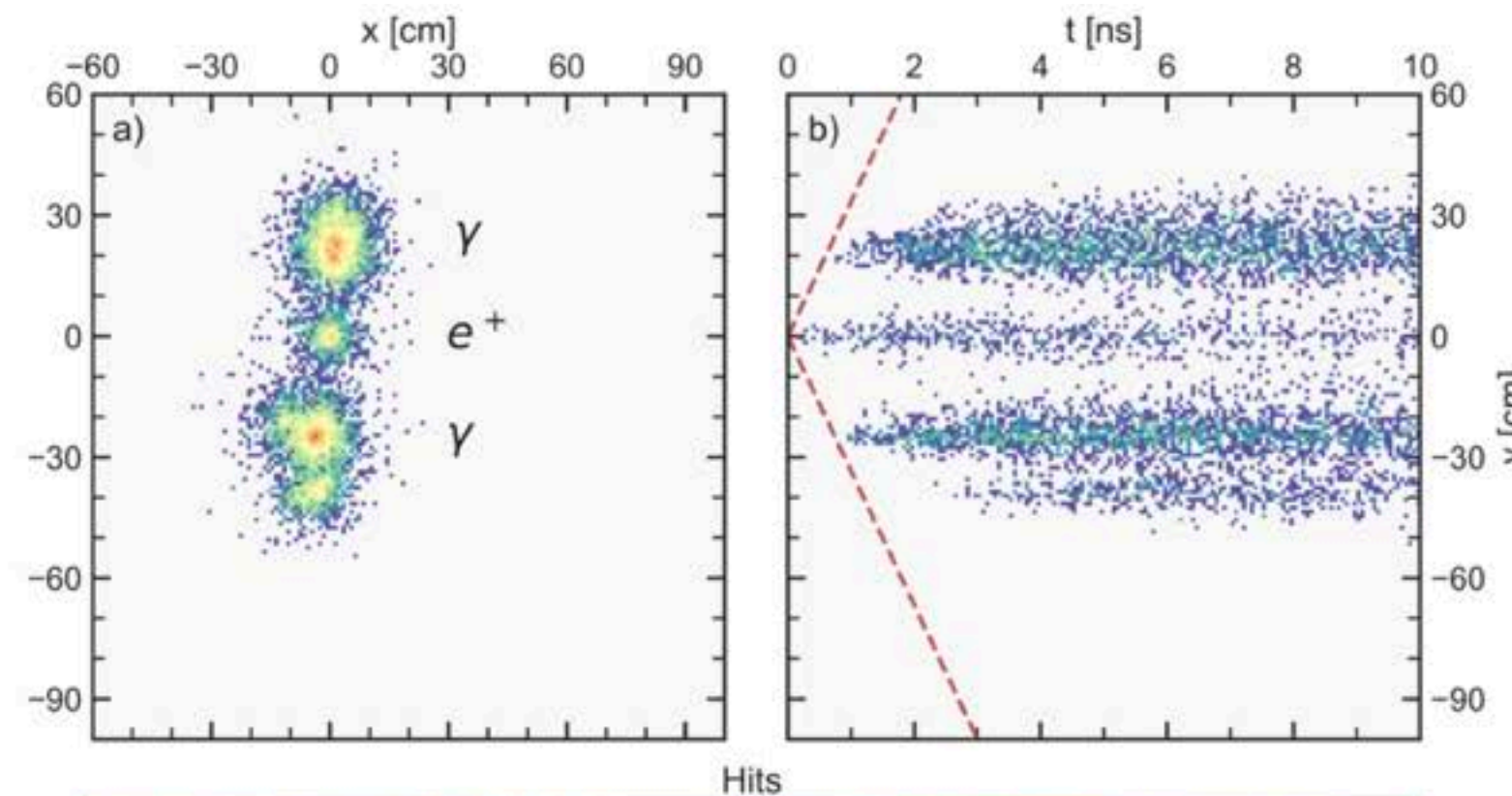
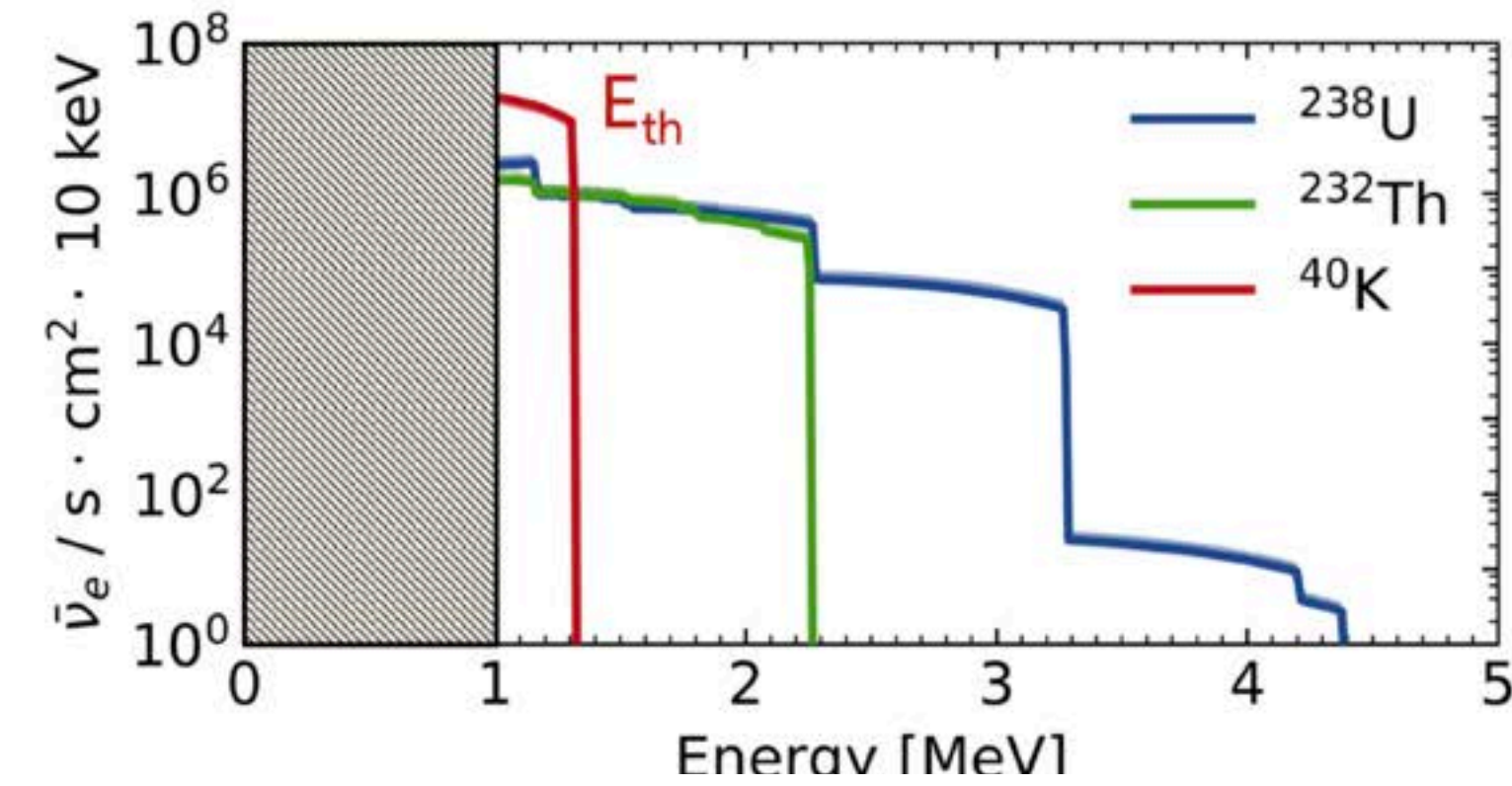
^{40}K Geo-neutrinos: LiquidO

In order to detect ^{40}K - $\bar{\nu}_e$ we could use:



We shall require:

- $E_{\text{th}} < 1.3 \text{ MeV}$
- High cross-section
- High Y natural isotopic abundance



^{35}Cl loaded LiquidO

