

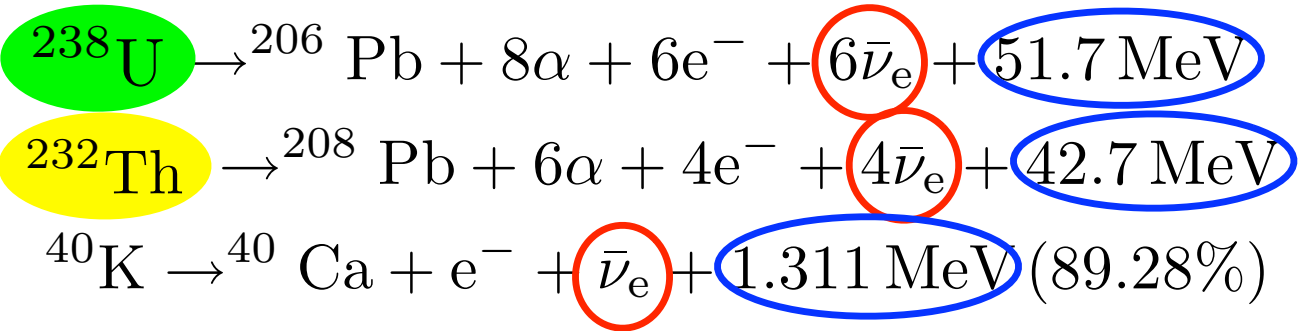
マントル地球ニュートリノ 直接観測に向けた 海洋底反ニュートリノ検出器の研究開発

東北大学ニュートリノ科学研究センター
修士課程1年 酒井汰一

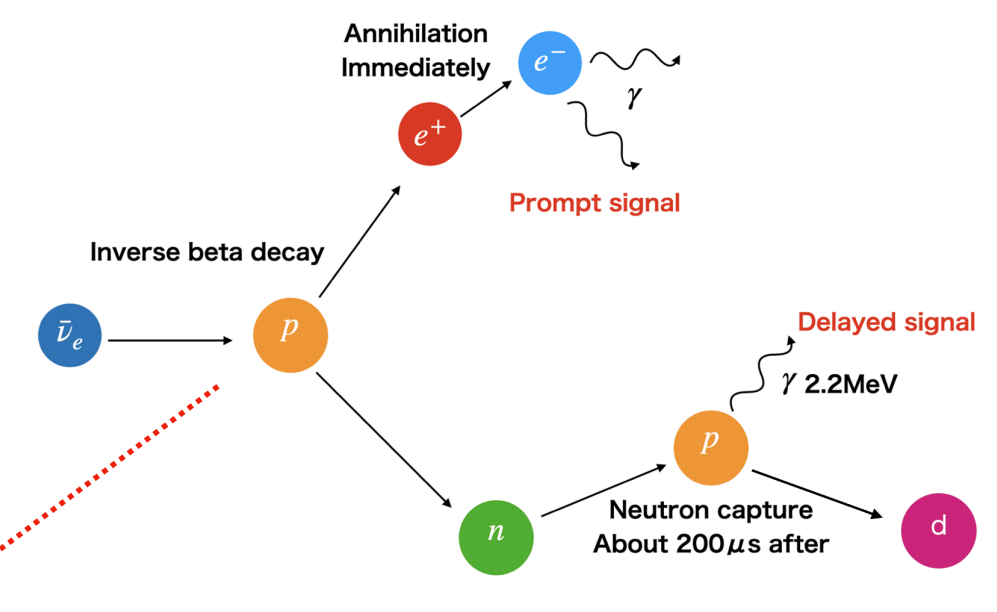
地球ニュートリノとは

地球内の放射性物質の崩壊によって生じる反電子ニュートリノ

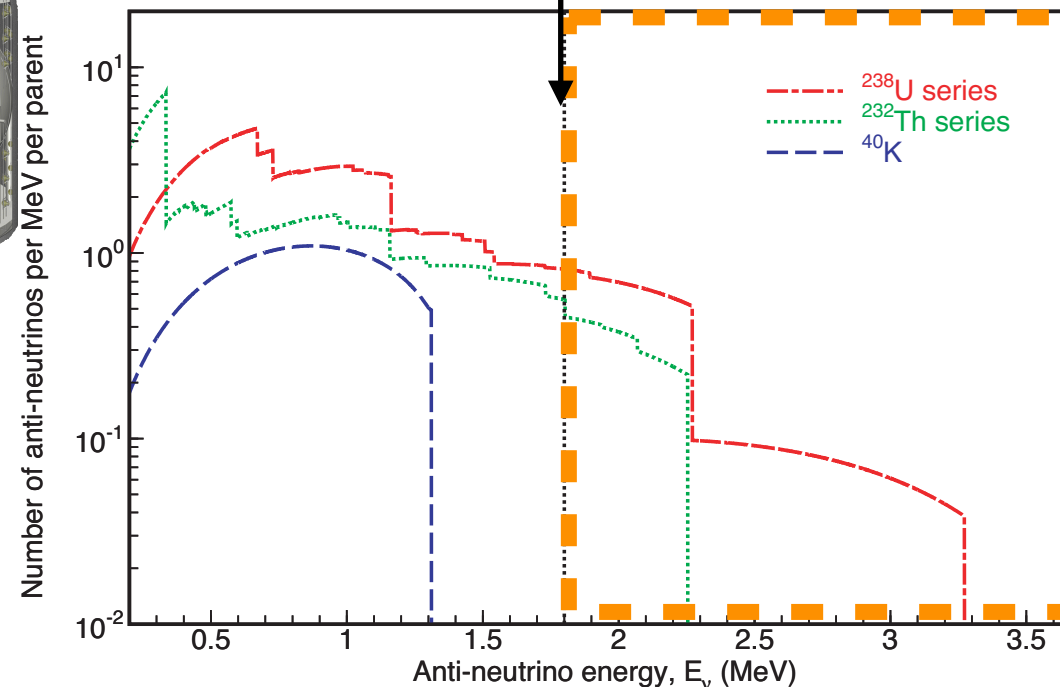
[逆β崩壊による遅延同時計測]



現在は ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$ 由来の地球ニュートリノのみ観測可能



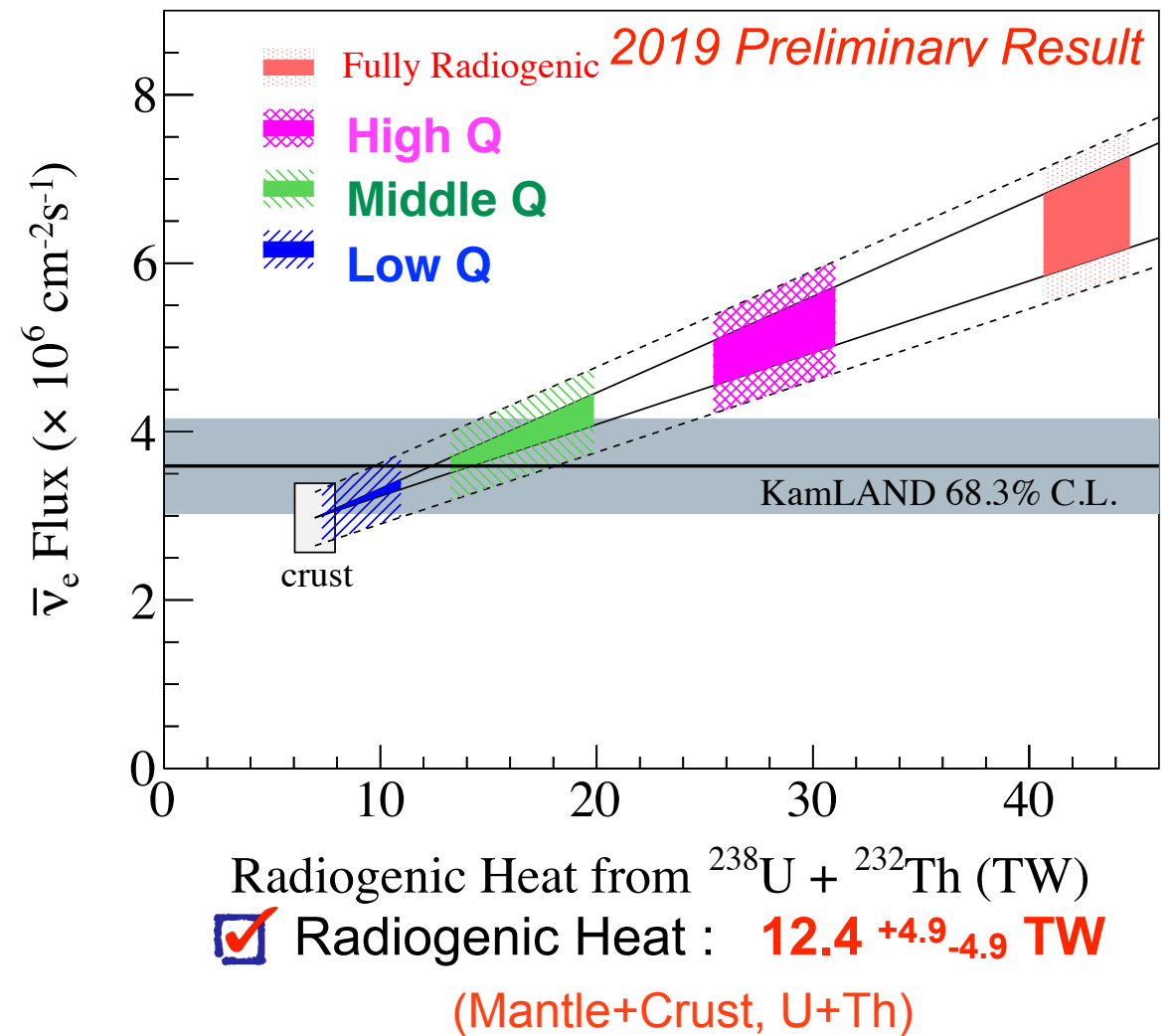
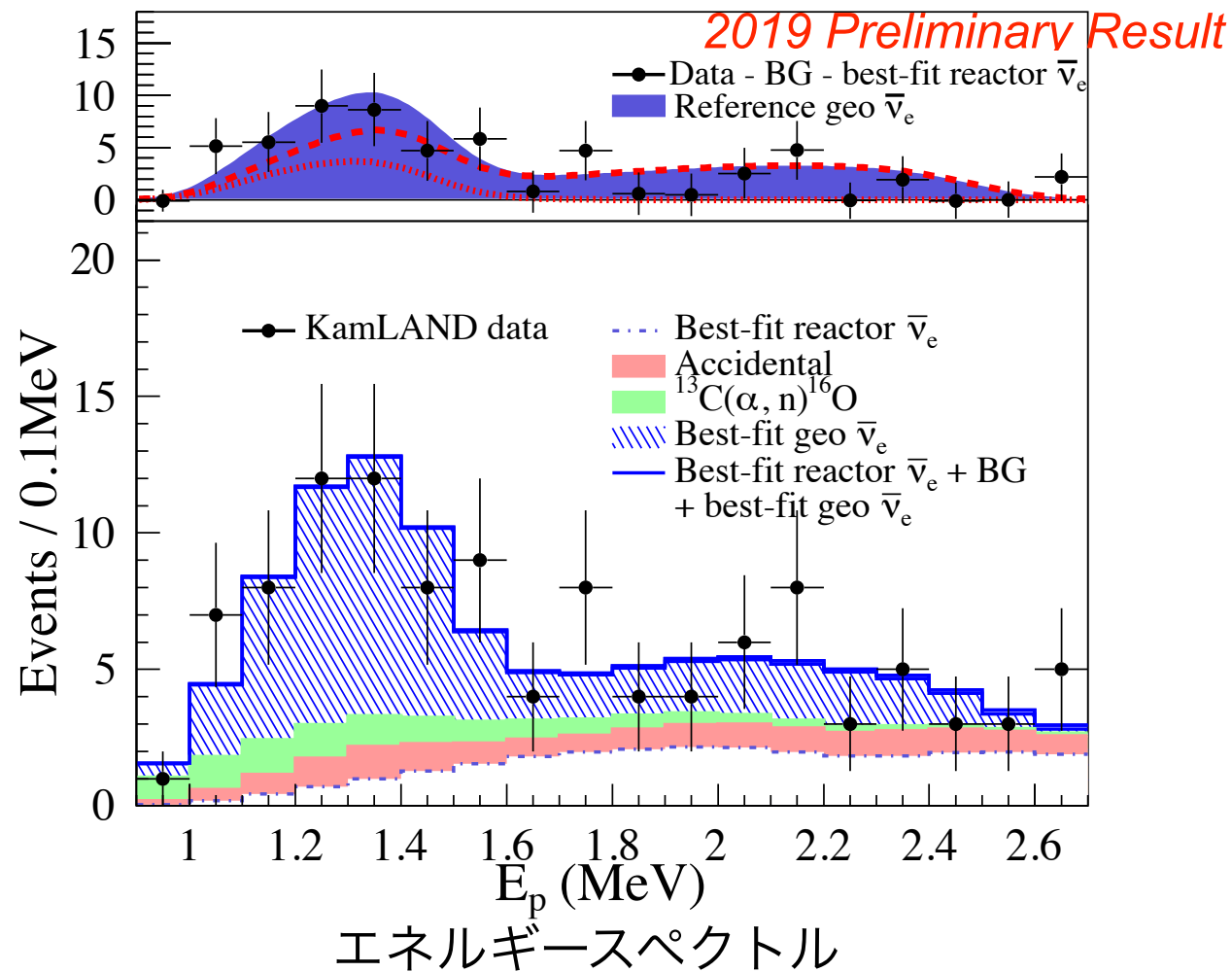
Energy threshold, 1.8 MeV



地球内部を直接観測する
唯一の手段

地球ニュートリノ観測数 $\propto$ U,Th量,地球の熱量

KamLANDでの観測結果



観測フラックスと地球モデルの比較

[これまでの成果]

- * 地球全体の放射性熱量の測定
- * 地球熱量モデルに制限
- * 観測値 - 地殻モデル = マントル
不定性大
- * U/Th 比

[次の観測対象]

マントルの放射性熱量
 の直接観測

High Q (地球ダイナミクスモデル)

マントルの物理パラメータの観測に基づくモデル
 マントル一層構造を支持する

Middle Q (地球化学モデル)

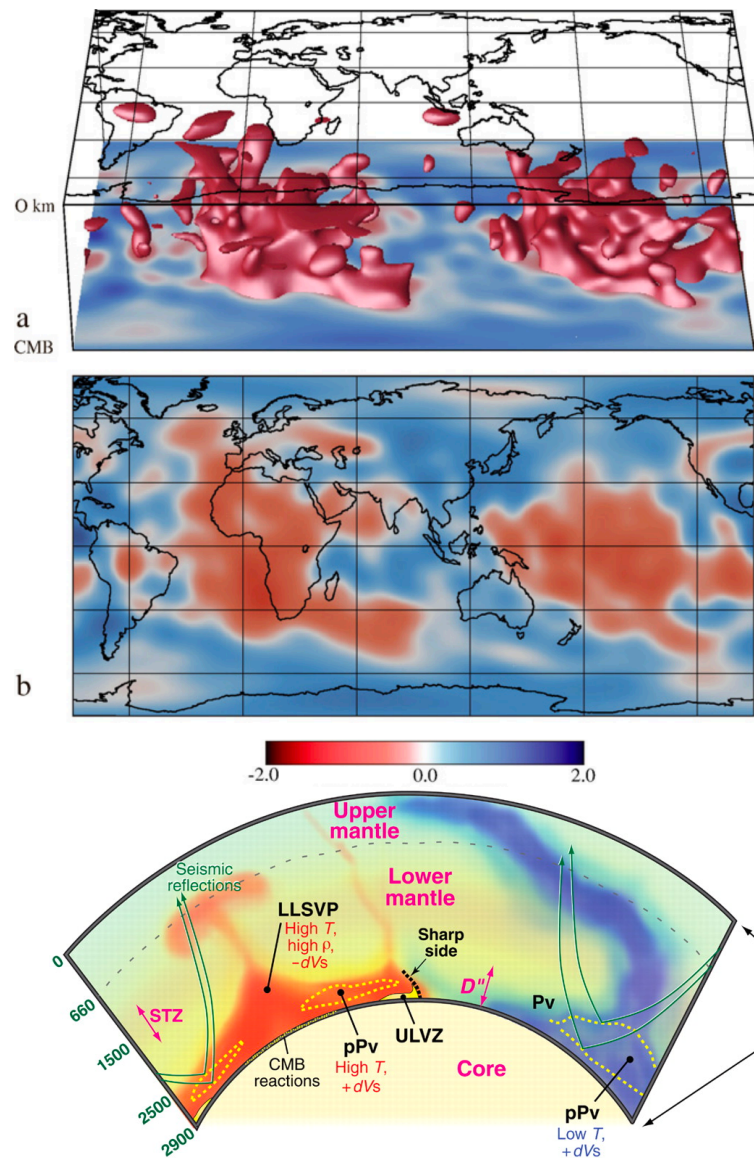
コンドライト隕石と岩石学によるモデル

Low Q (宇宙化学モデル)

コンドライト隕石と同位体の制約に基づくモデル

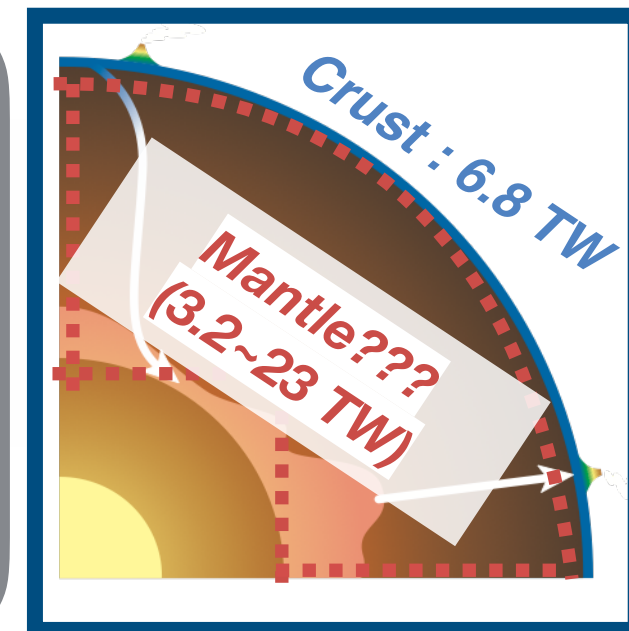
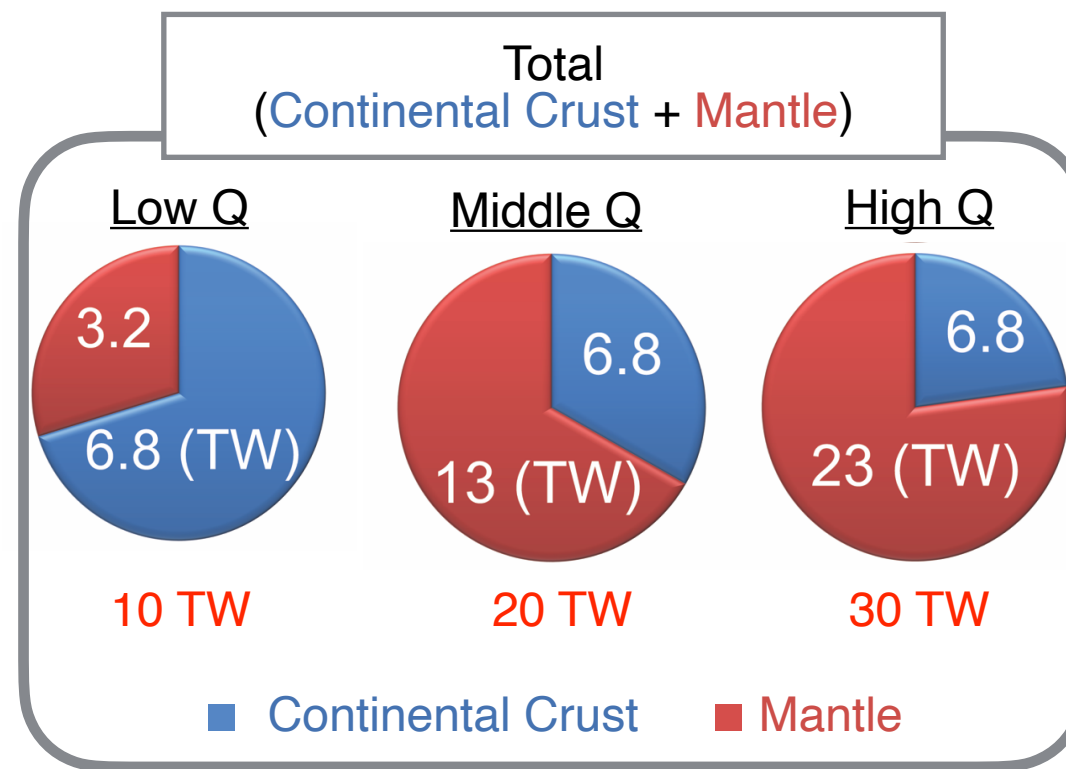
地球ニュートリノ観測のモチベーション

マントル構造の解明



地球内部燃料の残存量

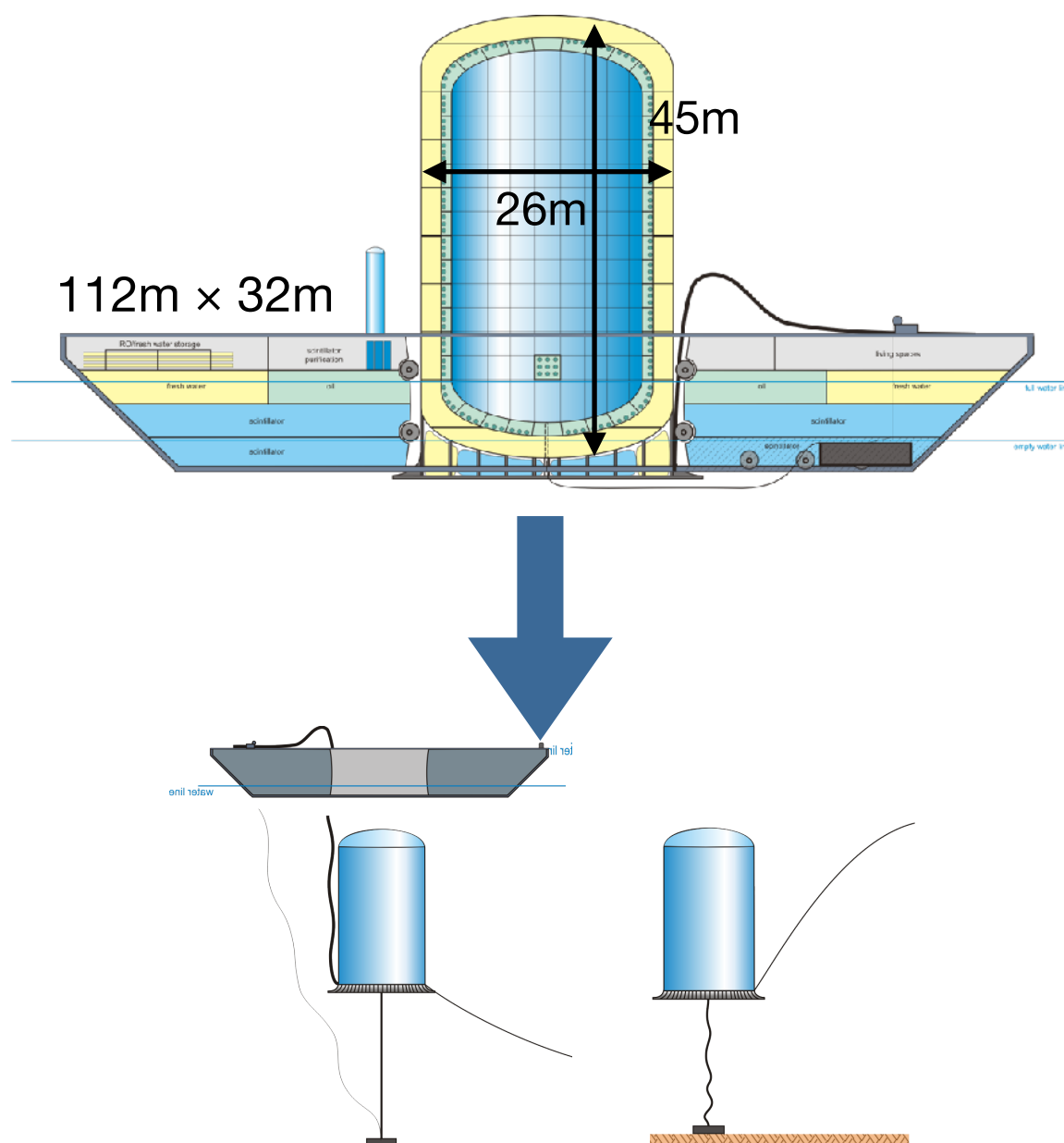
surface heat flow : 46 ± 3 TW



Th/U = 3.9, K/U = 1.4×10^4

マントル地球ニュートリノ観測によって
地球科学の根本的な謎が解明できる

2005年 ハワイで発案”Hanohano”



船で海上へ運搬
設置場所で検出器を沈める

2019年、
JAMSTEC&東北大学共同研究スタート



従来の検出器と異なり、地下ではなく
海底で、マントル由来の
地球ニュートリノを観測する

- * 検出器サイズ : 10-50 kt(最終目標)
- * 設置場所 : 2~5 kmの深海, ハワイ沖が第一候補
- * 設置期間 : 1年以上/1箇所

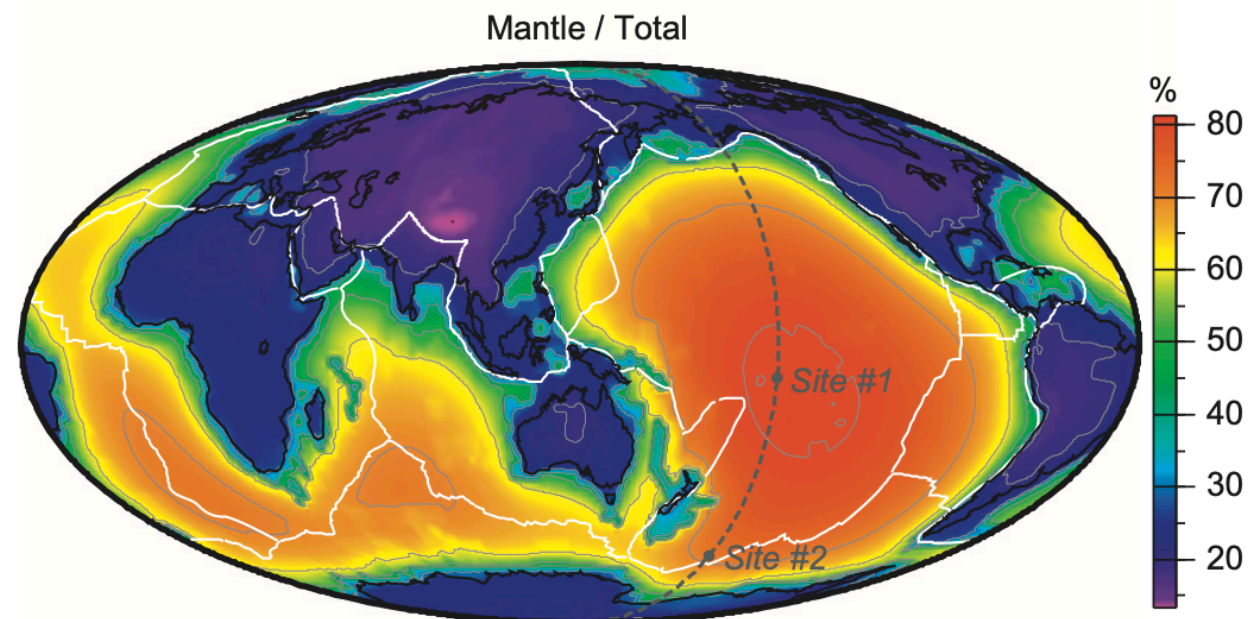
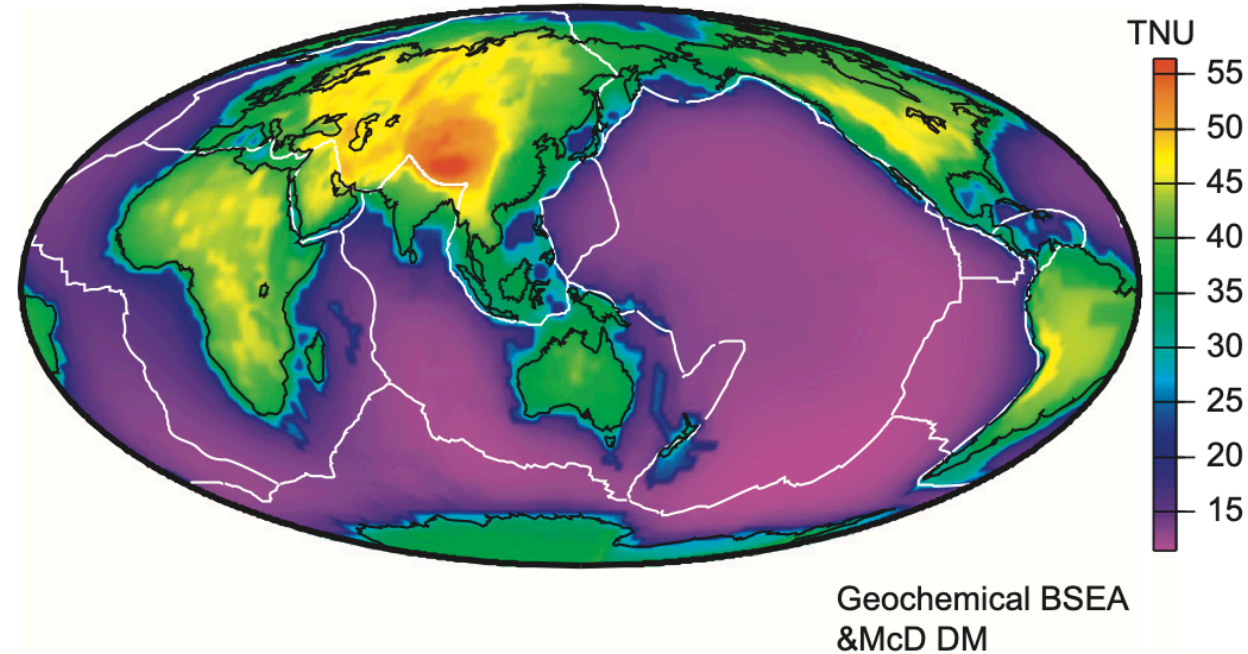
OBDの利点

1. マントルからの寄与が直接観測可能

O. Sramek et al. /

Earth and Planetary Science Letters 361 (2013) 356–366

Crust+mantle geoneutrino signal

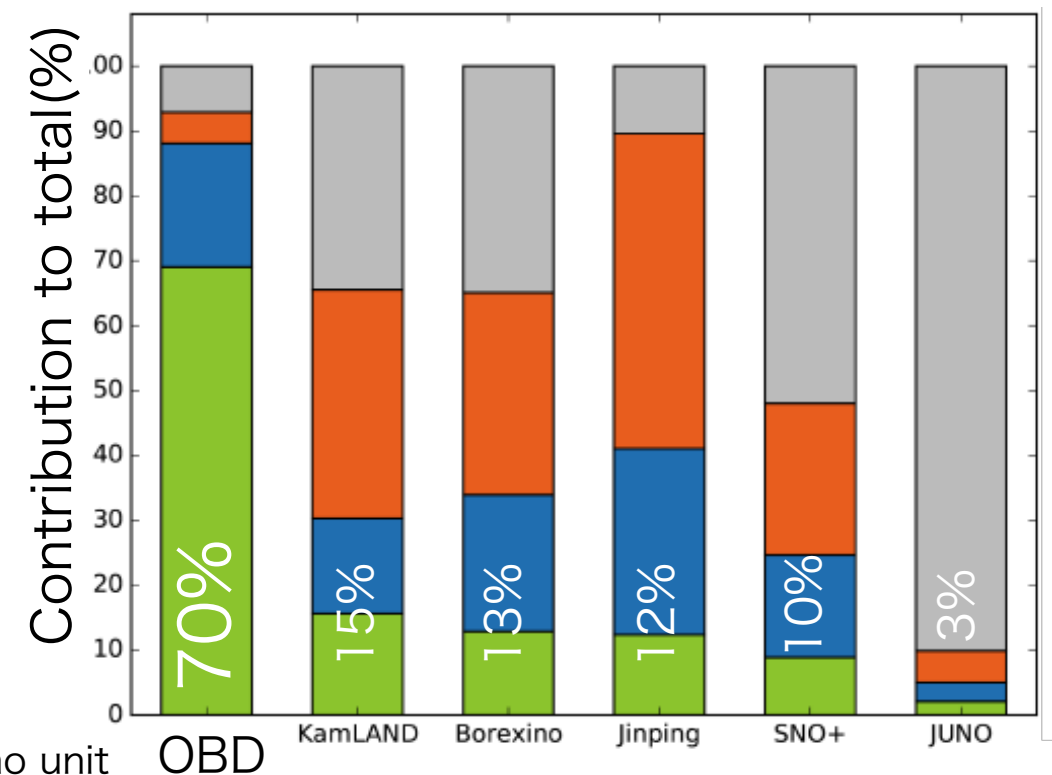
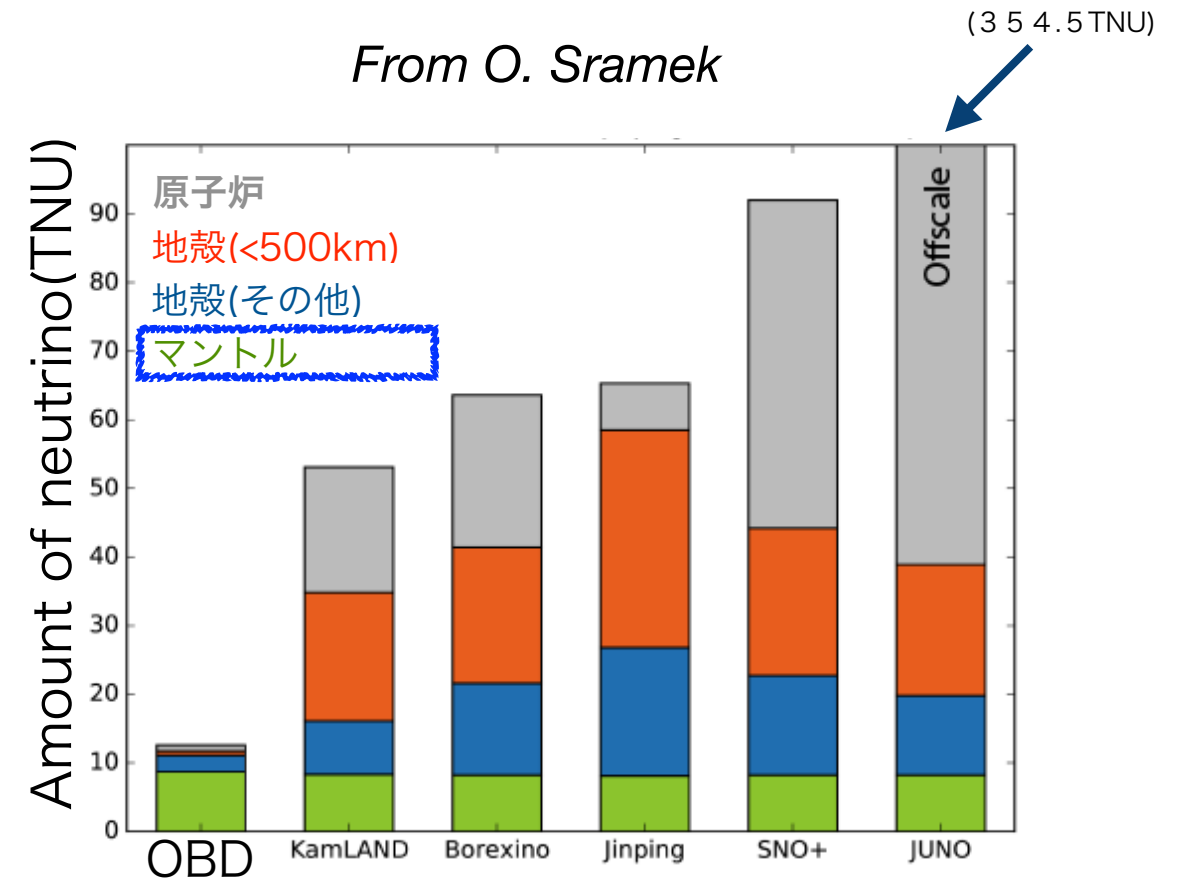


海洋地殻は薄く、
U,Th量も少ない

TNU:

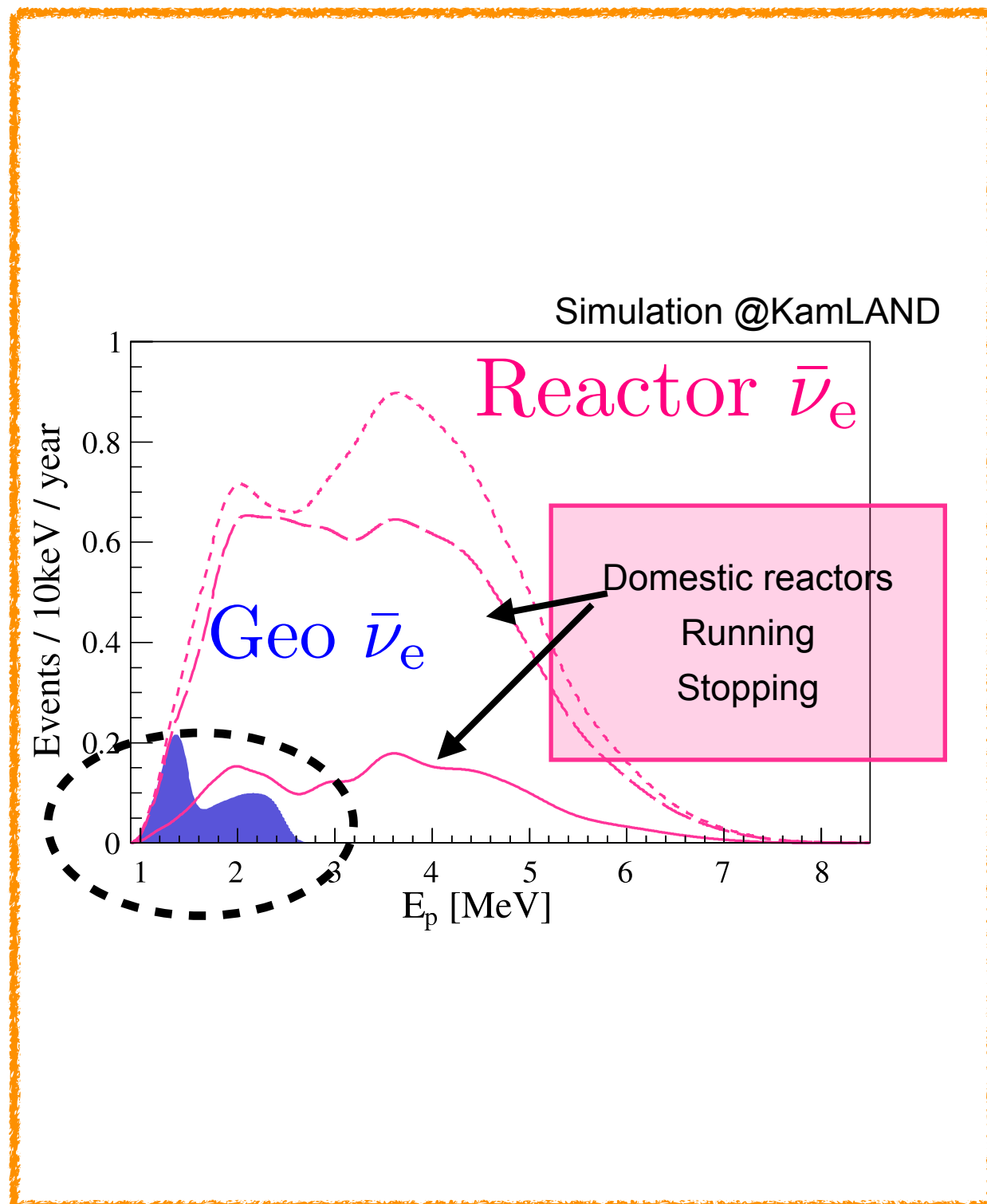
terrestrial neutrino unit
= 1 event/ 10^{32} protons/year

From O. Sramek

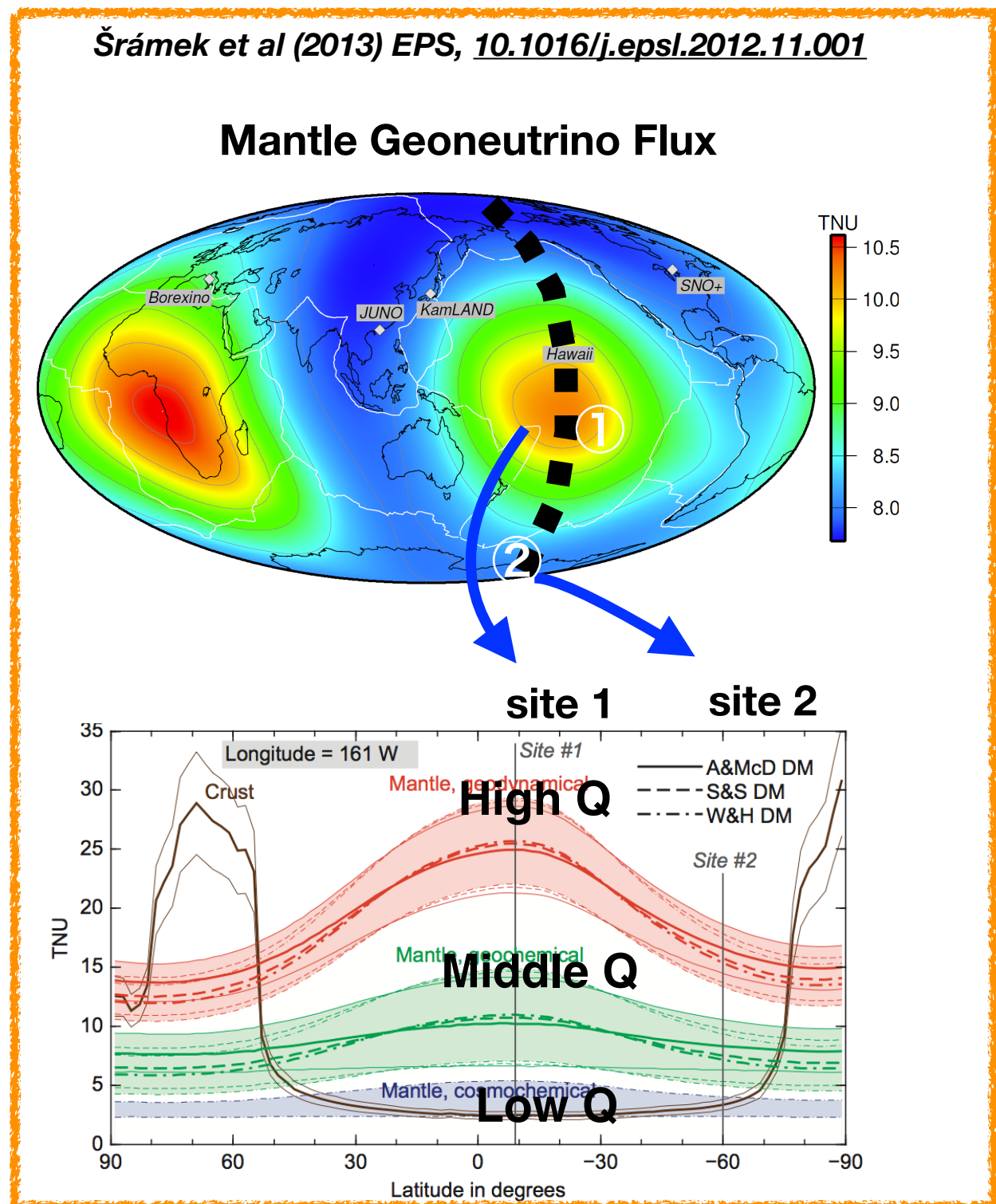


OBDの利点

2. 原子炉から離れて観測可能



3. 複数点で観測可能



OBD計画全体像

2019

科研費採択

2020~2022

~20kg

~1-10t

~1.5kt

~10-50kt

より成熟したサイエンス

世界初のマントル由来の
地球ニュートリノの直接観測

技術テストと海底環境の測定

ミュオンフラックス、温度、密度、海水の放射線
→観測結果から詳細な1.5kt検出器のデザインを決める

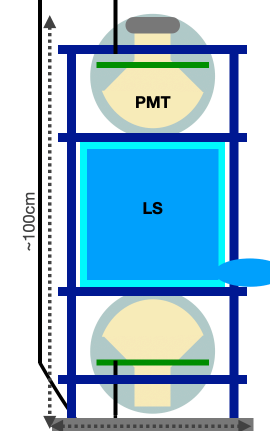
技術テストと世界初の海底環境での液体シンチレータ
検出器での観測

*JAMSTEC初島観測所の1km深海で観測

*開発要素

- 低バックグラウンドPMTシールド
- 深海環境に適した液体シンチレータ
- 電力供給、データ取得システム

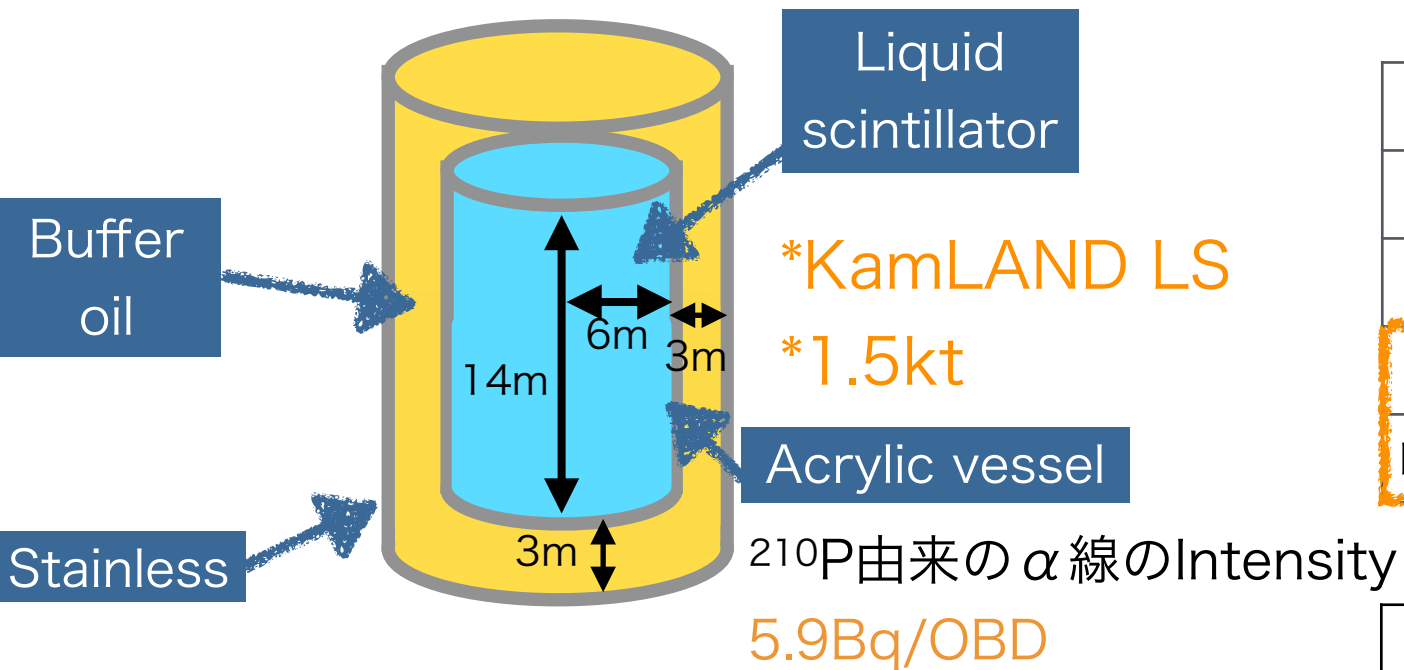
Detector design



JAMSTECと東北大学の
共同研究スタート

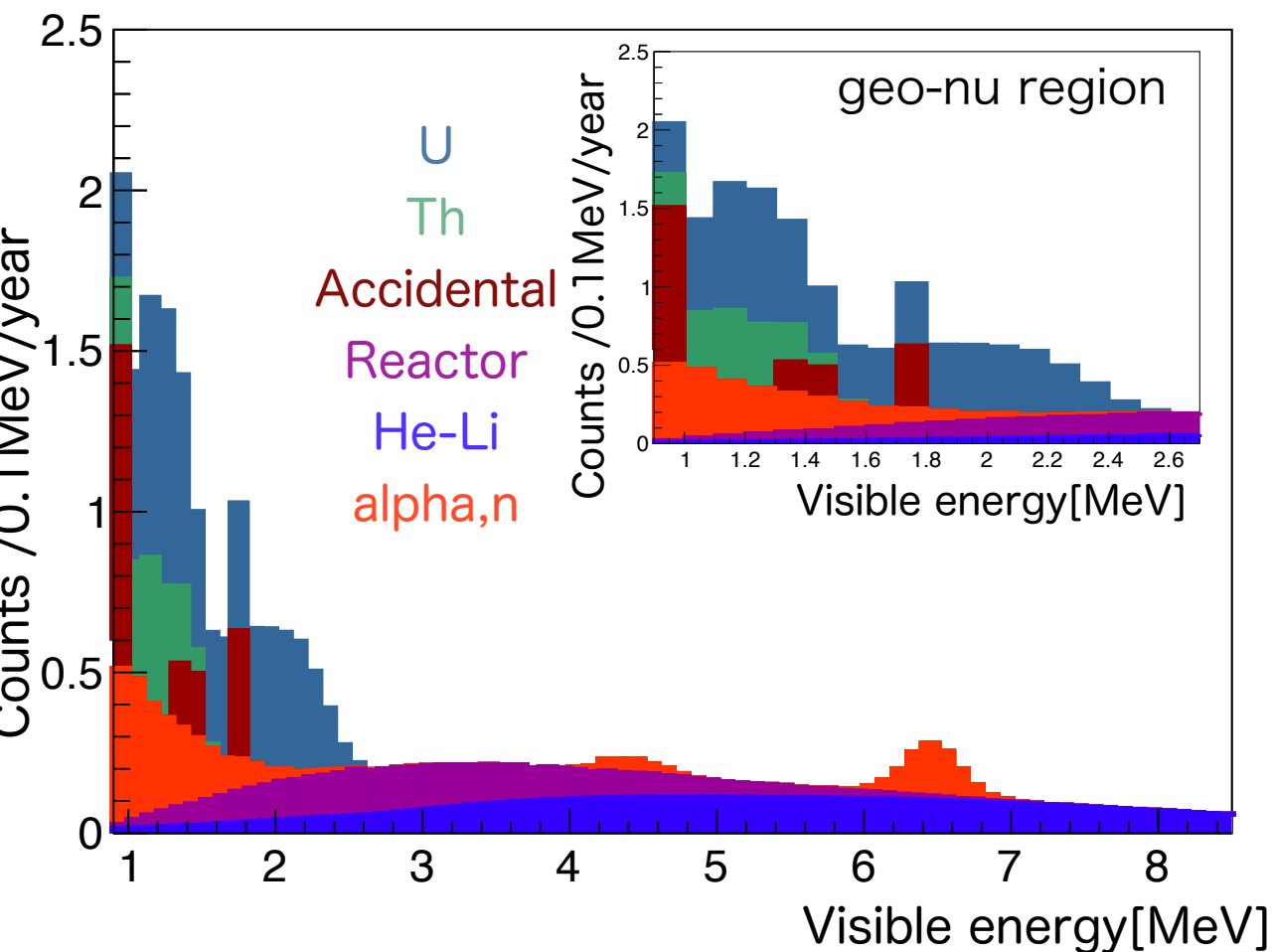


OBD1.5kt検出器の予測スペクトルと観測感度



Assumed amount of ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K

	^{238}U [g/g]	^{232}Th [g/g]	^{40}K [g/g]
Acrylic	1E-11	1E-11	1E-11
LS	5E-18	1.3E-17	1E-18
PMT	1.5E-07	2.4E-07	1E-08
PMT shield	1.5E-07	2.4E-07	1E-08

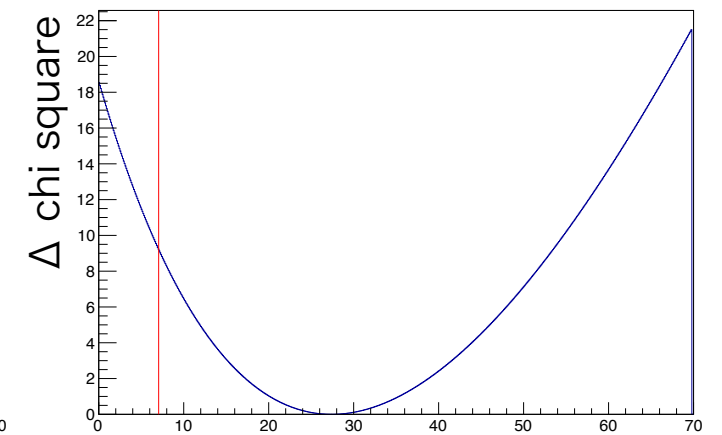
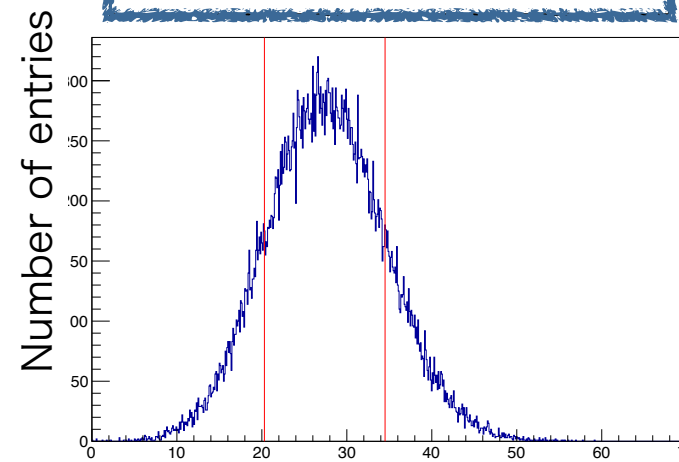


Signal

Signal	rate[event/year]
U	7.1
Th	1.8
total geonu	8.9
U mantle	5.3
Th mantle	1.3
total mantle	6.6

Background

Source	events [/year]	Geonu-region
Reactor	4.4	1.6
Accidental	2.4	2.4
He_Li	6.2	0.5
Alpha,n	3.6	2.6
total	16.6	7.1



予測観測数 $26.4^{+6.4}_{-6.5}$ events/3years

マントル地球ニュートリノ観測感度 3.5σ

開発要素

PMTシールド

観測場所は深海(2~5km)であり、かかる圧力は20~50MPa

PMTの破損、爆縮を防ぐためにPMTの周りにシールドをつける必要がある

強度はもちろんのこと、低バックグラウンドな素材が求められる

シールドの素材はガラスorアクリル

*特徴

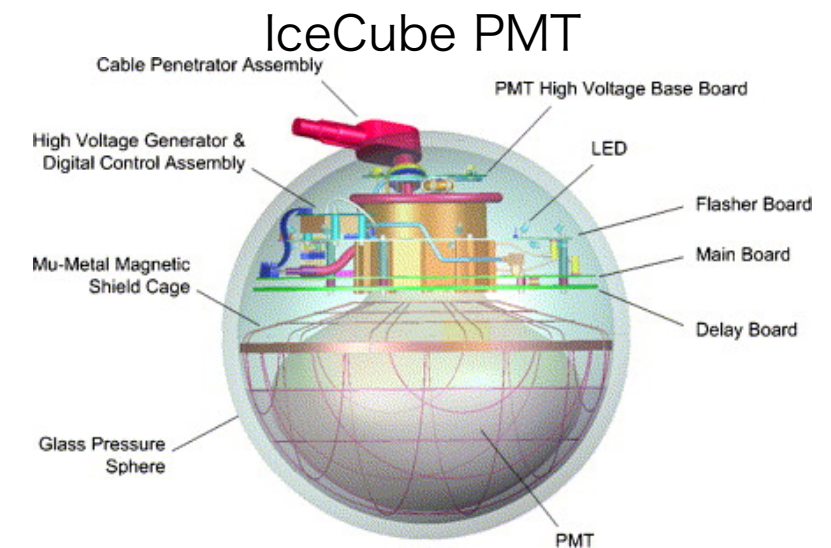
ガラス:○海洋底、高圧下の実験で多数の実績あり

×商品化されている放射性物質を多く含む

×低放射能な石英は高価

アクリル:○安価かつ低放射能

×海洋実験では実績がない



From Astroparticle Physics 26(2006)155-173

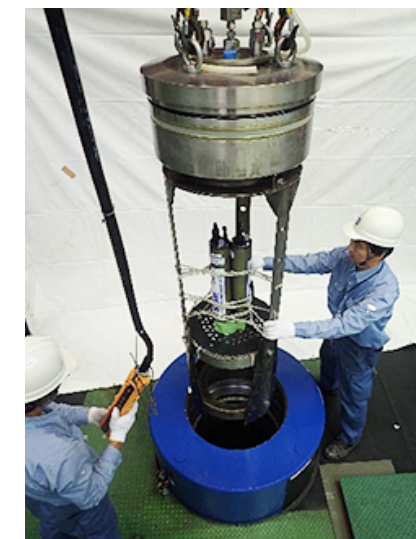
*現在の開発状況

ガラス:*ガラス球制作業者と共に低放射性物質の素材選定済み

*製造過程での不純物混入の対策をし、サンプル制作、分析を行う(2月中)

アクリル:*耐圧テスト用アクリル球を製作中(来週完成予定)

*JAMSTECの高圧実験装置で耐圧試験を行う(2月中)



JAMSTEC高圧実験装置

開発要素

液体シンチレーター

深海の環境は低温($\sim 4^{\circ}\text{C}$)かつ高圧(20~50MPa)

そのような環境で十分機能する液体シンチレーターを作る

現在進行中

Hanohanoの実験結果(2005年)

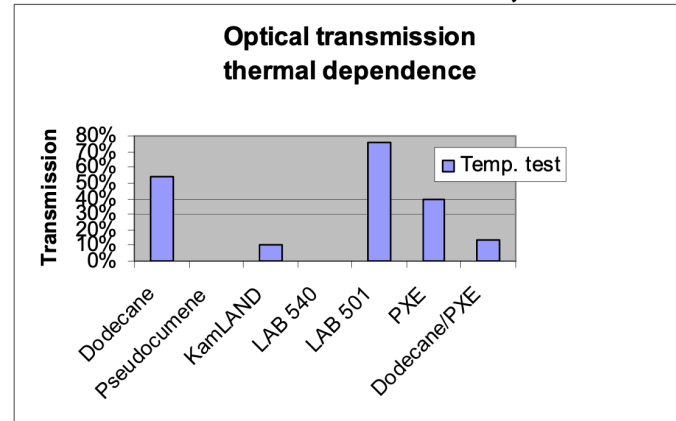


Figure 7.1: LS candidate light transmission at 4°C . The estimated instrumental and systematic error for the tests presented is $\pm 2\%$.

From Hanohano final report
液シン中の水分が原因

LAB液シンの発光量の温度依存性(2018年)

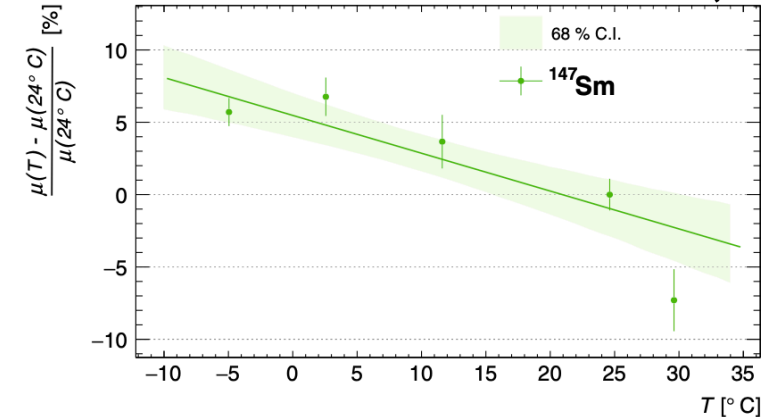


Fig. 15 Shift of the Gaussian fit mean values versus liquid scintillator temperature, for the ^{147}Sm loaded LAB measurements. Each data point contains the combined values for the repeated measurements and is normalisation to the room-temperature value, $(24.62 \pm 0.04)^{\circ}\text{C}$. The green shaded area marks the 1σ confidence band obtained from the linear fit

A. Sørensen et al. /

Temperature quenching in LAB based liquid scintillator

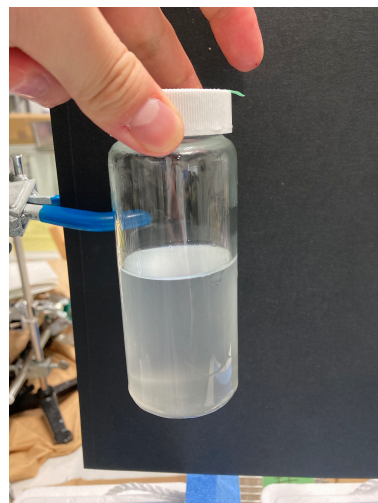
東北大での実験

LAB

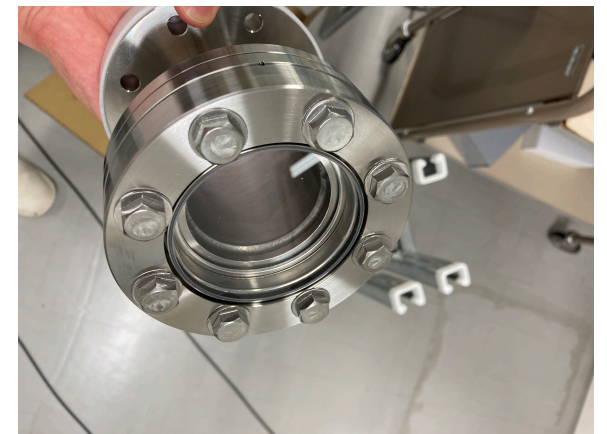
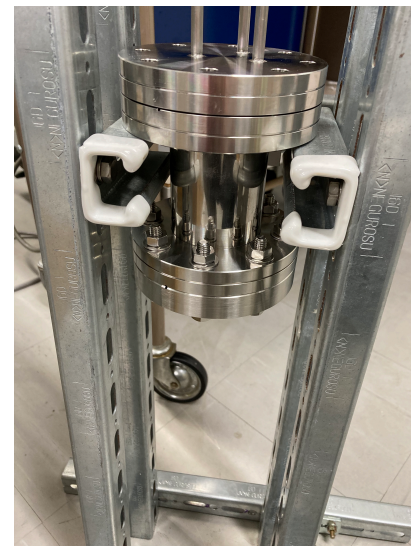


←パーズあり
パーズなし→

水温を 2°C ~ 4°C
に保って数時間
置いておいたもの



低温下での発光量測定装置



← ↑ 使用予定の実験装置

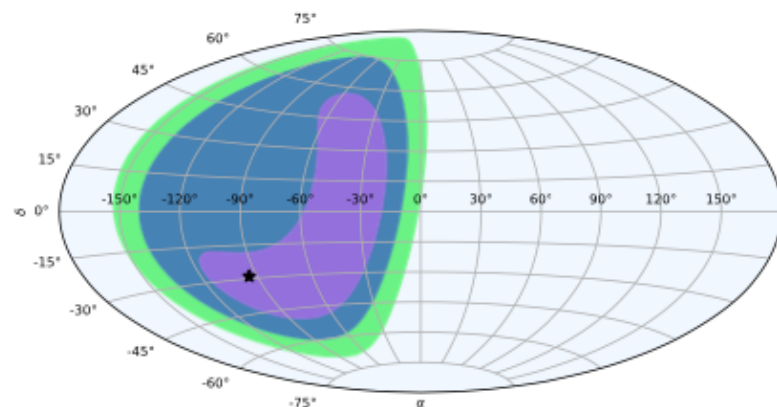
超新星ニュートリノ観測への寄与

他の検出器と大きく離れた、太平洋で観測をするため、
超新星 ν の三角測量に大きな寄与を与えることが期待できる。

N.B. Linzer and K. Scholberg Phys. Rev. D 100, 103005

この論文では三角測量の方法とそのシミュレーションについて
記載されている

以下はJUNO,DUNE,Super-Kの組み合わせでのシミュレーション結果と
それらにIceCubeを加えた結果



1 σ
2 σ
3 σ

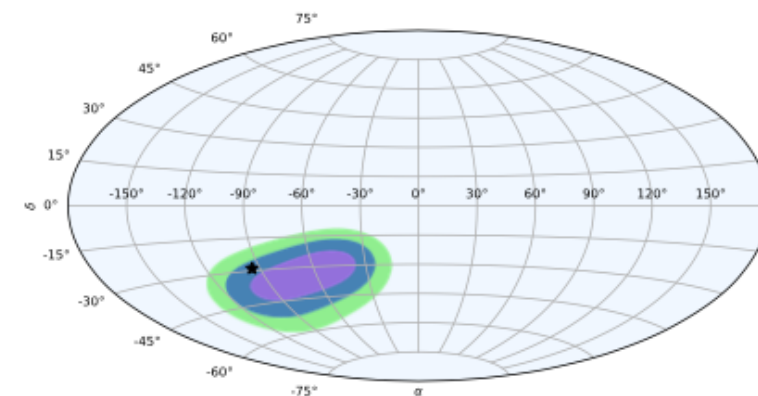
三角測量による超新星位置決定のシミュレーション結果

黒い点が実際の超新星の位置

JUNO, DUNE, Super-K
With NH

10-kpc supernova

*N.B. Linzer and K. Scholberg
Phys. Rev. D 100, 103005*



JUNO, DUNE, Super-K and IceCube
With NH

10-kpc supernova

* * 地球ニュートリノ

- * 地球内放射性物質量を直接観測できる新たなツール
- * 観測から地球科学的知見を得られることをすでに示している
- * 地球科学・素粒子物理の異分野から成るコミュニティが成熟している

* 海洋底反ニュートリノ検出器 (OBD)

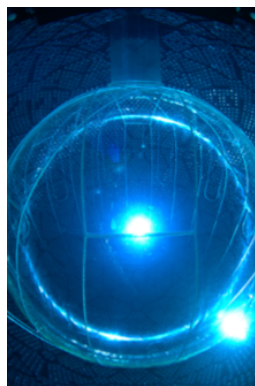
- * マントル地球ニュートリノの直接観測ができる唯一の手段
- * マントル地球ニュートリノの測定によって地球科学の根本的な謎が解明できる
- * 東北大 + 海洋研究開発機構で共同研究がスタート
- * OBDは超新星ニュートリノの三角測量に大きな寄与を与えることが期待できる
- * 現在は20kg検出器に向けて開発中
PMT耐圧シールド 液体シンチレーター データ取得システム

Backup

Anti-neutrino Detector

SNO+

1 kt, LS+, 5.4 km.w.e.
Filling, counting in progress!

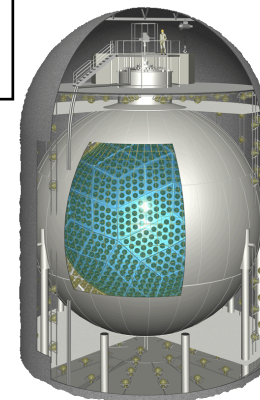


Baksan

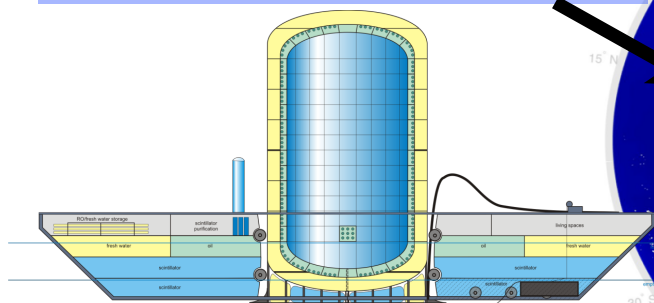
~10 kt, LS
4.8 km.w.e.
R&D

KamLAND

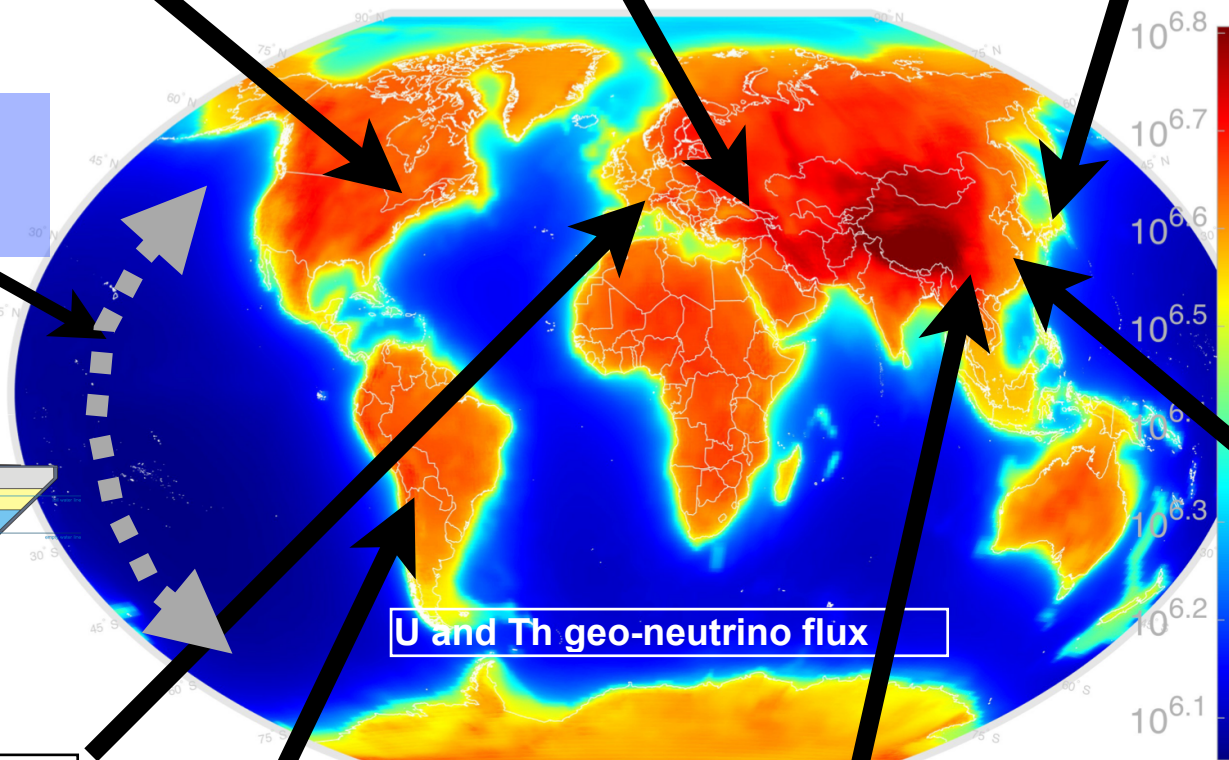
1 kt, LS
2.7 km.w.e.
running



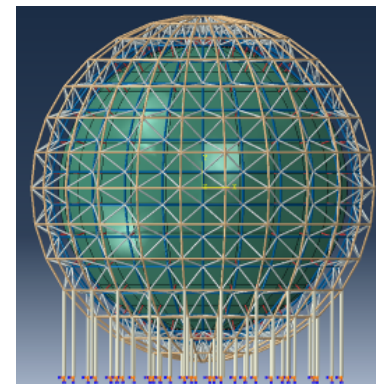
**Ocean Bottom
Detector**



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



JUNO



20 kt, LS
1.5 km.w.e.
undue construction
(2022~)

Jinping

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

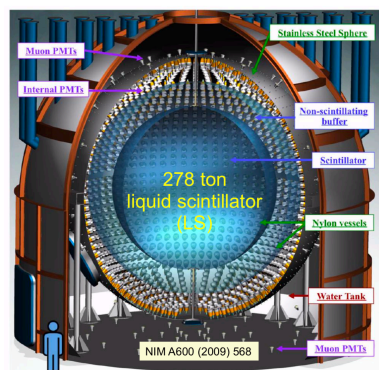


ANDES

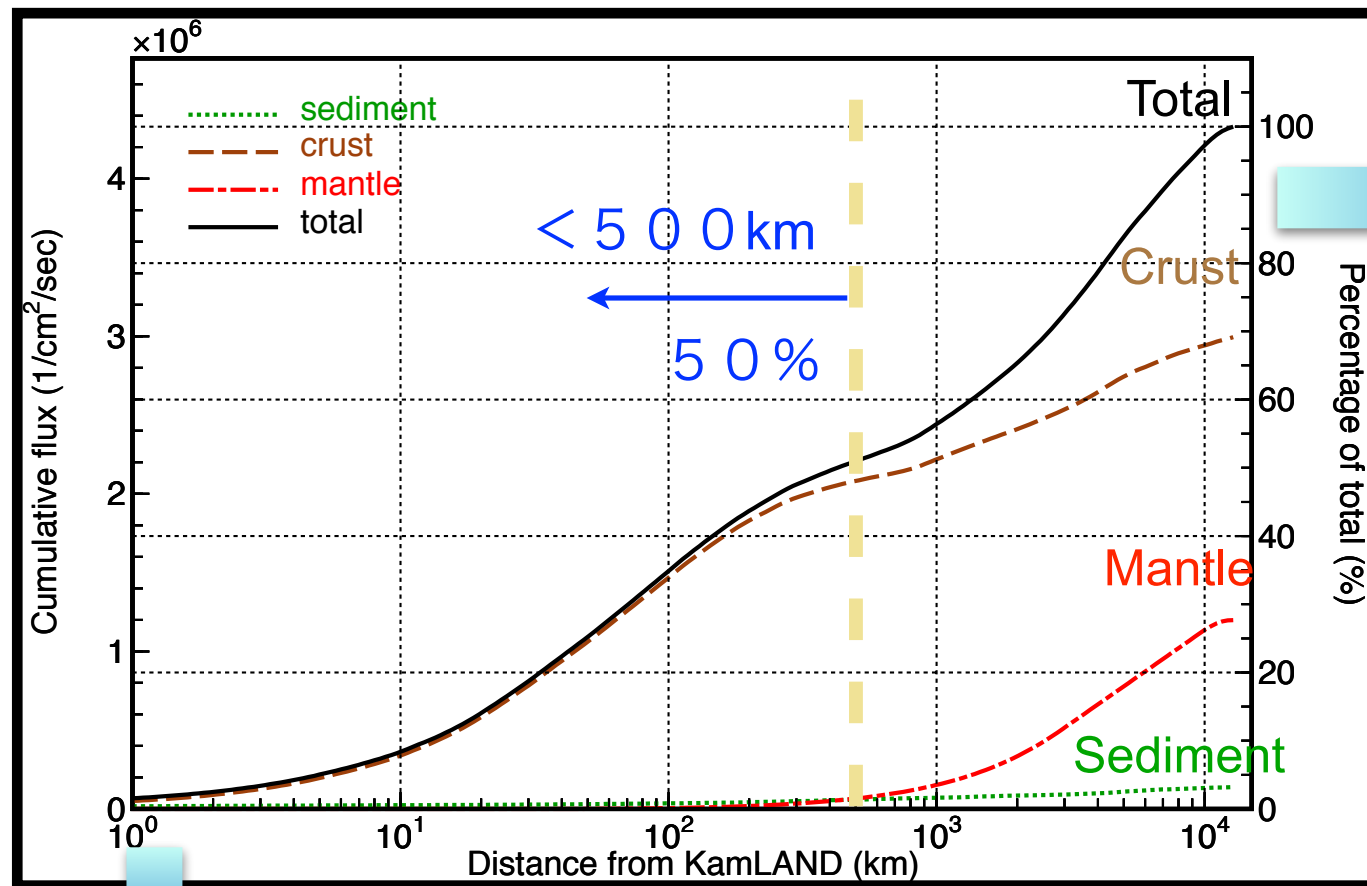
~3 kt, LS
4.5 km.w.e.
R&D

Borexino

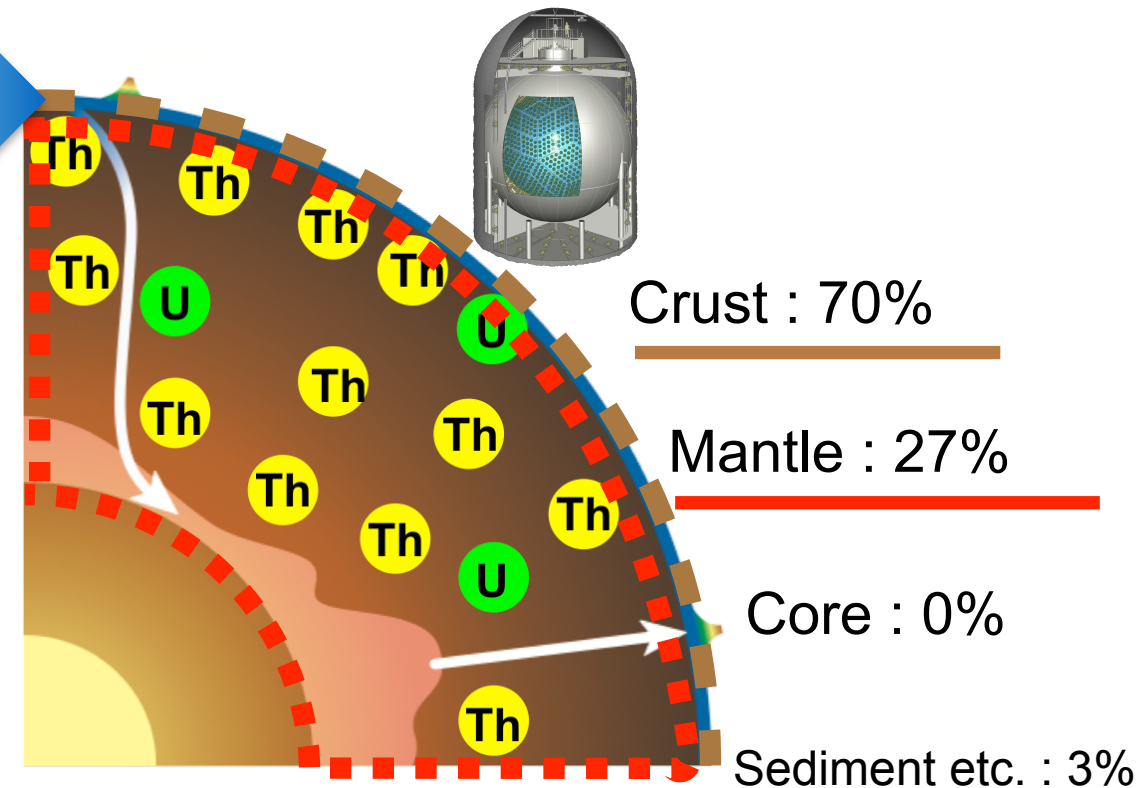
0.3 kt, LS
3.8 km.w.e.
**shutdown by the
end of 2020**



Geo-neutrino flux at Kamioka



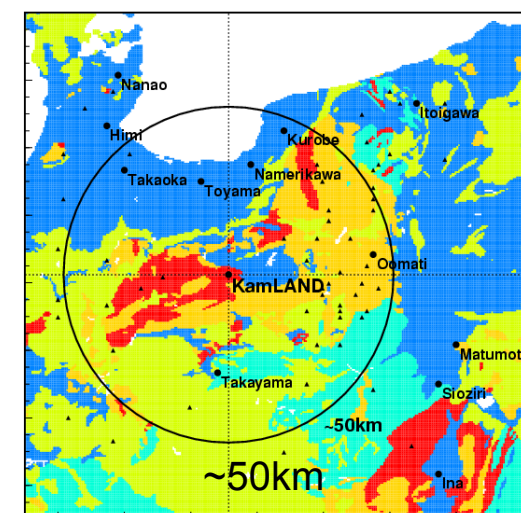
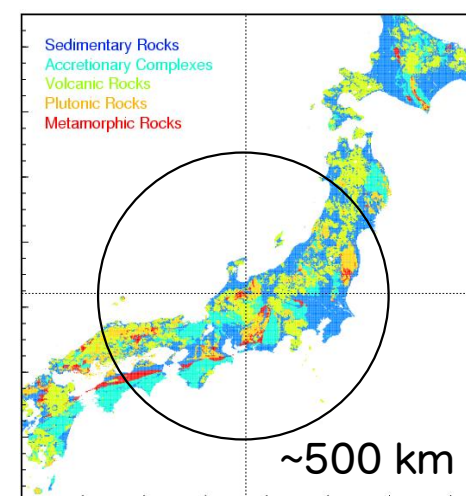
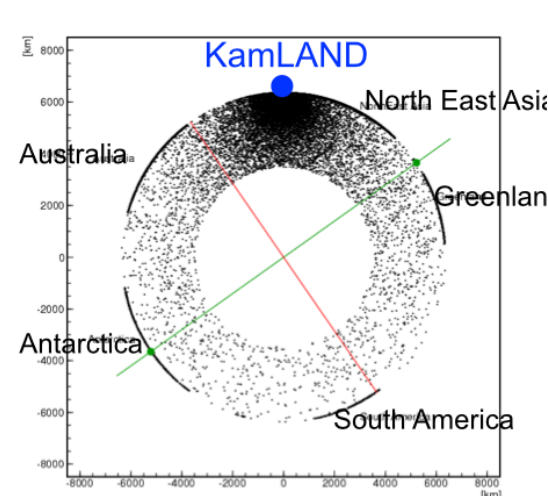
Contributions from each part



Contributions from each area

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

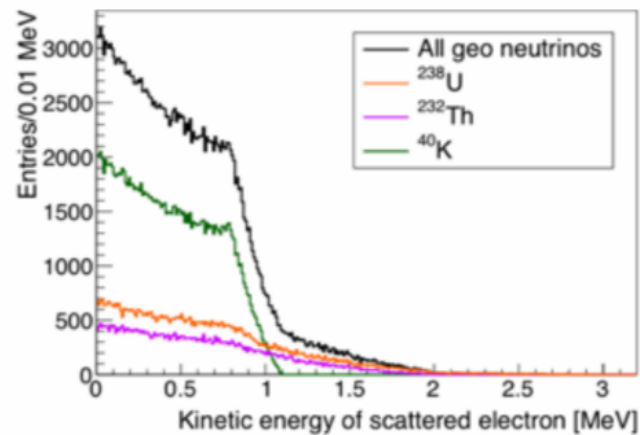
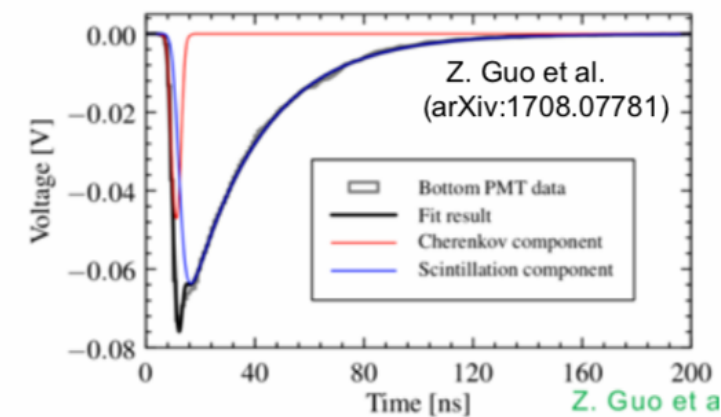
Important to understand local geology



40K地球ニュートリノの観測(scattering)

Liquid Scintillator Cherenkov Neutrino Detector

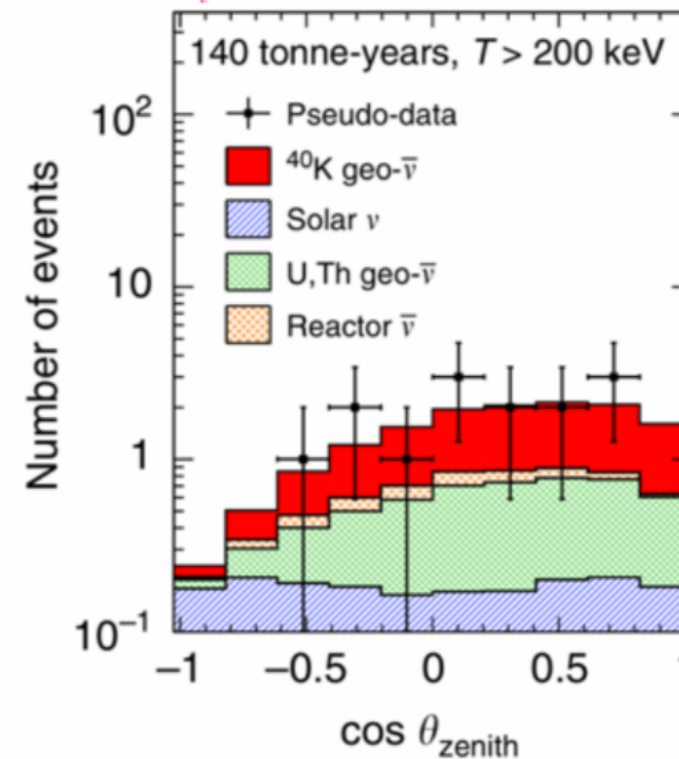
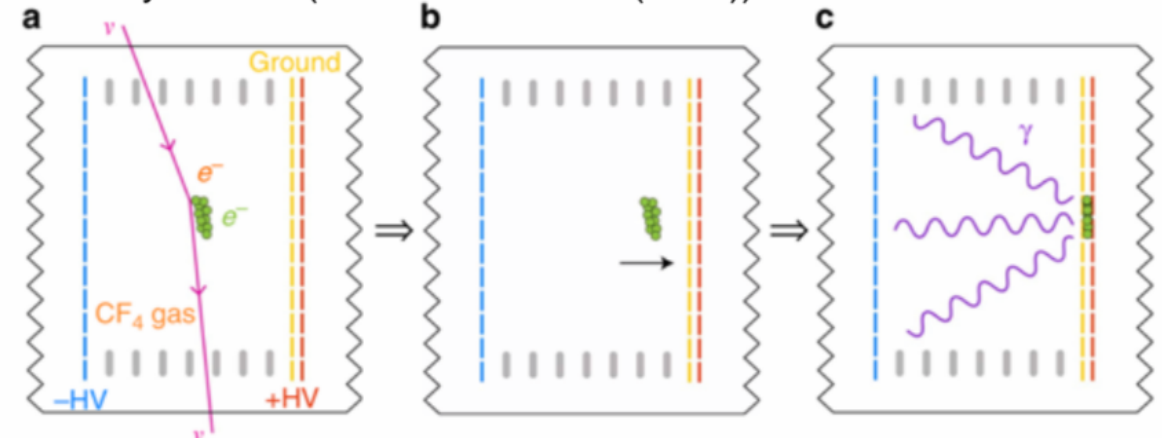
Z. Wang & S. Chen (arXiv:1709.03743)



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

Gas TPC

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



- Huge gas chamber (cf. CF₄)
- Technically difficult

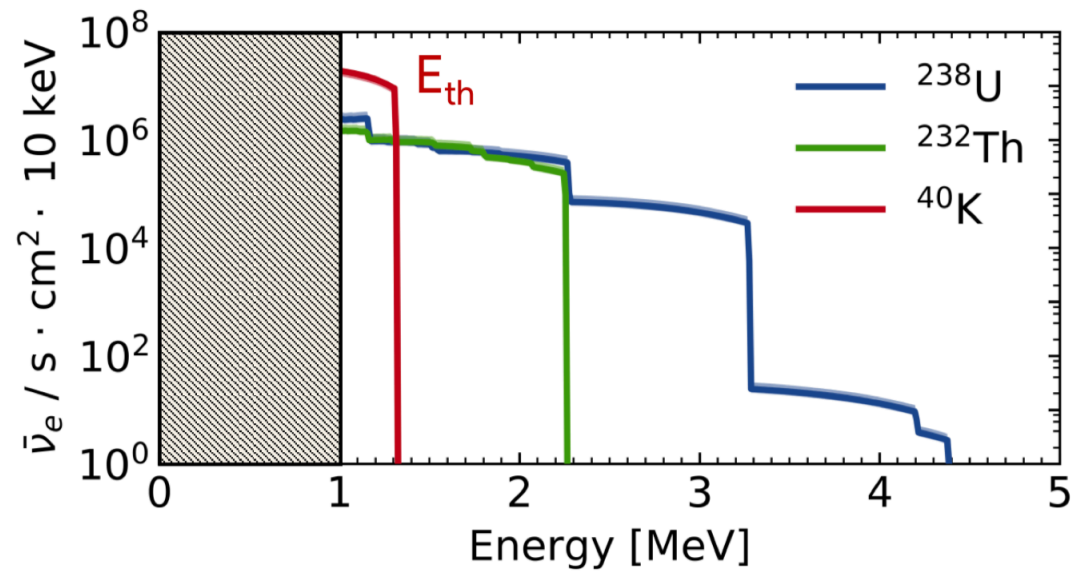
40K地球ニュートリノの観測(liquidO)

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

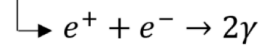
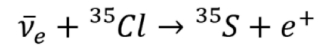
$$\bar{\nu}_e + {}_{Z+1}^AY \rightarrow {}_Z^AX + e^+ - E_{\text{th}}$$

We shall require:

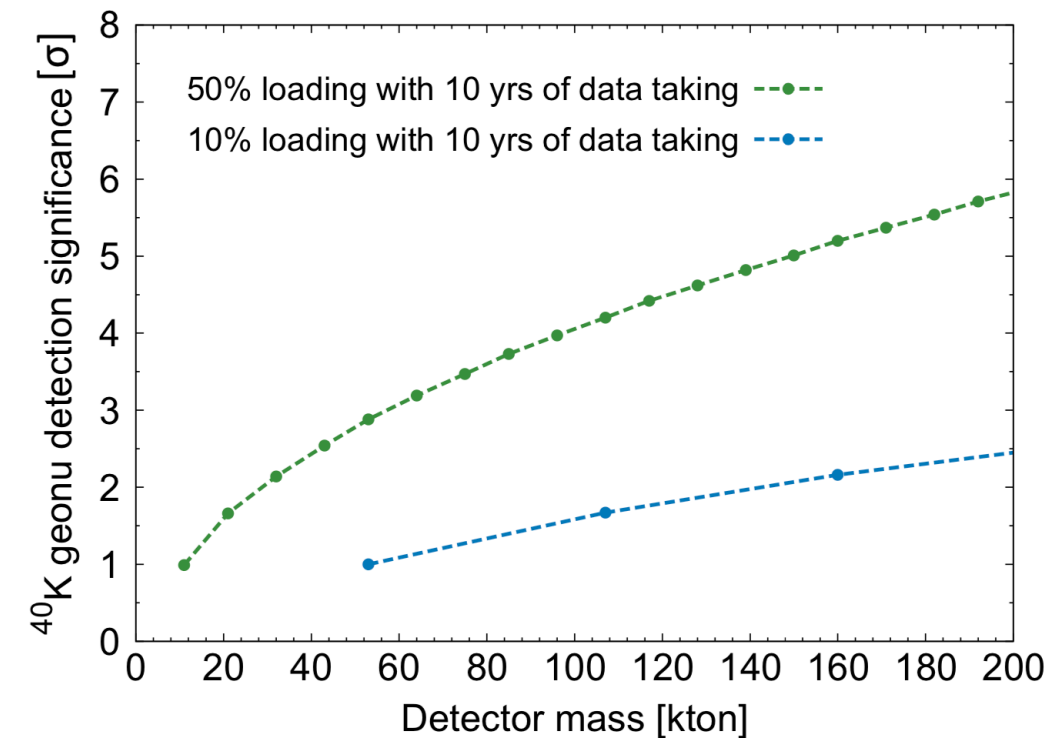
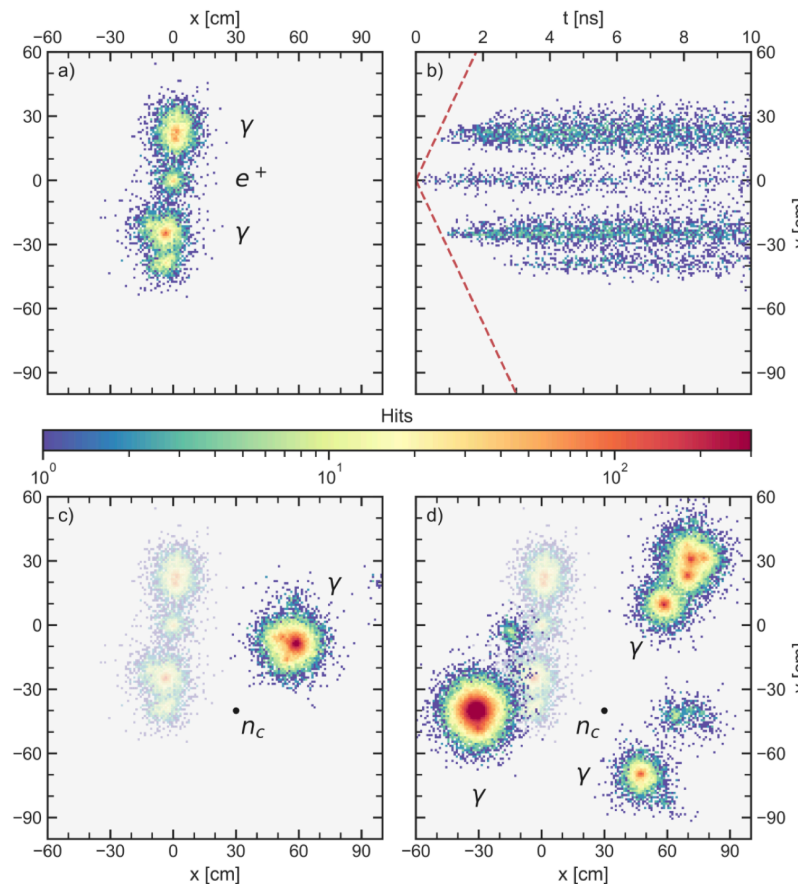
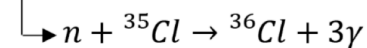
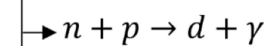
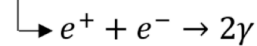
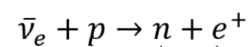
- $E_{\text{th}} < 1.3 \text{ MeV}$
- High cross-section
- High Y natural isotopic abundance



IBD(^{35}Cl)



IBD-proton



Neutrino2020

Poster #491 Physics potential with LiquidO
(Andrea Serafini et al.)