

「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

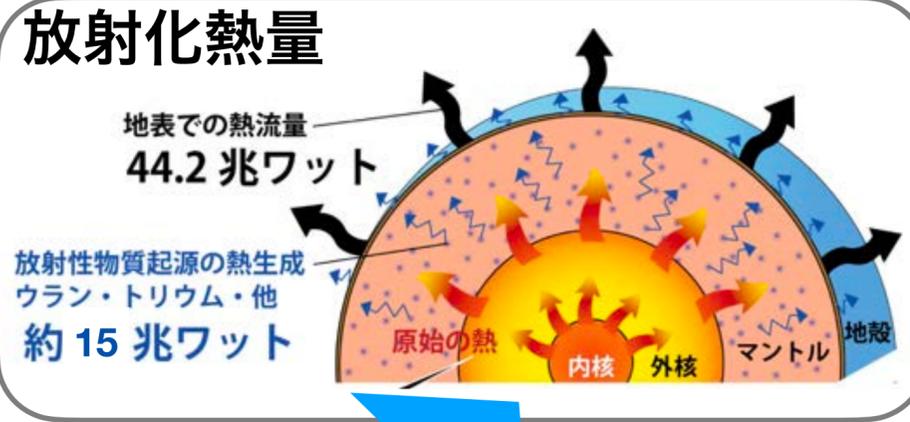
渡辺 寛子 ([hiroko@awa.tohoku.ac.jp](mailto:hiroko@awa.tohoku.ac.jp))

東北大学ニュートリノ科学研究センター

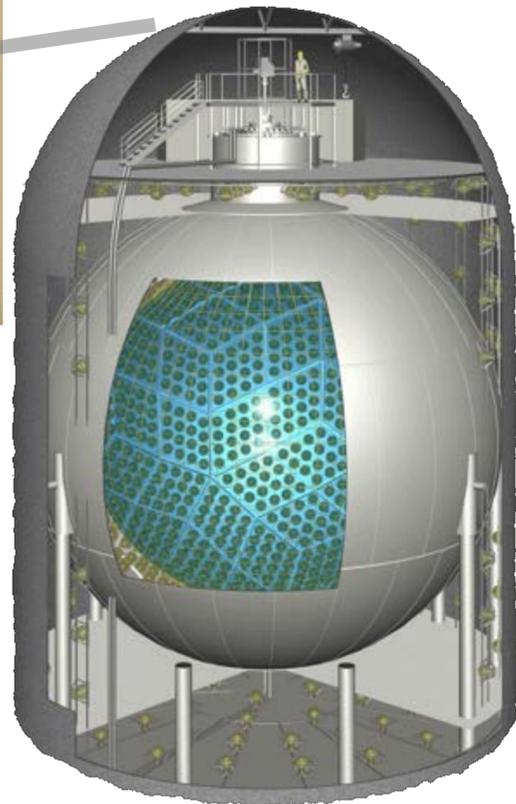
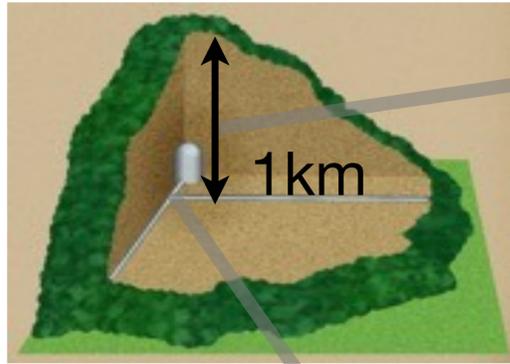
研究室HP



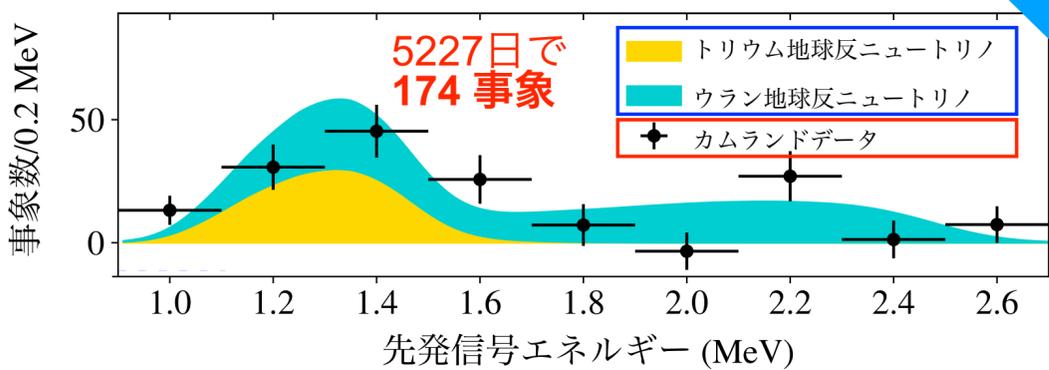
## 海洋底ニュートリノ観測



### ニュートリノ観測



### 2022年発表観測結果



素粒子物理

地球科学

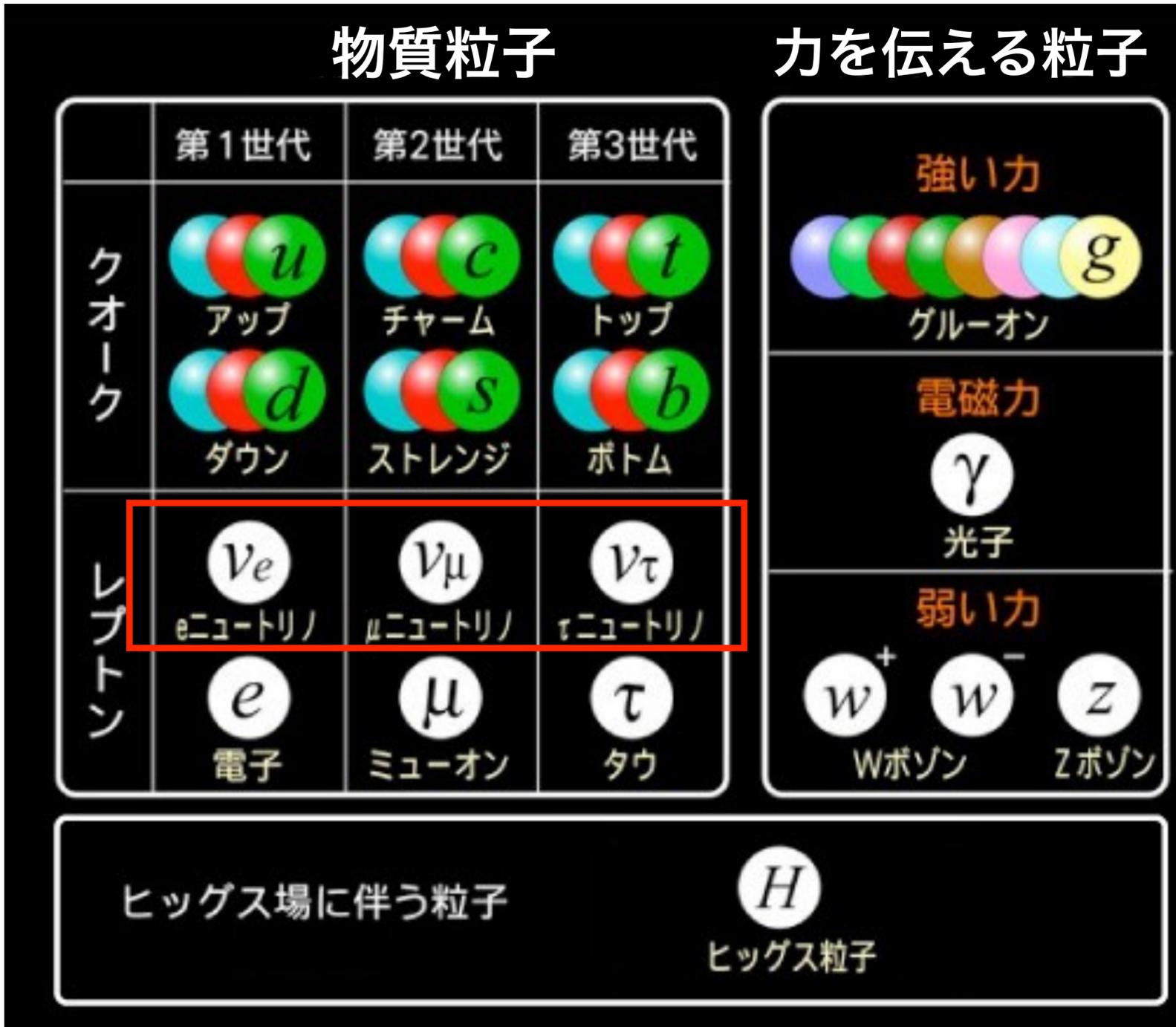
海洋技術

地球科学的知見へ翻訳

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/cm<sup>3</sup>

$\nu$ : 300個/cm<sup>3</sup>

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

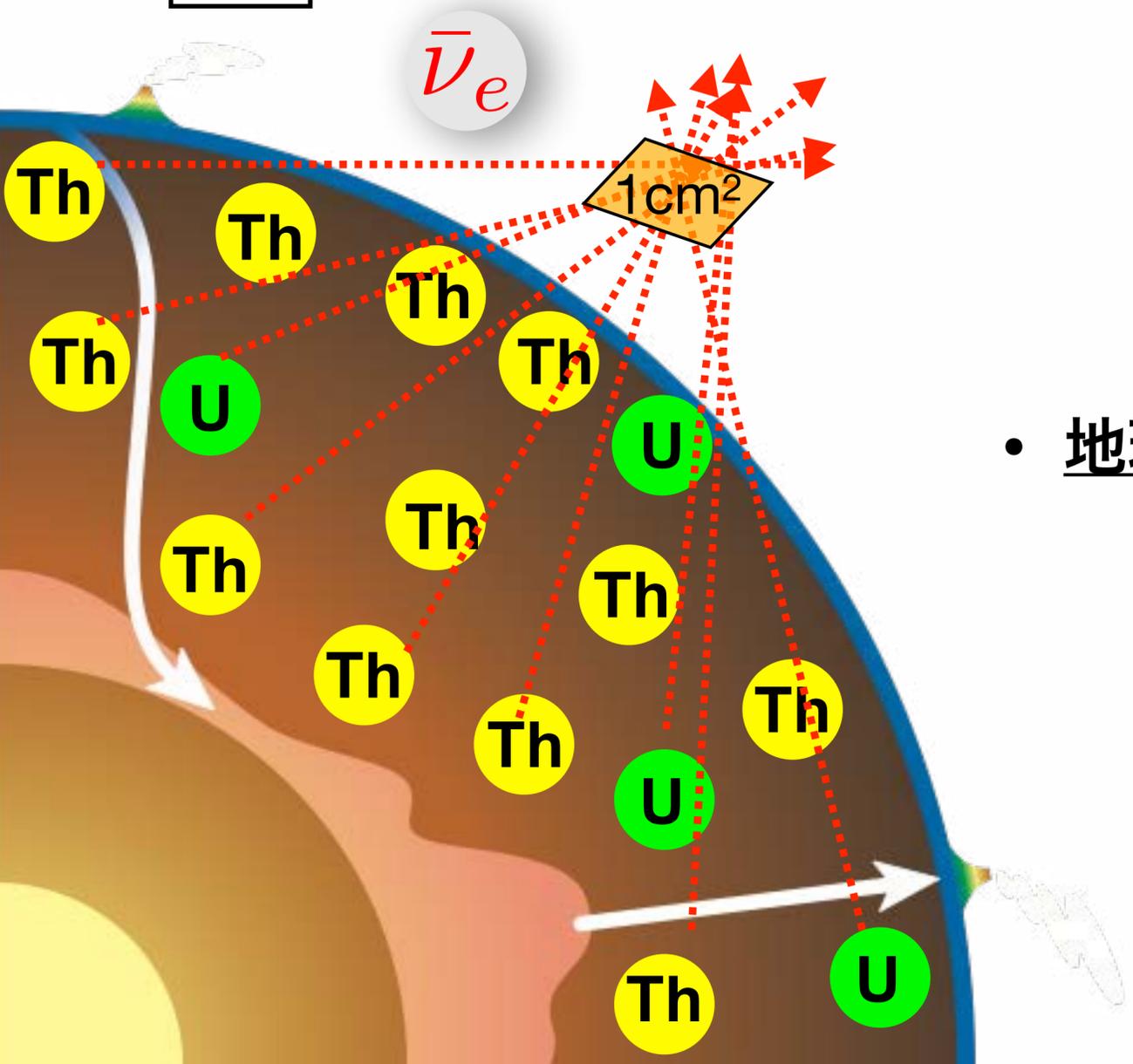
- 地球ニュートリノとは  
地球内放射性物質の崩壊によって生じる反ニュートリノ

観測 1ヶ月に1事象/1kt検出器

流量 1秒間に400万個/1cm<sup>2</sup>

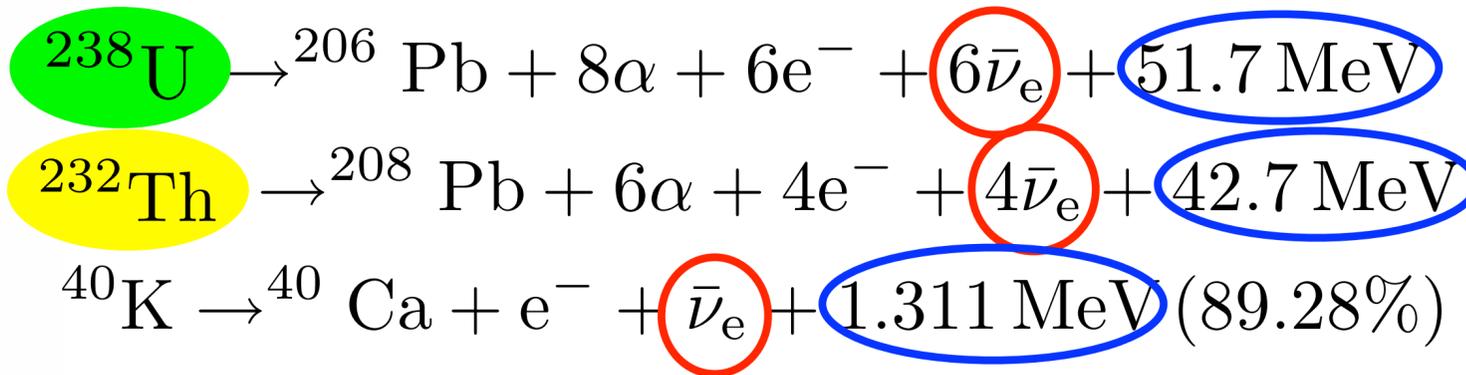
地球の熱源

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

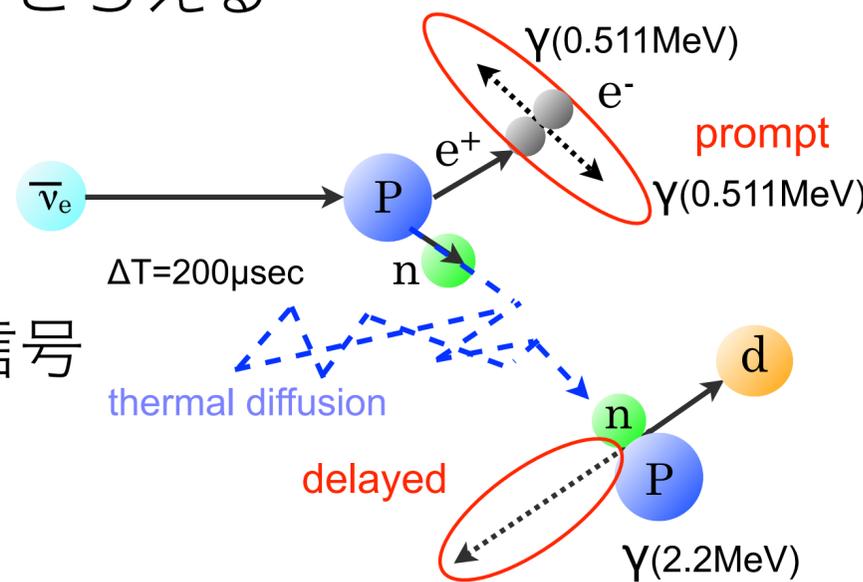
1,879本の光電子増倍管で光をとらえる

- 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

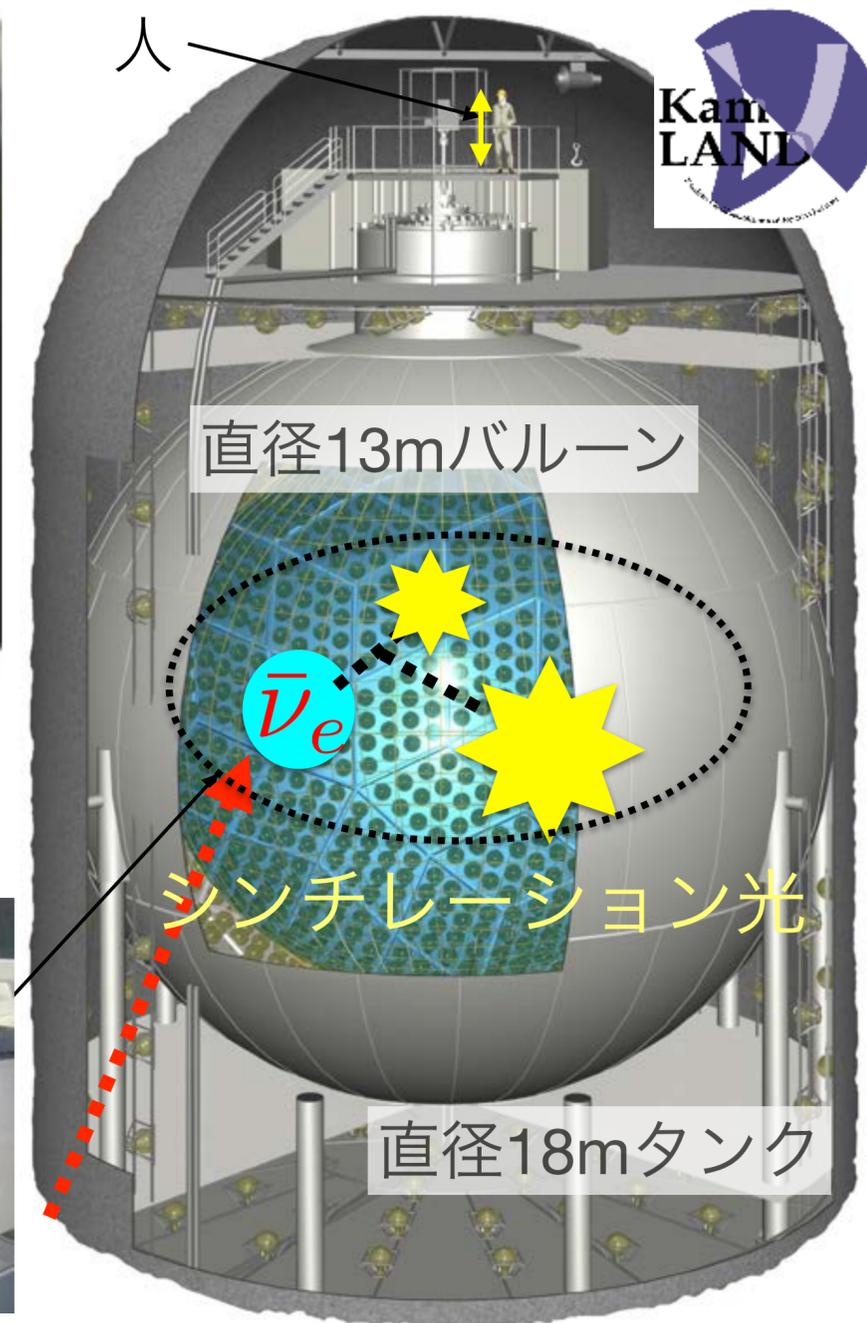
→バックグラウンドを1/10<sup>4</sup>に



水の約100倍明るい



光電子増倍管

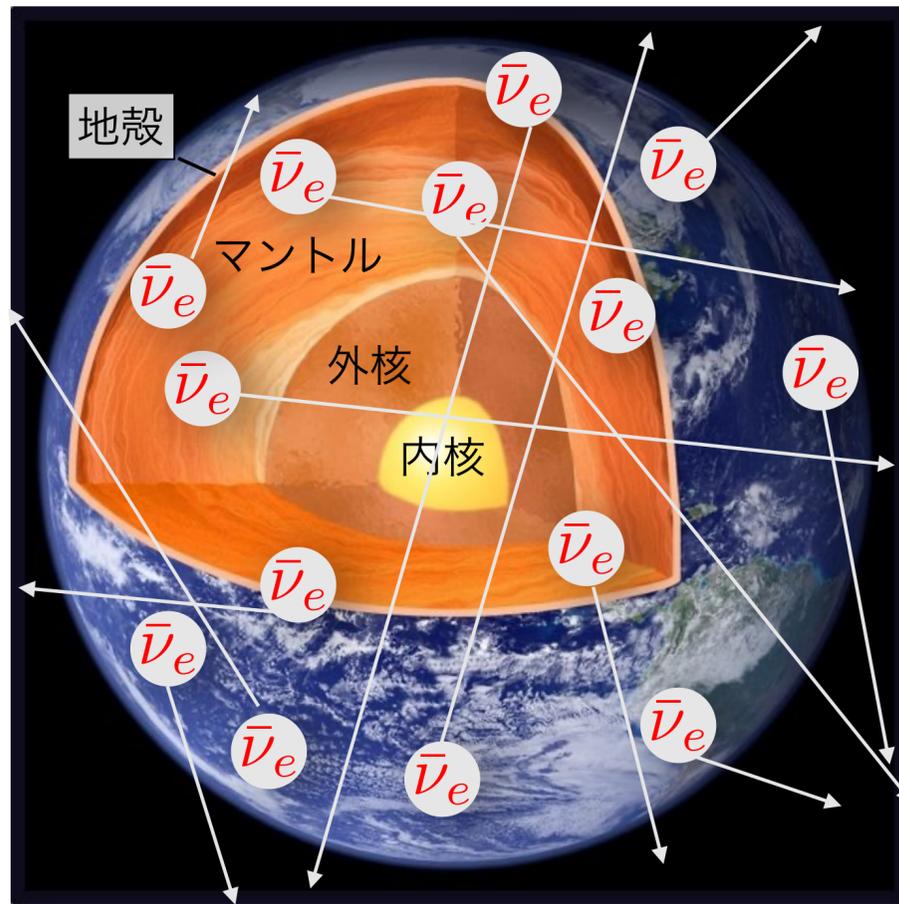


- 低エネルギーニュートリノ観測に特化

太陽ニュートリノ, 原子炉ニュートリノ, 地球ニュートリノ, 超新星ニュートリノ etc

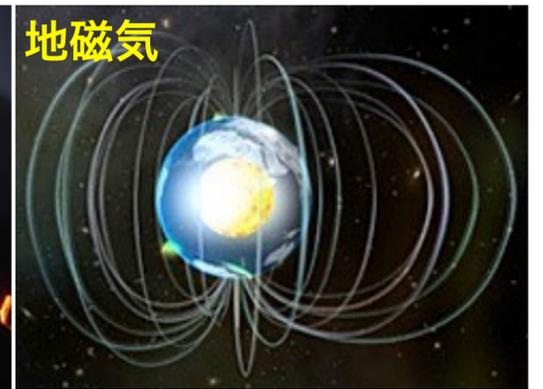
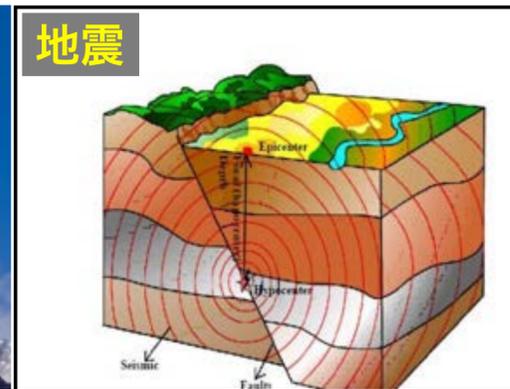
ref) Super-Kamiokande (50倍の体積):

水をターゲットにしたより高エネルギーのニュートリノ観測



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



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！



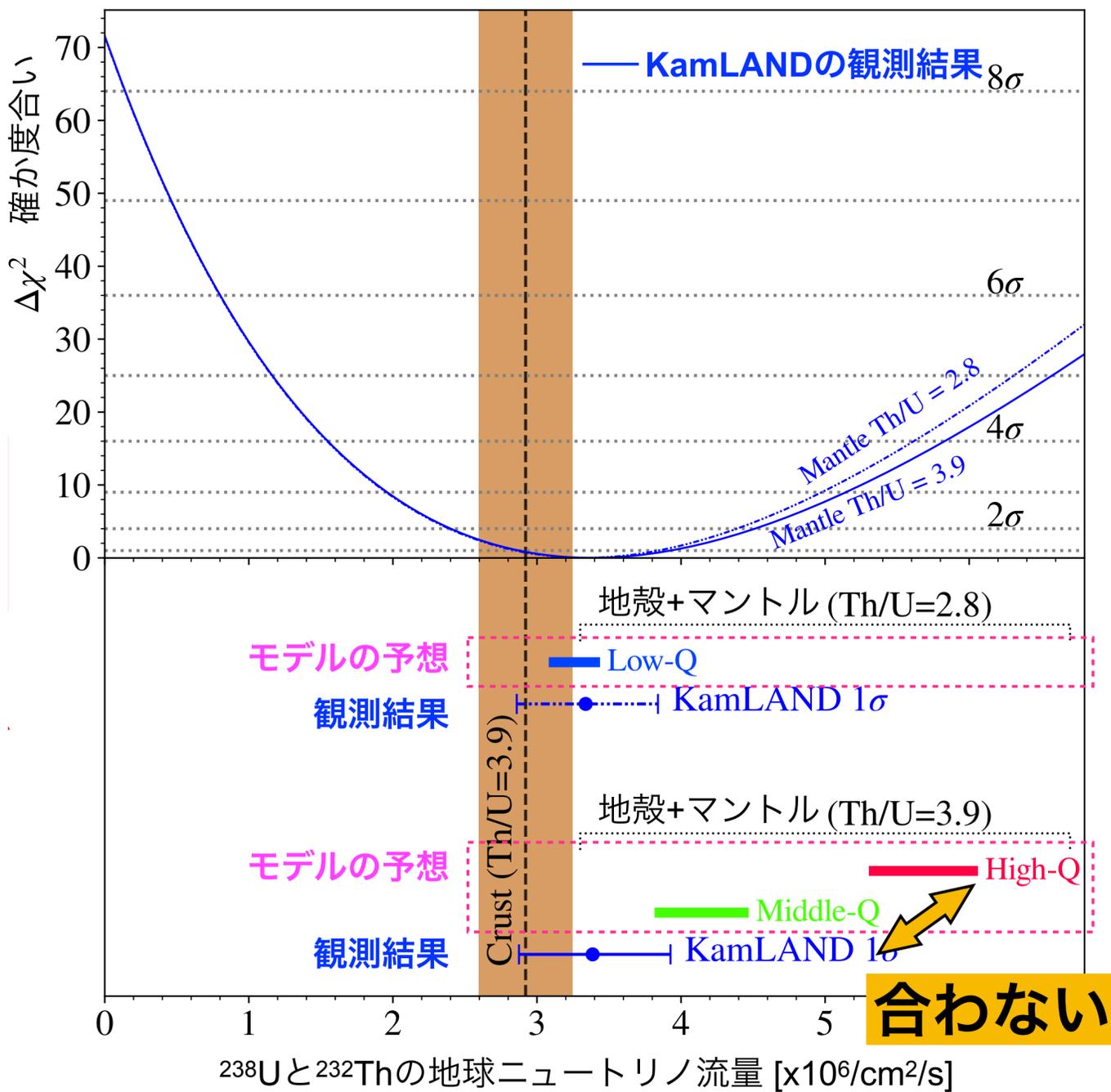
放射化熱

放射性物質起源

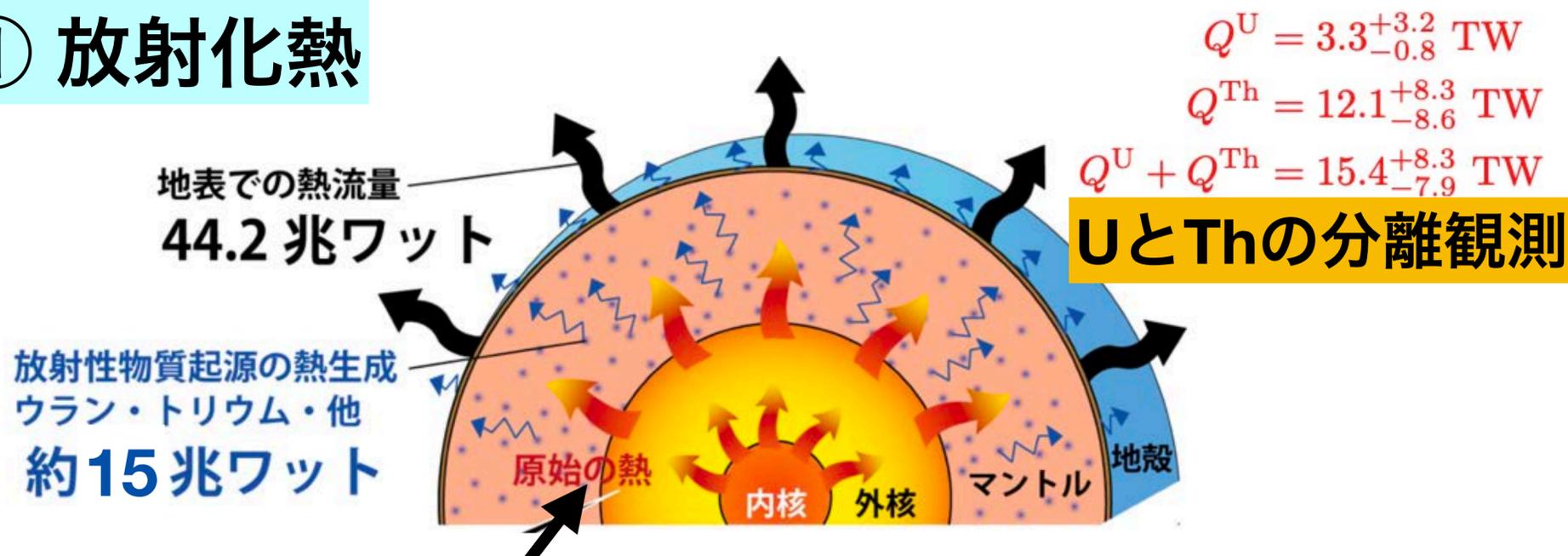
(U・Th・K)



を放出

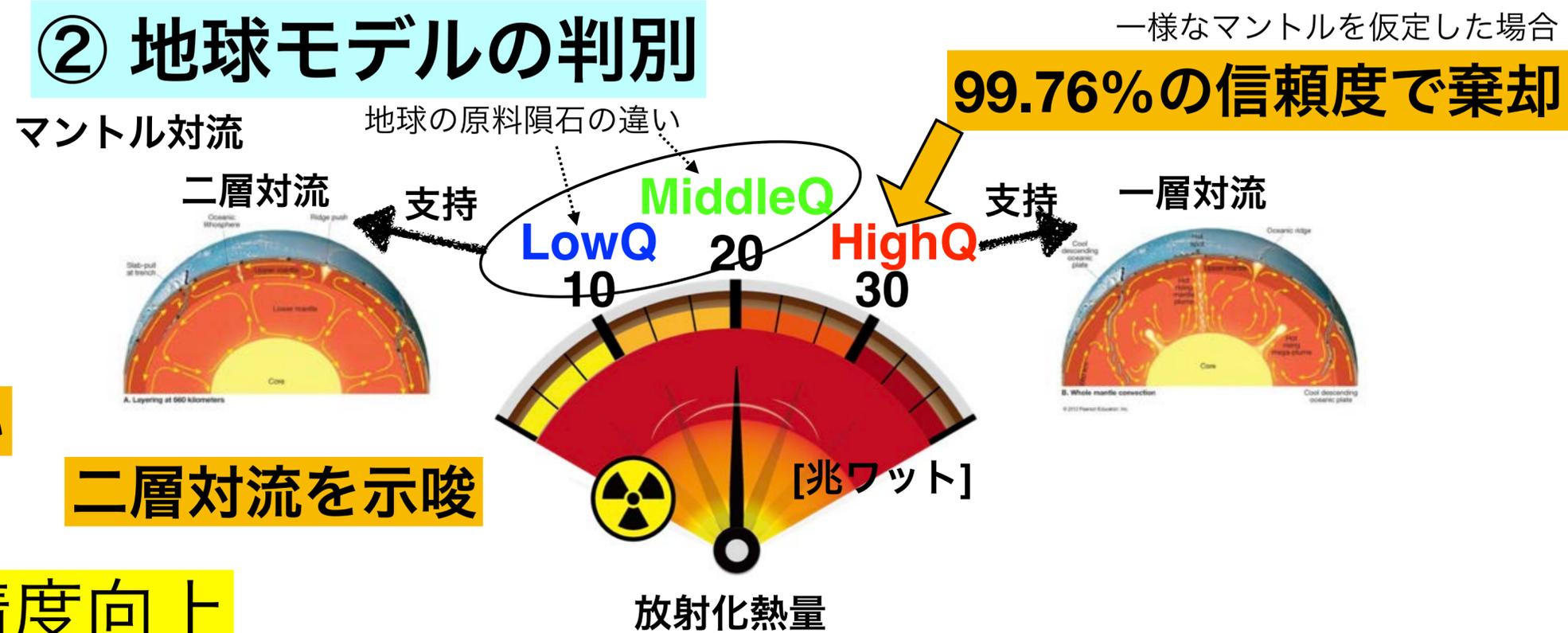


## ① 放射化熱



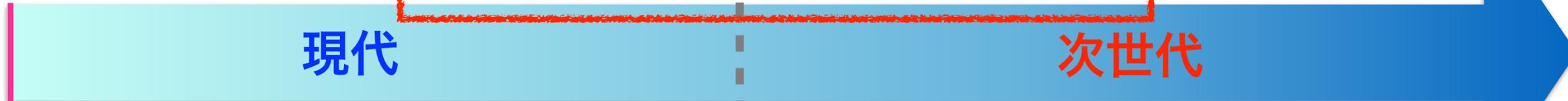
地球形成時の原始の熱がまだ残っている

## ② 地球モデルの判別

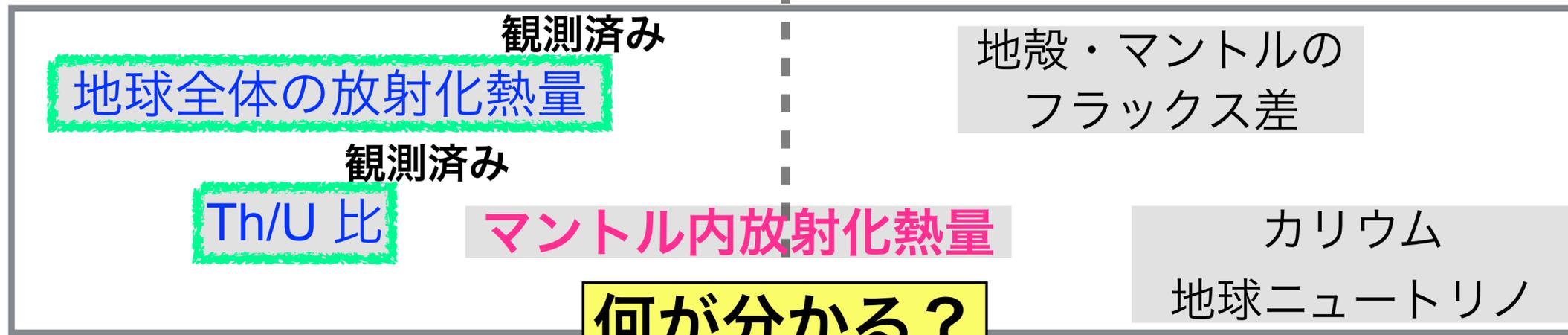


地球科学的知見を得られるまで精度向上

## 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

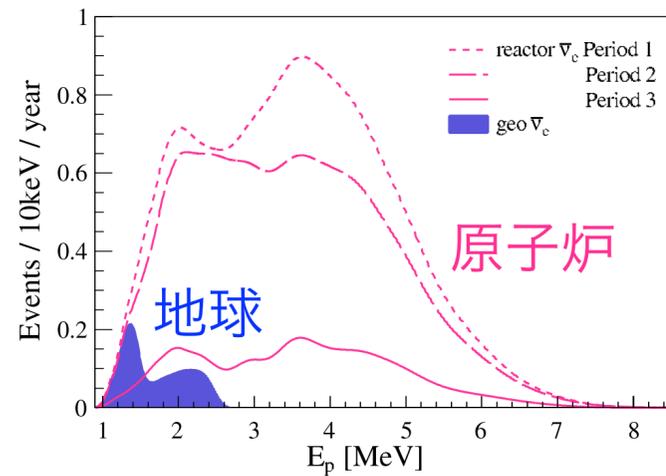
地殻から離れる必要有り  
原子炉からも離れられる

### ● 複数点観測可能

地球深部の謎を解き明かす！

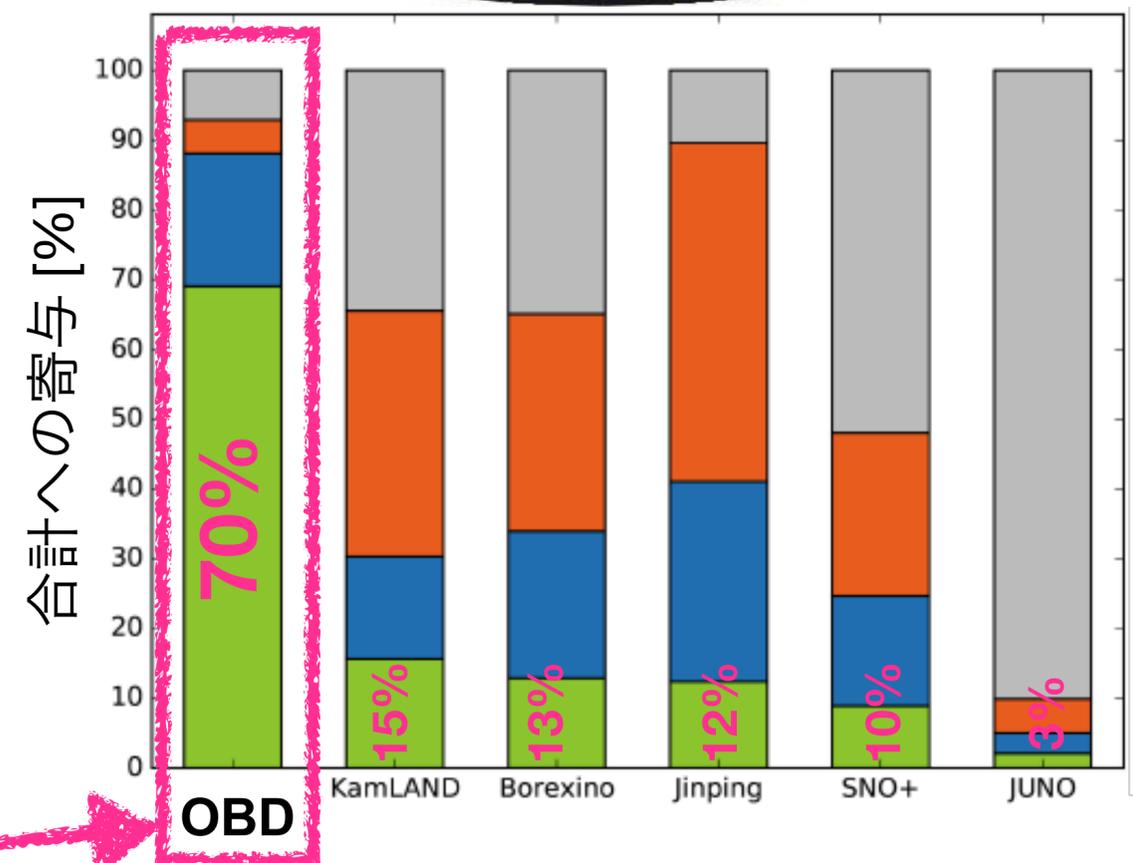
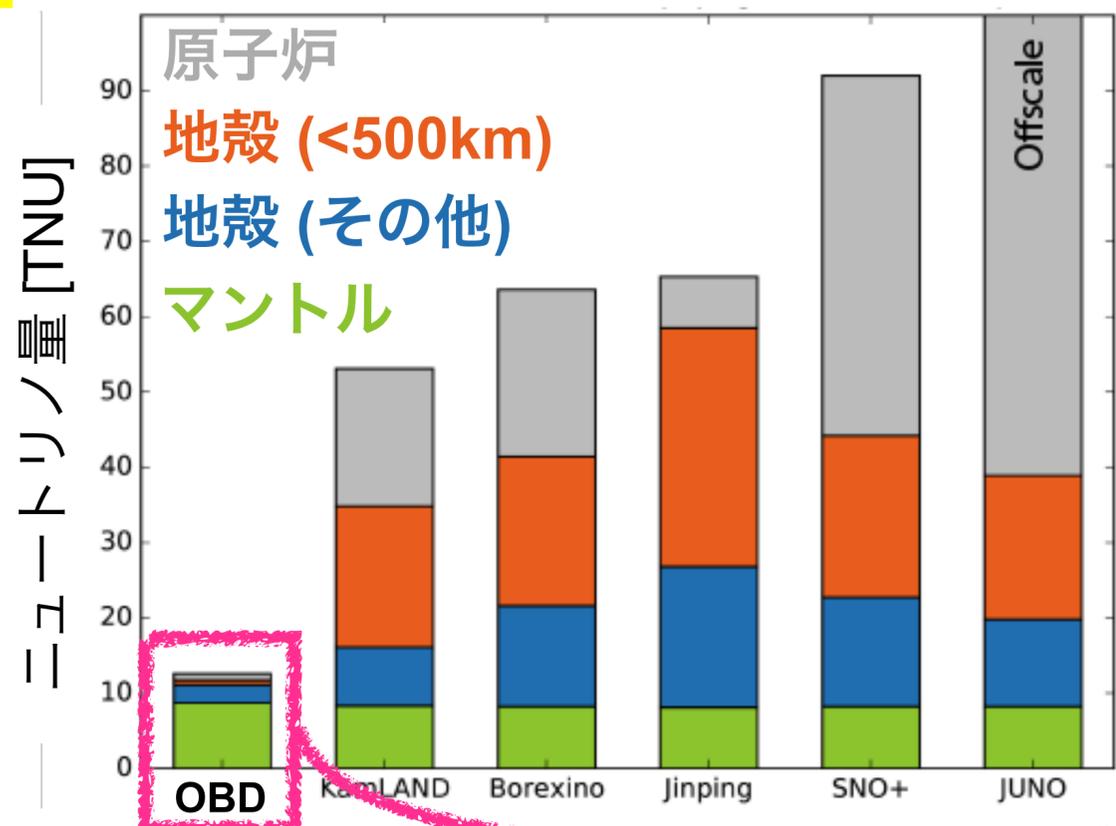
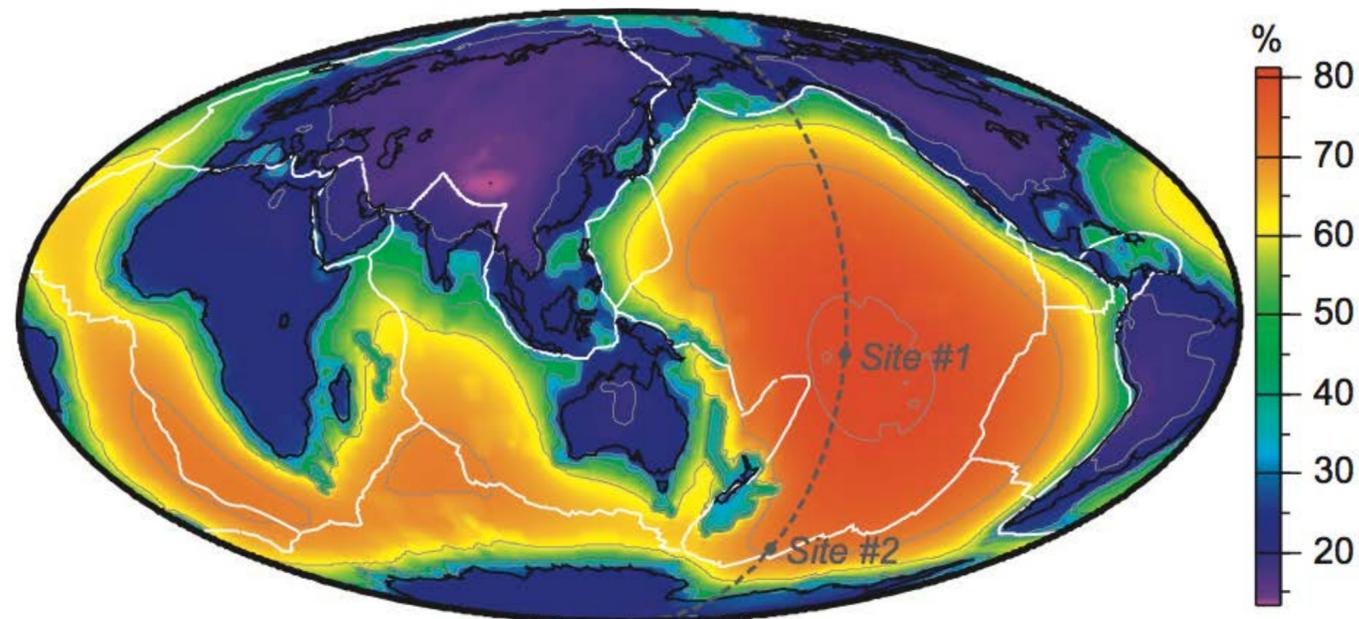
### ● 分野横断的研究

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

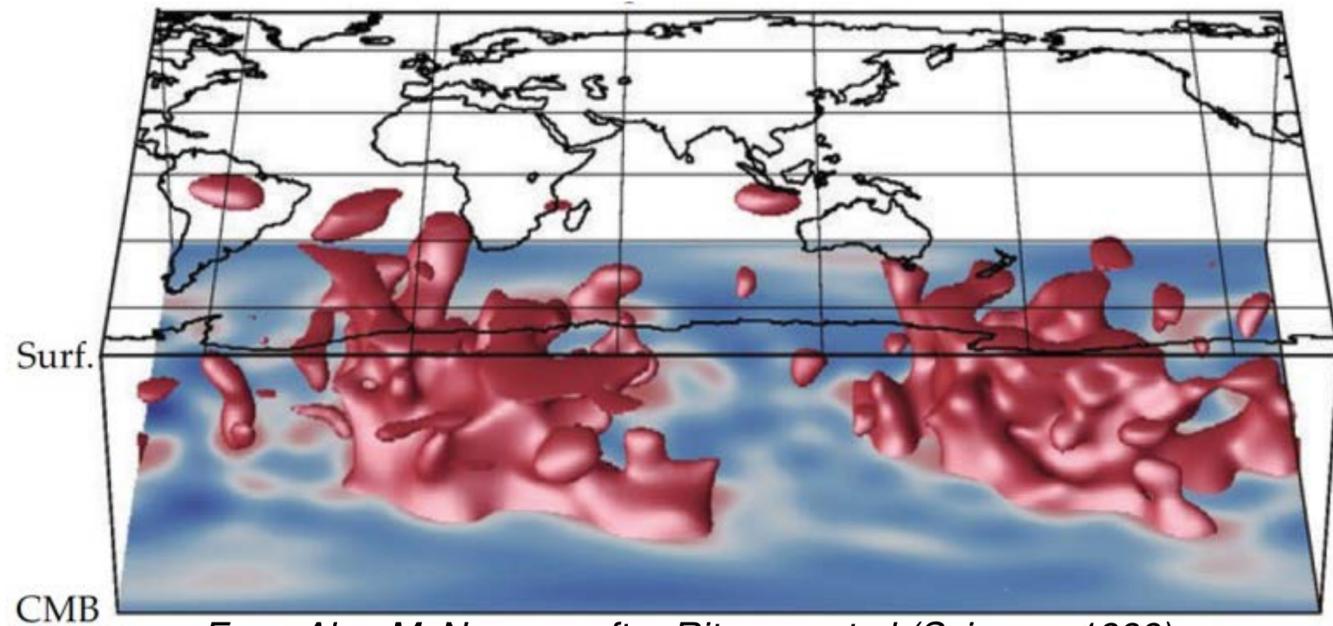
## • 複数点観測可能

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

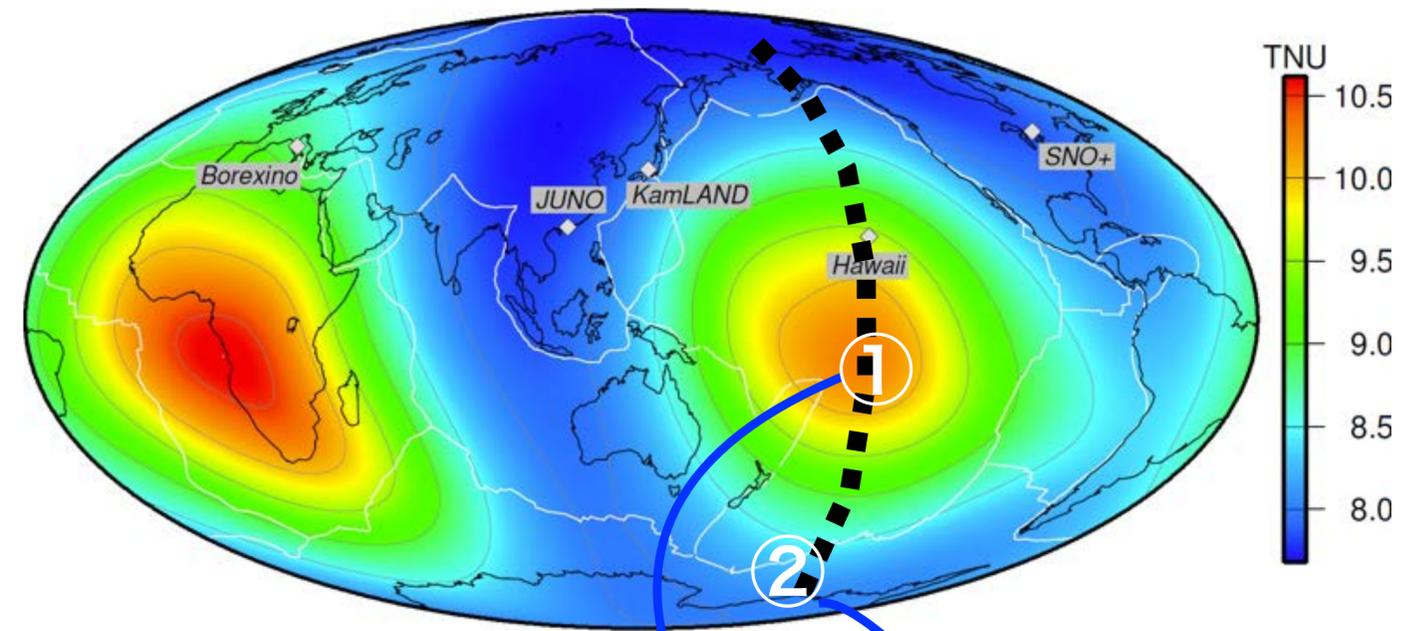


From Alan McNamara after Ritsema et al (Science, 1999)

Red = Pacific & south Atlantic LLSVP

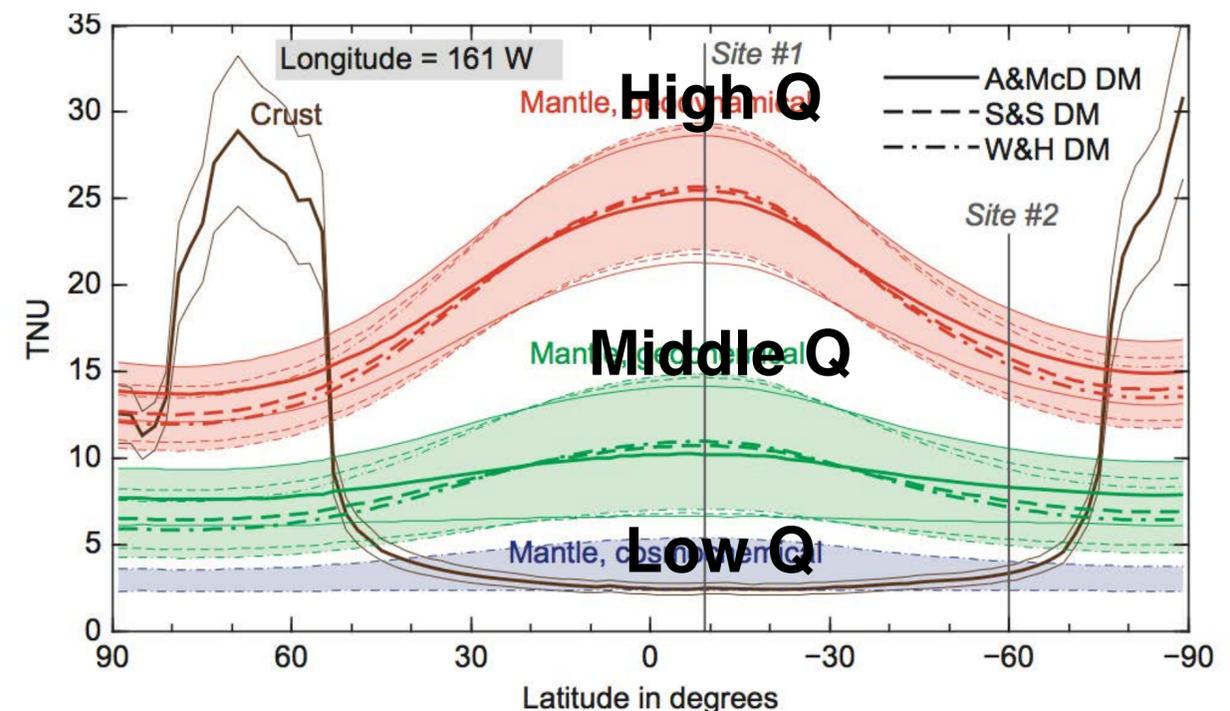
Šrámek et al (2013) EPS, 10.1016/j.epsl.2012.11.001

## 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

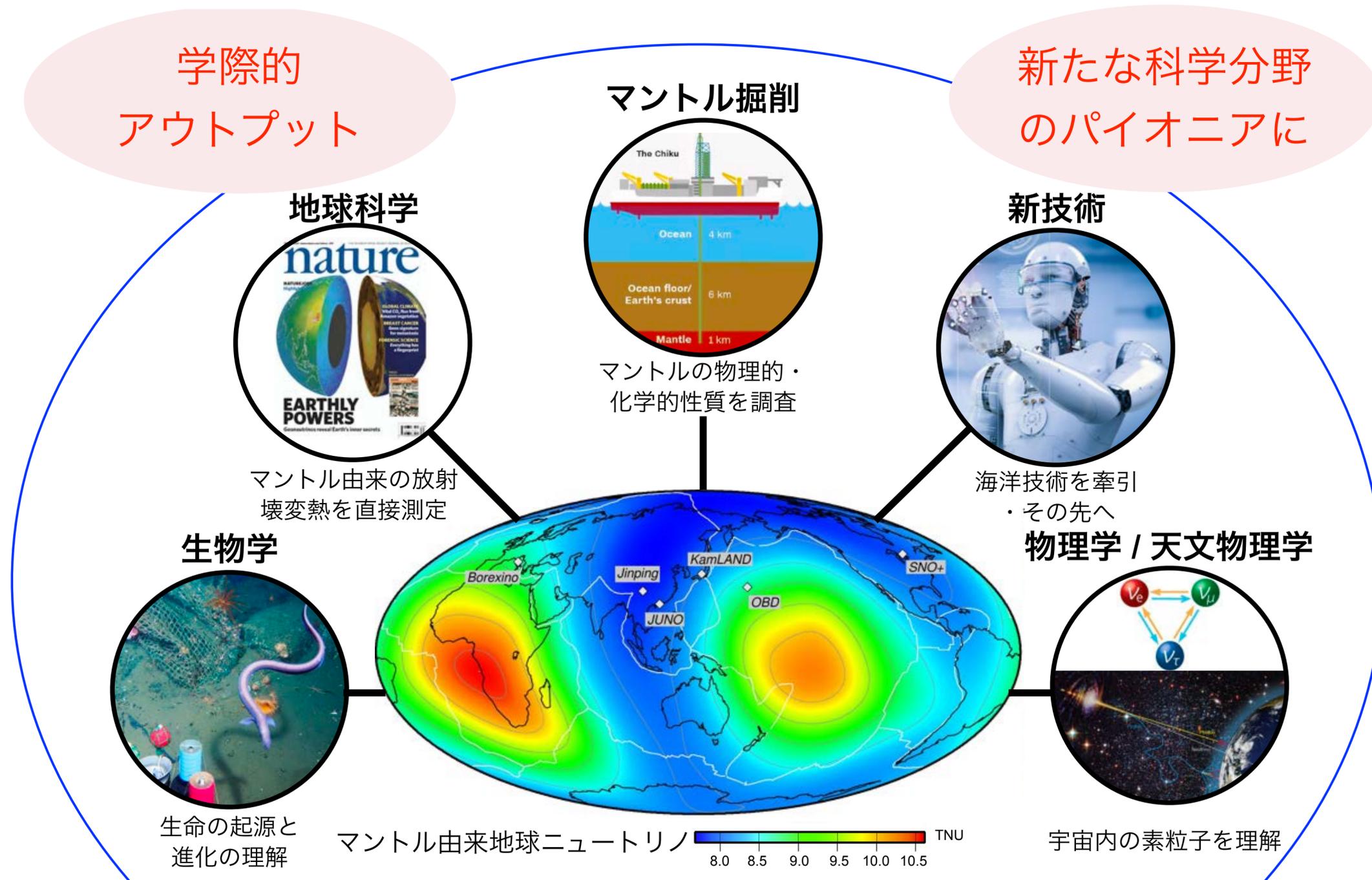
地殻から離れる必要有り  
原子炉からも離れられる

## 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

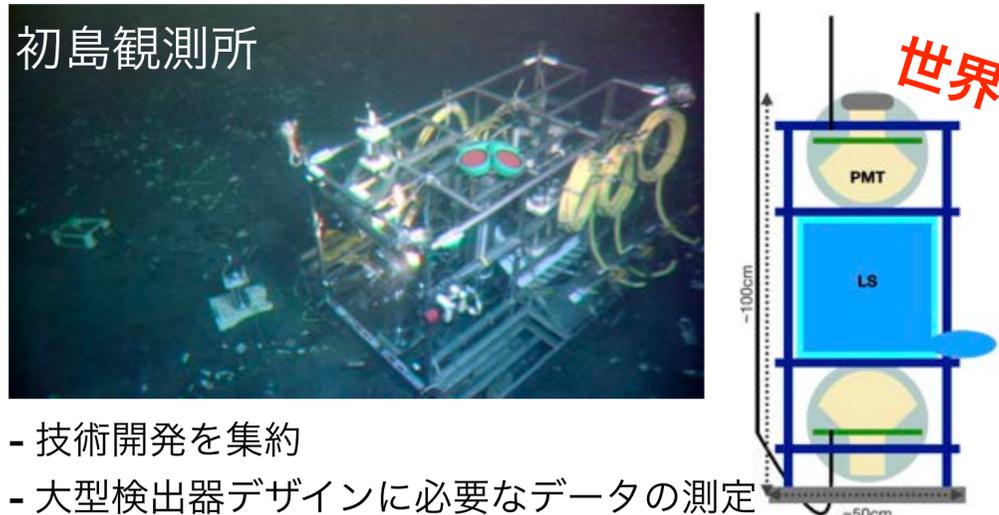
マントル地球ニュートリノ観測

10-50 kt

2005  
進展なし

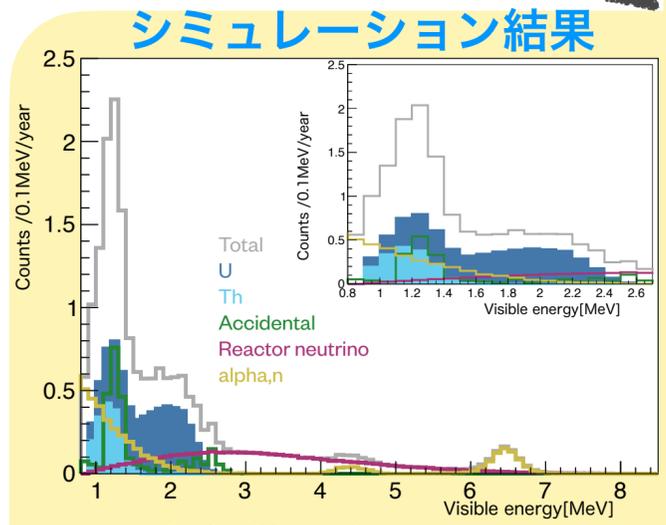
ハワイで発案

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

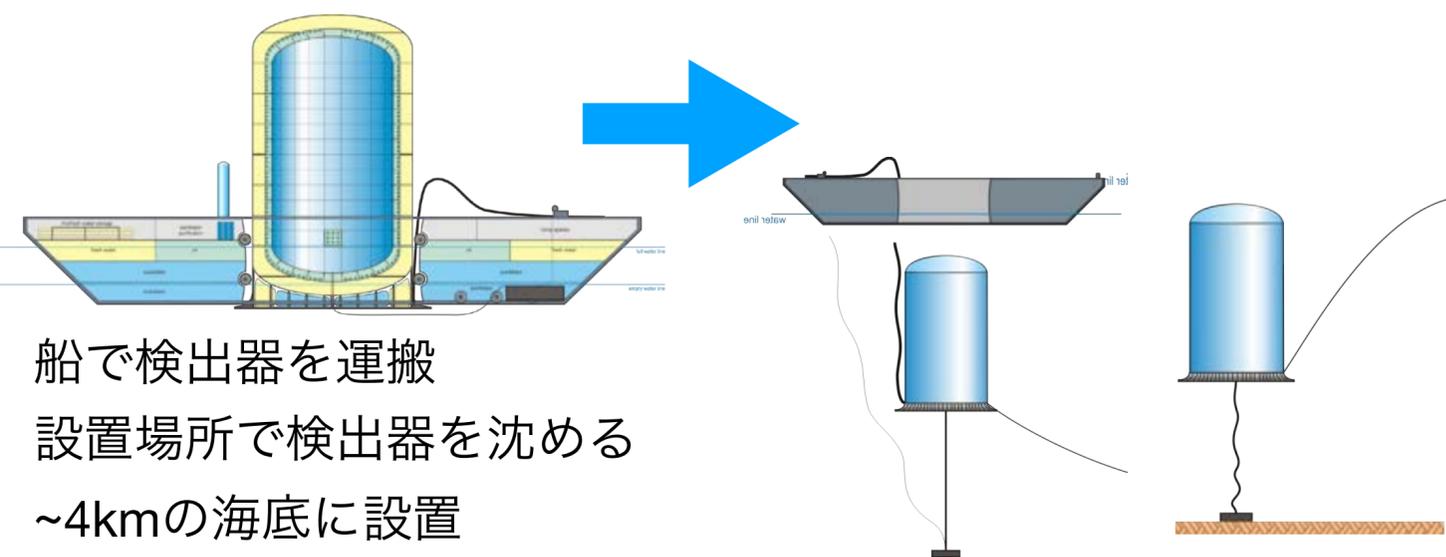


予想事象数 (1年) (マントル)  
地球ν U : 6.6 (4.6)  
Th : 1.6 (1.1)  
バックグラウンド : 6.4  
地球ν > バックグラウンド



約4kmの深海  
(宇宙線ミュオンを海水でシールドするため)

(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 <sup>開発中</sup>
- \* 高圧・低温下での液体シンチレータ性能評価 <sup>開発中</sup>
- \* 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

# 海洋底ニュートリノ検出器：技術開発

## \* 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)

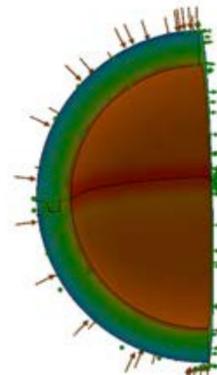


### アクリル

- 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]		
	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
目標値	1x10 <sup>-8</sup>	1x10 <sup>-8</sup>	1x10 <sup>-8</sup>
普通のガラス	~1x10 <sup>-7</sup>	~1x10 <sup>-7</sup>	~1x10 <sup>-7</sup>
達成値	<b>1.4x10<sup>-8</sup></b>	<b>&lt;5.0x10<sup>-9</sup></b>	<b>3.4x10<sup>-9</sup></b>
低減率	<b>1/10</b>	<b>1/500</b>	<b>1/300</b>

- \* 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

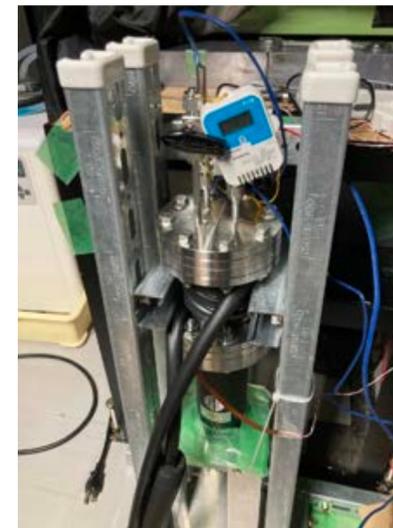
**使用可能**

## \* 高圧・低温下での液体シンチレータ性能評価

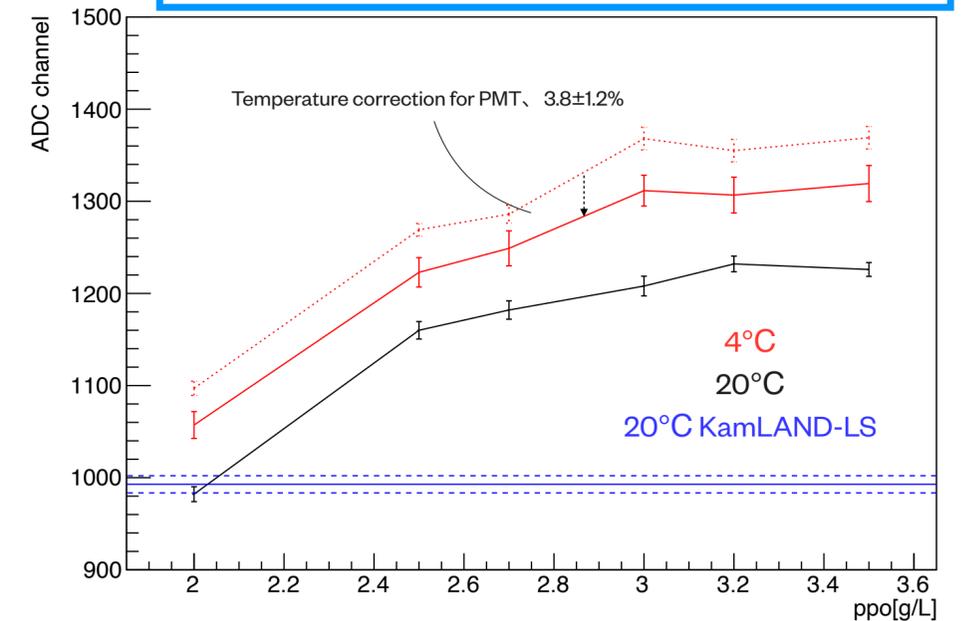
リニアアルキルベンゼン(油) + PPO(蛍光物質)

低温下でチェック (高圧下は今後)

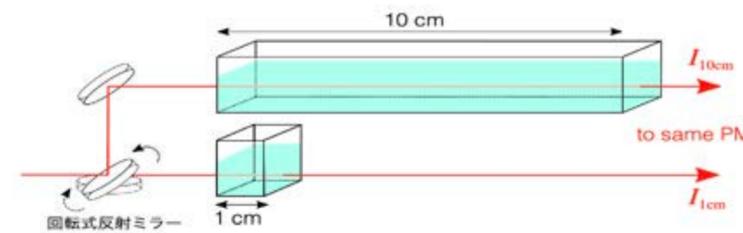
### 発光量



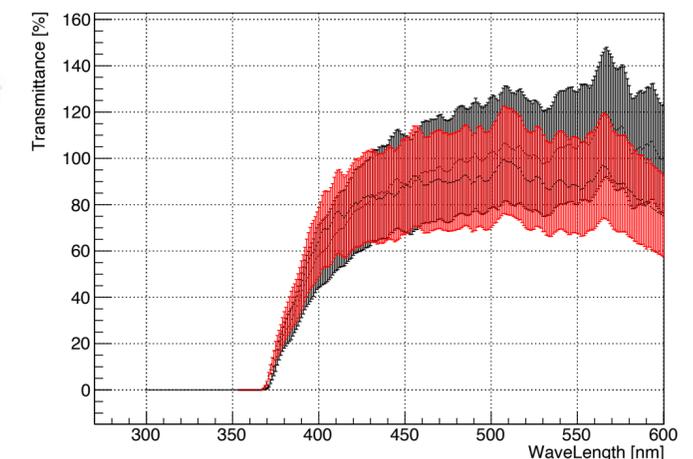
**20°Cより4°Cの方が+9%**



### 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！

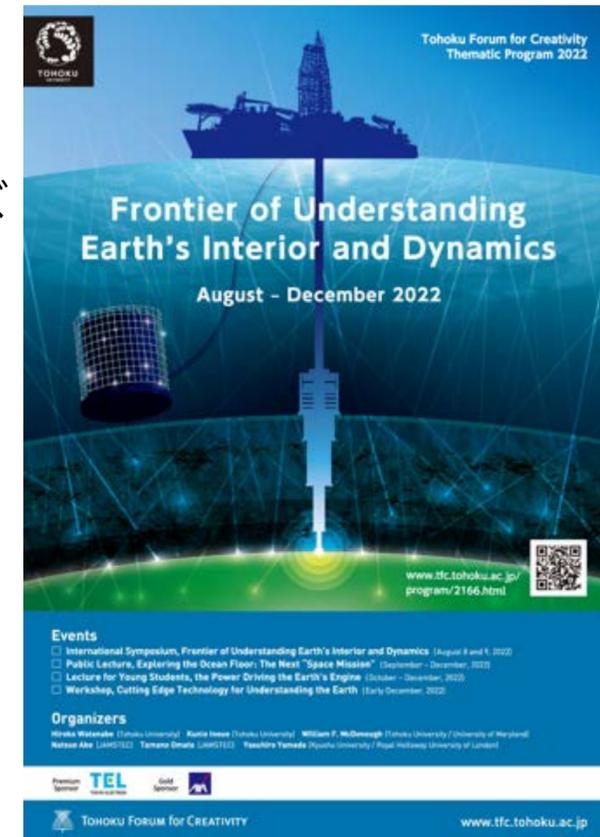
## Thematic Program 2022 採択 (Tohoku Forum for Creativity)

- 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)

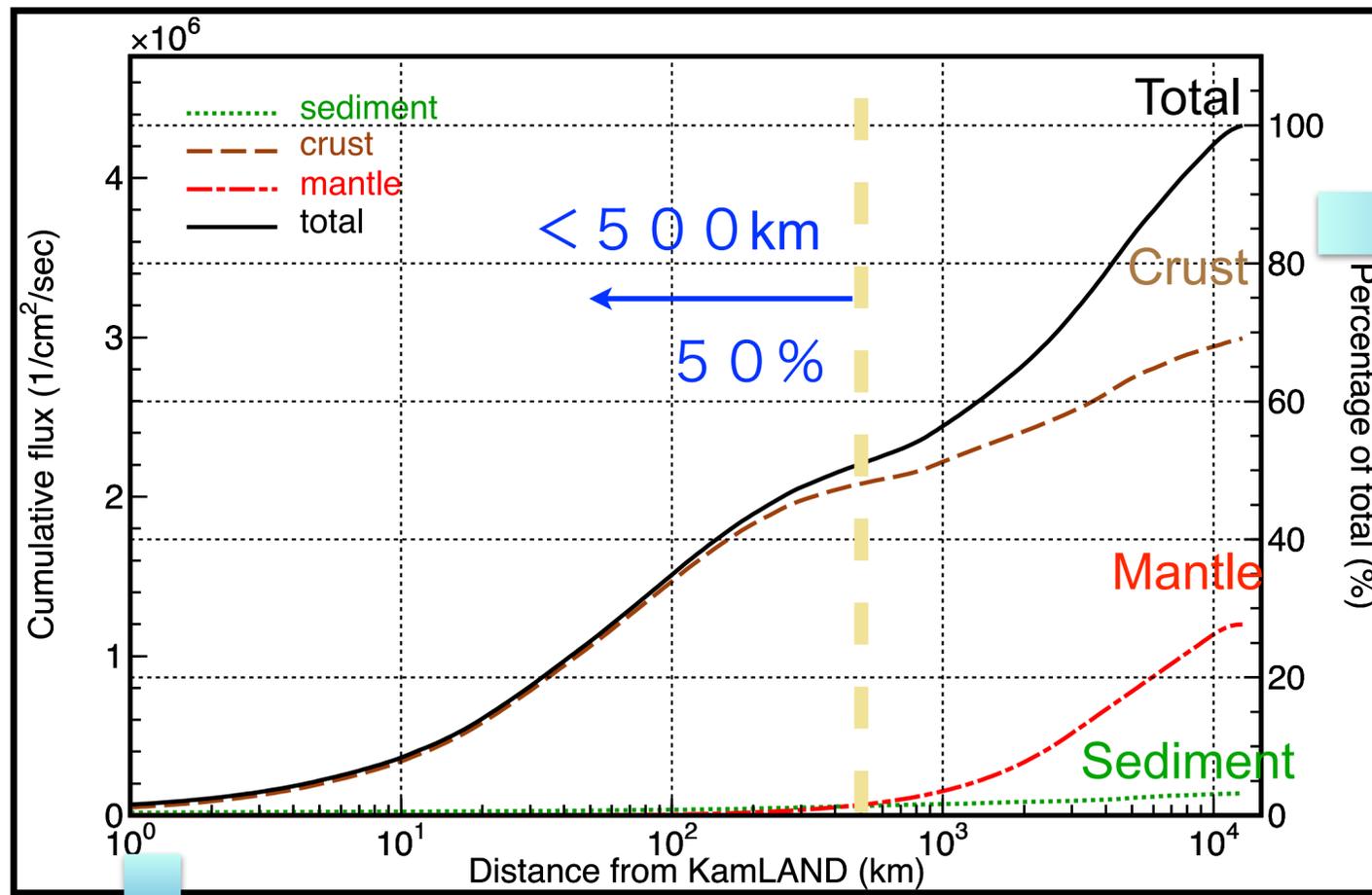
- \* 「Study of Ocean Bottom Detector for observation of geo-neutrino from the mantle」, Journal of Physics: Conference Series, 2156, 012144, 2021年,  
T. Sakai et al. (TAUP2021 Proceedings, 査読有)  
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2156/1/012144>
- \* 「Ocean Bottom Detector」, Snowmass 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](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)

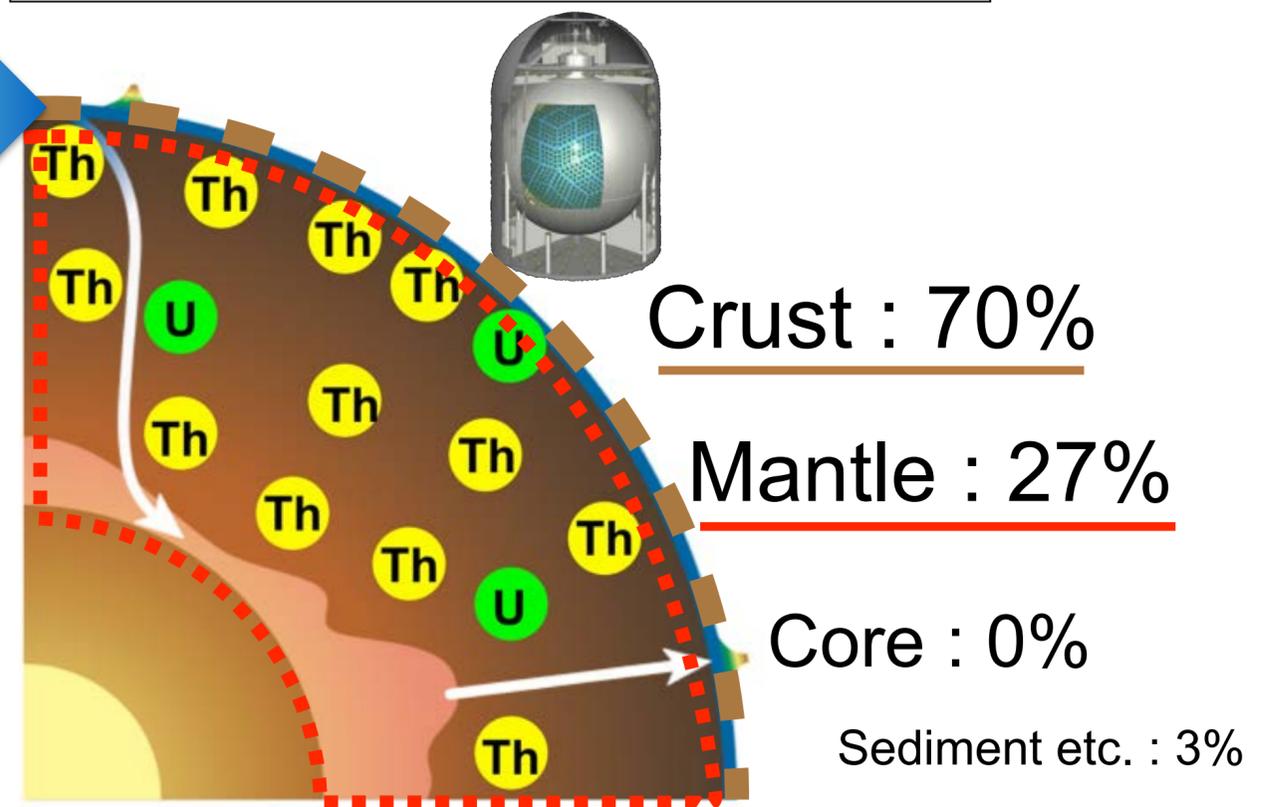
- \* 東北大学 Thematic Program 2022 「Frontier of Understanding Earth's Interior and Dynamics」  
URL: <https://www.tfc.tohoku.ac.jp/program/2166.html>



# Geo-neutrino Flux in Kamioka



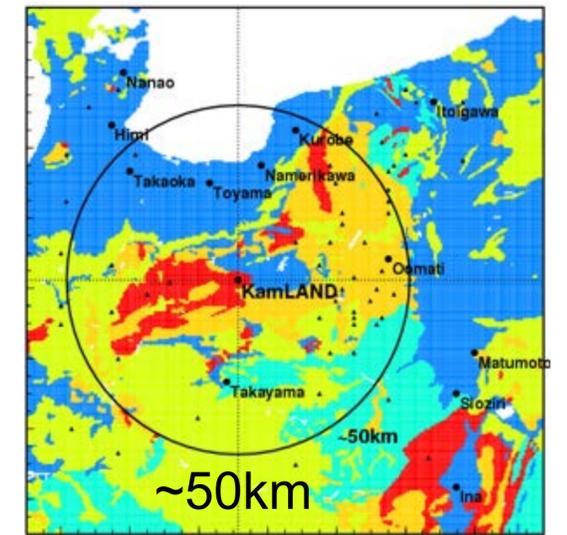
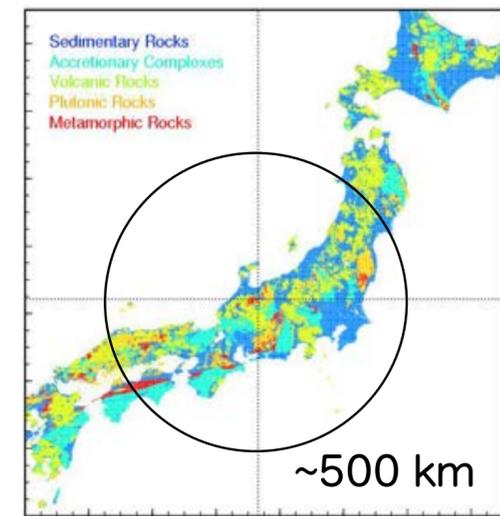
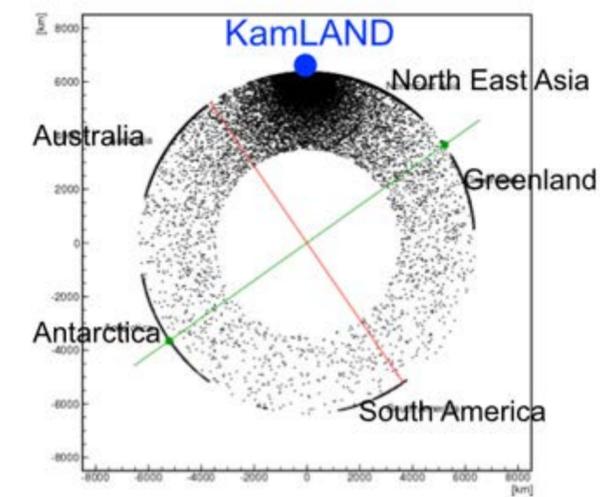
Contributions from each part



Contributions from each area

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

**Important to understand local geology**



# Anti-neutrino Detectors



## SNO+

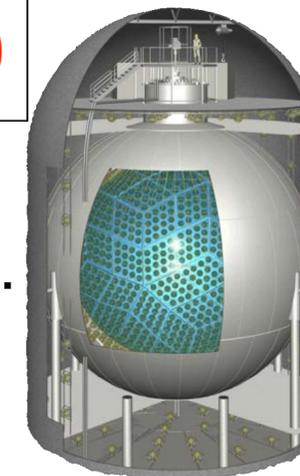
1 kt, LS+, 5.4 km.w.e.  
**running**

## Baksan

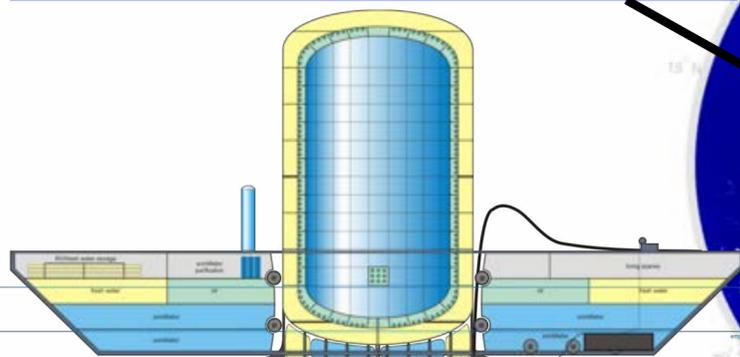
~10 kt, LS  
4.8 km.w.e.  
R&D

## KamLAND

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



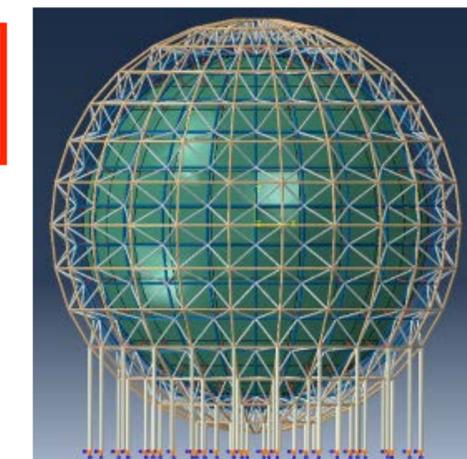
## Ocean Bottom Detector



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



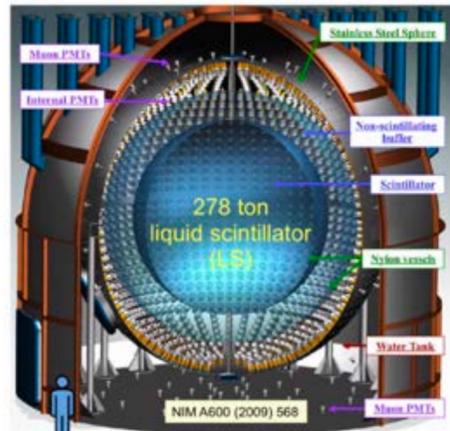
## JUNO



**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

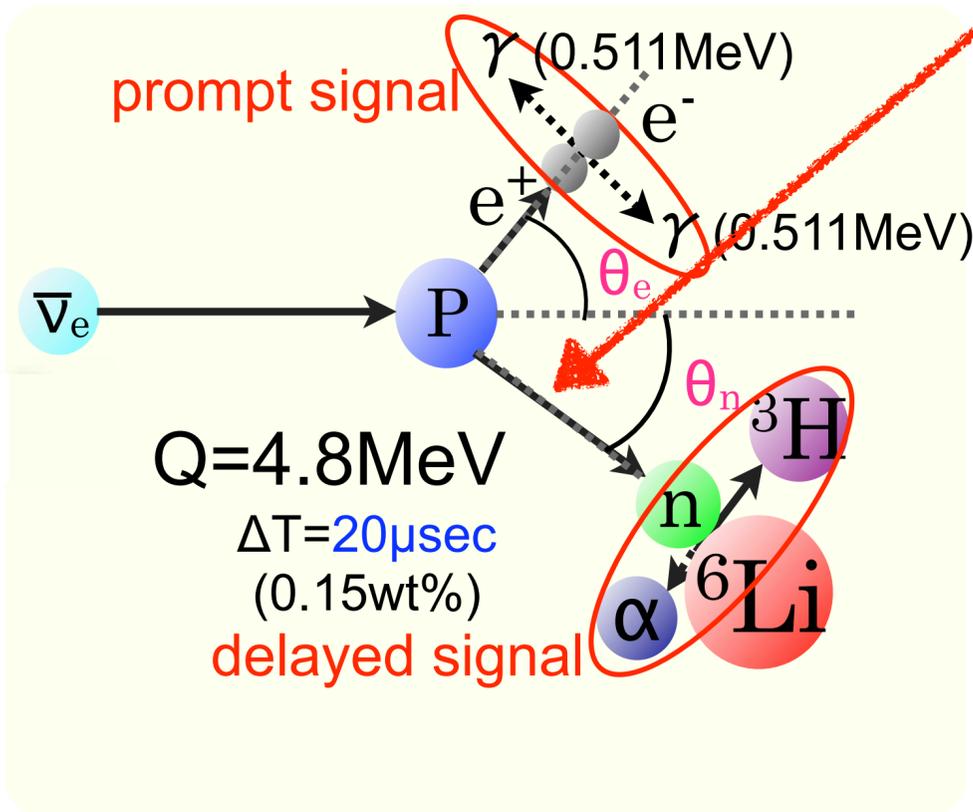
## Jinping

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



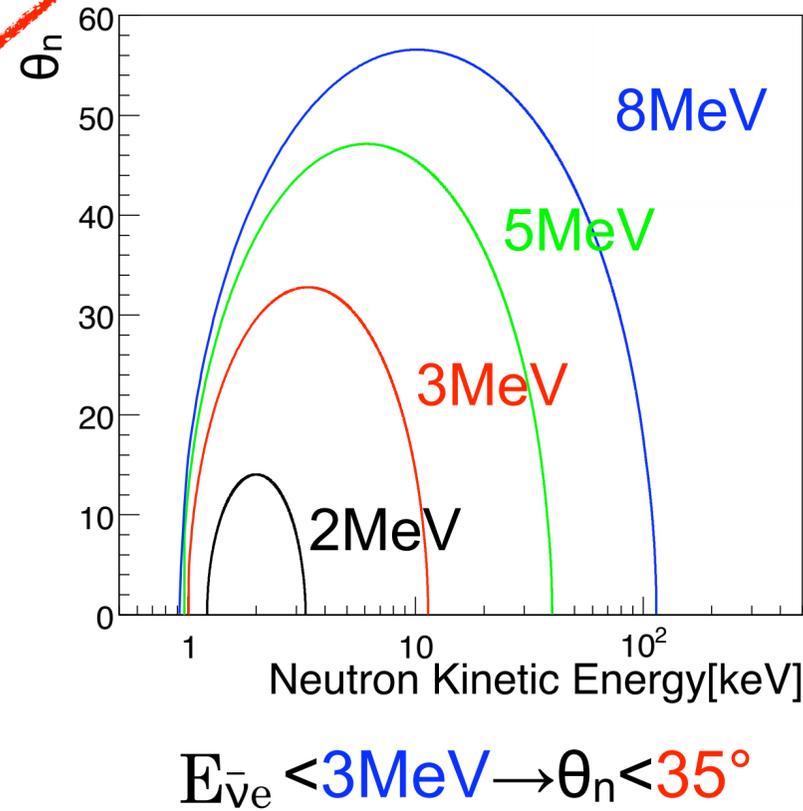
# Directionality

## Li loaded liquid scintillator

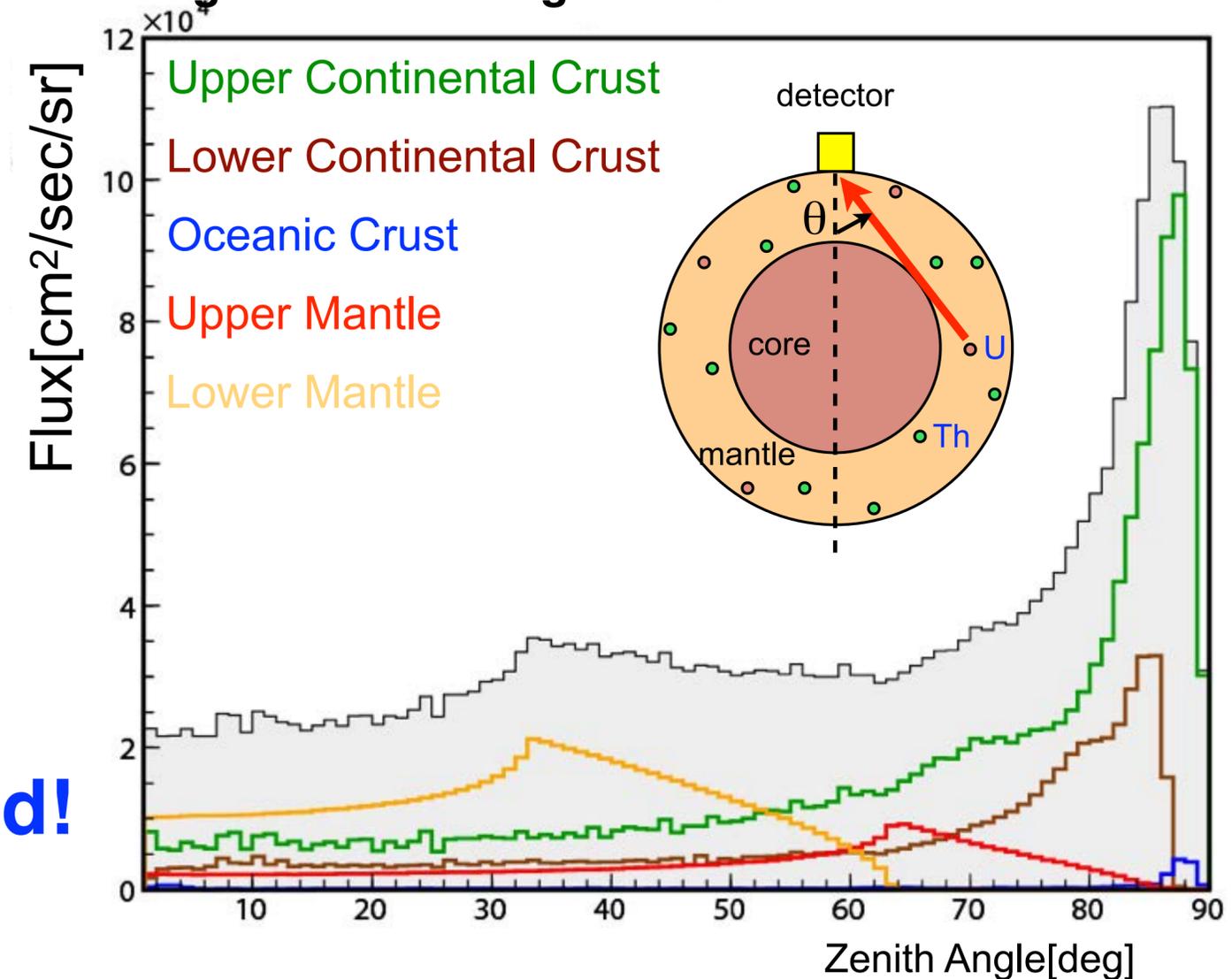


## Neutron has directional information of anti-neutrino

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**

# $^{40}\text{K}$ Geo-neutrinos

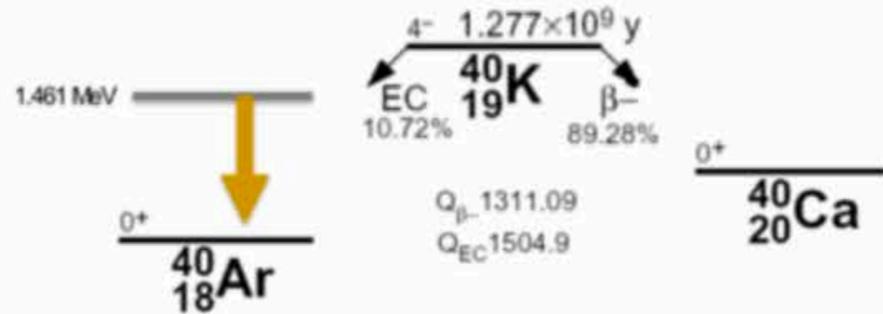
## Motivation

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

## $^{40}\text{K}$ 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...

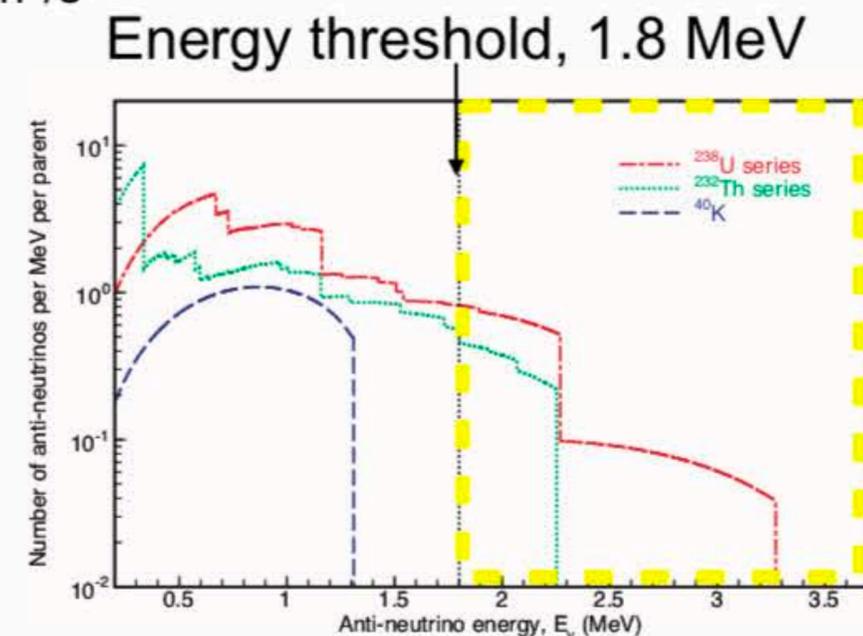
ref) 1.44 MeV pep solar  $\nu$  :  $1.42 \times 10^8 / \text{cm}^2/\text{s}$



## $^{40}\text{K}$ Anti-neutrino

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

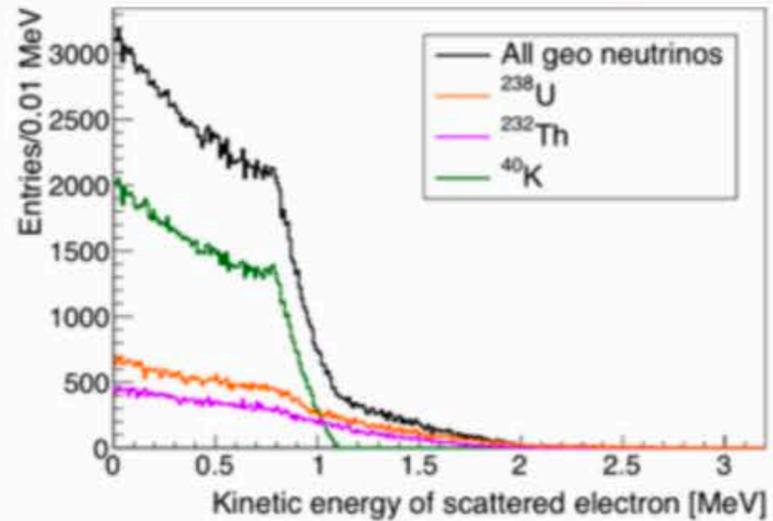
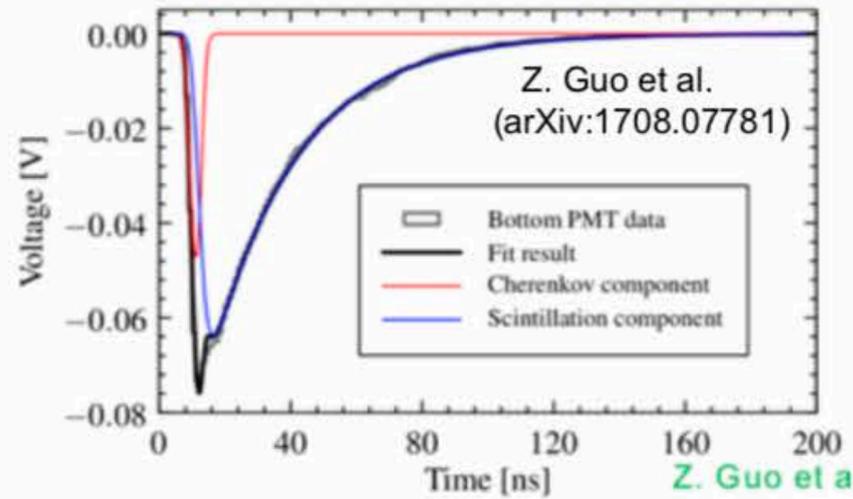
requires electron recoil directionality due to large flux of solar neutrinos



# $^{40}\text{K}$ Geo-neutrinos: Scattering

## Liquid Scintillator Cherenkov Neutrino Detector

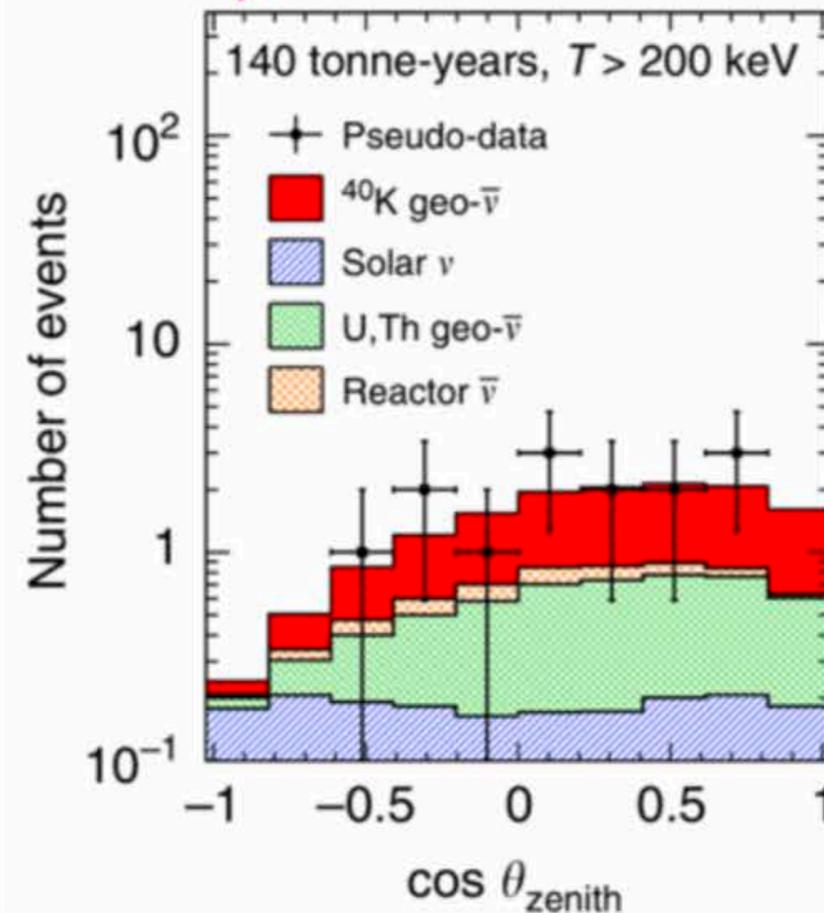
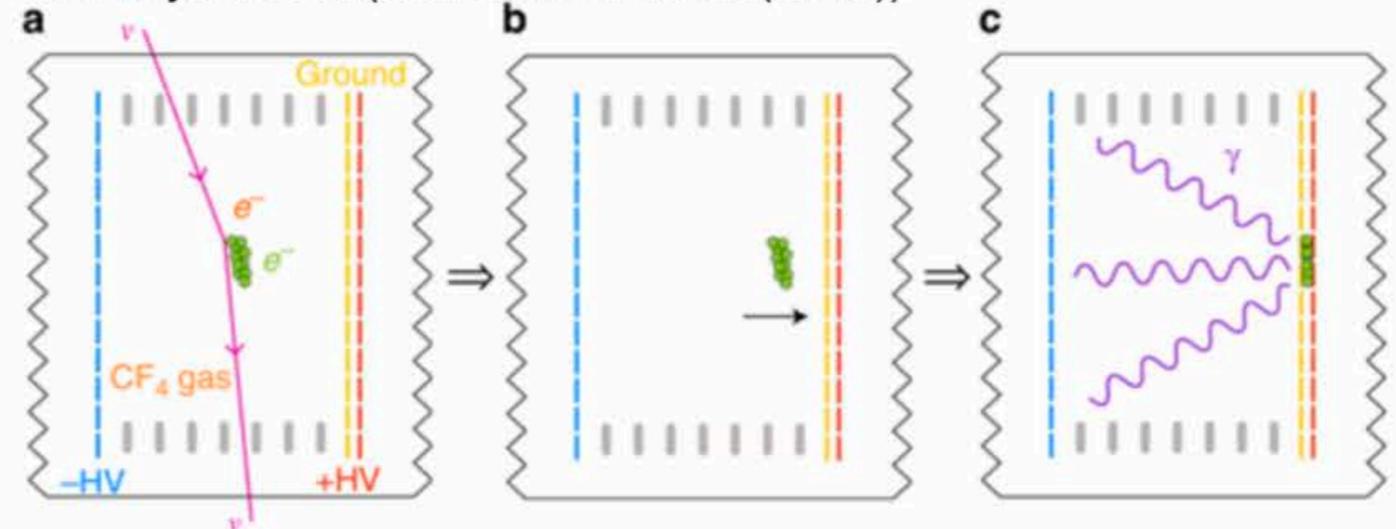
Z. Wang & S. Chen (arXiv:1709.03743)



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

## Gas TPC

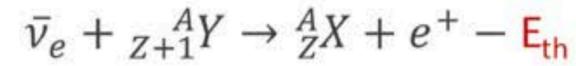
M. Layton et al. (Nat. Comm. 15989(2018))



- Huge gas chamber (cf.  $\text{CF}_4$ )
- Technically difficult

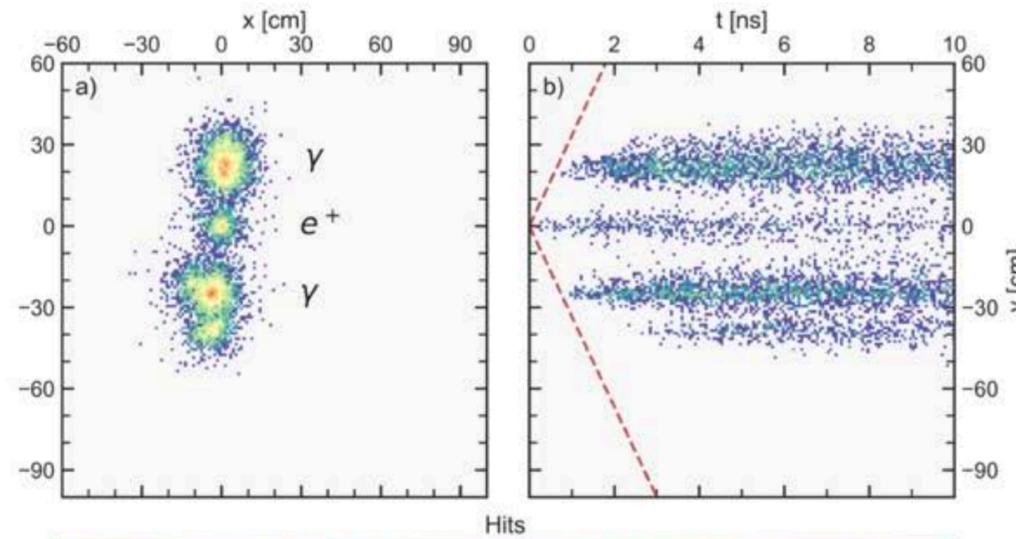
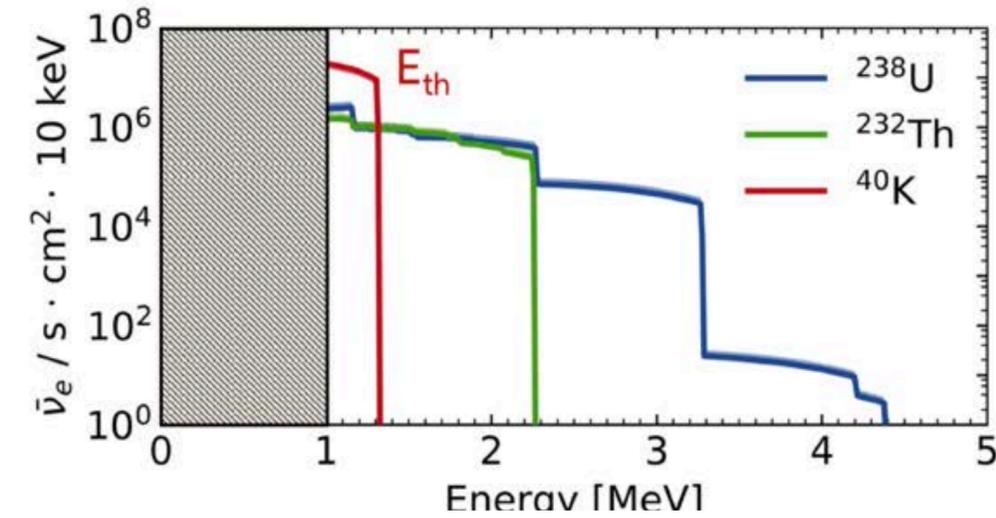
# $^{40}\text{K}$ Geo-neutrinos: LiquidO

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

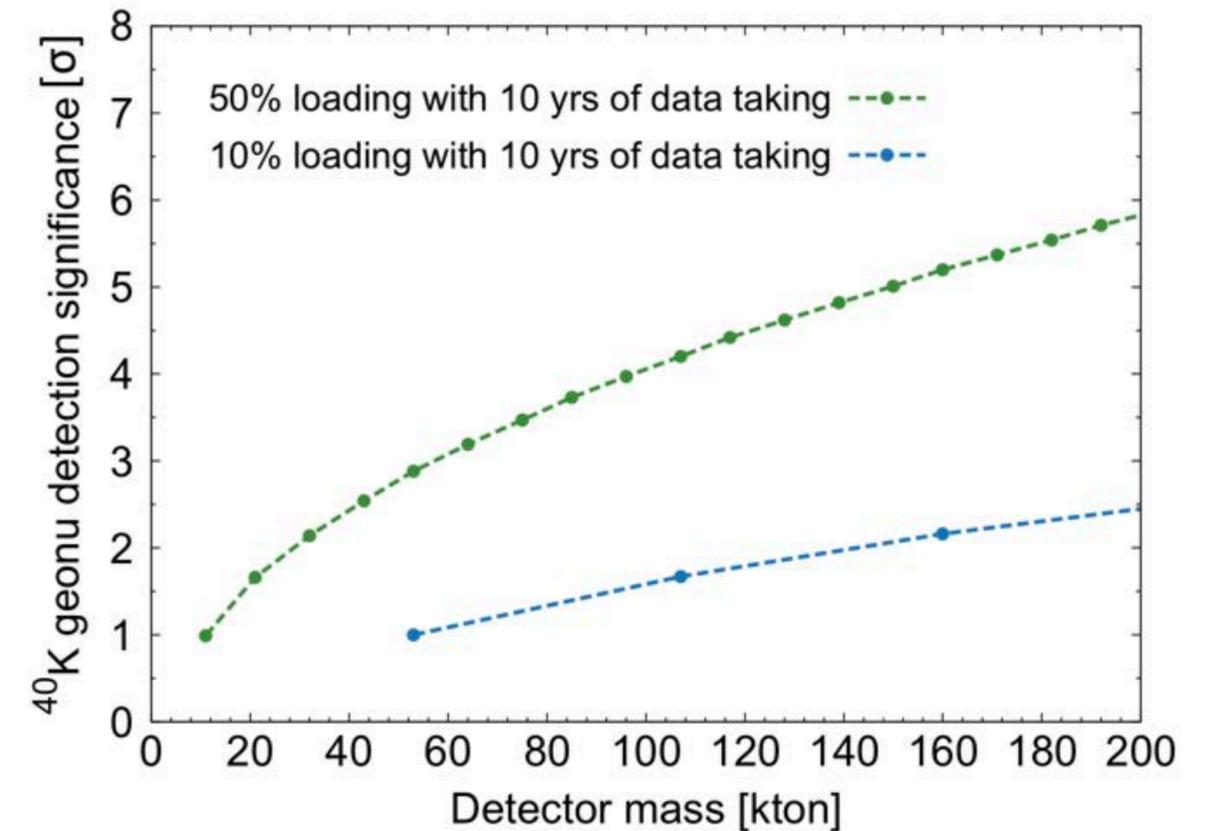


We shall require:

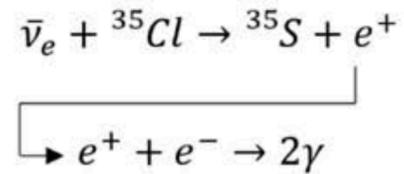
- $E_{\text{th}} < 1.3 \text{ MeV}$
- High cross-section
- High  $Y$  natural isotopic abundance



## $^{35}\text{Cl}$ loaded LiquidO



IBD( $^{35}\text{Cl}$ )



IBD-proton

