地球ニュートリノ研究の現状と展望

- 1. 地球ニュートリノ
- 2. 研究の現状
- 3. 展望

榎本三四郎 University of Washington 1

日本物理学会,宇都宮大学,2017年9月12日

<u>地球ニュートリノ</u>

地球内部の放射性元素の崩壊からのニュートリノ



²³⁸ U \rightarrow ²⁰⁶Pb+8⁴He+6e⁻+6 $\bar{\nu}_{e}$ +51.7 (MeV) ²³² Th \rightarrow ²⁰⁸Pb+6⁴He+4e⁻+4 $\bar{\nu}_{e}$ +42.7 (MeV) ⁴⁰ K \rightarrow ⁴⁰Ca+e⁻+ $\bar{\nu}_{e}$ +1.3 (MeV)

地球熱学

- ・放射性熱源は地球冷却以外の唯一の熱源
- ・総量、分布の理解はダイナミクスの理解に決定的に重要
 (地殻熱流量~47TW、放射性熱源~20TW???)

地球化学

- ニュートリノは深部化学組成の直接の情報をもたらす
- ・地球生成プロセス、進化(構造形成)の理解に重要
 (最も深い穴~12km、最も深いところからの噴出物:~200 km)

<u>予備知識:隕石組成から地球全体組成が推定できる</u>

地球の原料と思われるもの: C1-炭素質コンドライト隕石



- ✓ 組成が太陽大気とそっくり
- ✓ 揮発性成分を含んでいる
- ✓ 高温(100℃)で不安定な鉱物を含んでいる

他の隕石(コンドライト以外)は:

- ✓ 「石」や「鉄」に分離している
- ✓ 一度溶融を経験した形跡がある
- ⇒ 一度集積溶融し、層構造の天体を形成したあと破壊された

他の原料候補:エンスタタイトコンドライト隕石

鉄が硫化鉄の形で存在する ⇒ 強い還元性環境で生成された ✓ 酸素などの同位体構成比が現在の地球とよく合う ✓ 鉄が多め:実はこれも現在の地球モデルによく適合する





<u>予備知識:U・Thは大陸地殻に濃集する</u>

高圧化で岩石が部分溶融すると高密度結晶を作りにくい元素が液相に濃集する 不適合元素:高密度結晶に入りにくい元素

- Large Ion Lithophile (LIL): イオン半径の大きいもの (ウランやトリウム)
- High Field-Strength Elements (HFSE): 価数の大きいもの

Ni ²⁺	Cr ³⁺	Co ²⁺	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K +	Th ⁴⁺	U ⁴⁺
0.8 Å	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	1.5	1.1	1.1

プレートの生成、沈み込みに伴う部分溶融で不適合元素が抽出され<mark>地殻に濃集</mark>する ⇒ <mark>大陸地殻の形成</mark>



<u>予備知識:現在の地球モデル</u>

原料

- •C1-炭素質コンドライトだと思う
- エンスタタイトコンドライトかも (U/Th 量が半分くらいになる)
- ・惑星形成時の揮発性物質の 減少を考慮する
- 初期の小惑星衝突で
 表面が減ったかも

分布

- ・コアは鉄-ニッケル合金、U/Th はない
- プレートテクトニクス(地殻の生成)により
 U/Th は地殻に濃集される
- ⇒ 地球の放射性物質の半分は大陸地殻にある
 - ・地殻組成は見積もれるけれど、
 モデル依存。深部地殻は特に
 - マントルのサンプルもある けれど量が限られていて、
 全体を代表するかも疑問。
 岩石学的モデルが優位

構造

- ・地震波は、大規模な循環構造を示唆
- ・岩石学的には、一層対流は考えにくい
- ⇒ 対流は1層なのか2層なのか、もっと複雑なのか?
- ・沈み込んだプレートが団子になってるように見える
- コアーマントル境界になにか積もっているように見える
- ・地震波で見える構造に物質分布が対応しているか?

エネルギー収支

- 表面熱流量 47 TW
- 放射性熱源~20 TW (地殻が半分)
- 残りが冷却熱?
- ・コアの冷却(凝固)熱:4~15 TW
- ・マントル対流モデルと合わない
 - (放射性熱源をあと~10 TW ほしい)

<u>ニュートリノフラックス計算のための参照モデル</u>

とりあえず真ん中を狙う。不定性、妥当性は後で考える

大陸上部地殻 U: 2.8ppm / Th: 10.7ppm 大陸中部地殻 U: 1.6ppm / Th: 6.1ppm 大陸下部地殻 U: 0.2ppm / Th: 1.2ppm

Rudnick et al. (1995) を とりあえず参照。

海洋地殻

U: 0.08ppm / Th: 0.32ppm

マントル組成は BSE から 地殻を差し引いて求める。 とりあえず一様を仮定。

マントル U: 0.012ppm / Th: 0.048ppm

外核・内核^U: 0ppm / Th: 0ppm

核には U・Thは存在しない

重要な部分:BSE 組成と大陸地殻モデル

<u>KamLAND における地球ニュートリノ観測</u>



観測の現状



<u>KamLAND における地球ニュートリノ観測</u>



<u>KamLAND における地球ニュートリノ観測</u>



KamLAND 観測結果 (2016 Preliminary)

Live-time: 3900.9 days



<u>KamLAND 観測結果 (2016 Preliminary)</u>

低原子炉期間だけを見ると

Live-time: 1259.8 days



<u>KamLAND 観測結果 (2016 Preliminary)</u>

Rate & Spectrum & Time-variation Fitting



<u>マントル組成モデルへの制約</u>

いくつかの単純化の仮定のもとでニュートリノフラックスを全地球熱量に変換 (特に重要な仮定:マントル組成分布は球対称,地殻モデルは正しい)



全地球放射化熱:15+6.5 TW

<u>Th/U存在量比への制約</u>

いくつかの単純化の仮定のもとでニュートリノフラックスを Th/U 量比に変換 (特に重要な仮定:Uと Th は地球の中で同じように振る舞う(地表付近では正しくないかも))



コンドライト組成モデル

普通コンドライト(普通に多い): J. S. Goreva & D. S. Burnett, Meteorite Planet Sci 36, 63-74 (2001) 炭素質コンドライト(熱変成なし,始原的): A. Rocholl & K. P. Jochum, EPSL 117, 265-278 (1993) エンスタタイトコンドライト(還元的): M. Javoy & E. Kaminski, EPSL 407, 1-8 (2014)



KamLAND & Borexino (Šrámek et al.)

(重要な仮定:マントルは2層で組成は層内全域一様,地殻は3層で組成は層内全域一様)



Šrámek et al. , S. Rep. 33034 (2016)







多地点観測で空間分解能を得る

Latitude [deg]

- KamLAND 1 kt, 2700 m.w.e.
- Borexino 0.3 kt, 3700 m.w.e.
- SNO+ (2017~)
 1 kt, 5400 m.w.e
- Juno (2020~)
 20 kt, 1500 m.w.e.
- Junping (R&D)
 1 kt, 6700 m.w.e.
 地殻が厚いところ
- OBK (R&D) 10~50 kt, ~5000 m.w.e. 深海を移動する

Geoneutrino Event Rate 60-Events /10³².proton /year 50-50 40 30 0 20 -50 10n. 50 100 150 200 250 300 n Longitude [deg] Junping OBK (aka Hanohano) 70 TNU 10.5 10.0 60 9.5 SNC 50 9.0 Borexino Total geonu in TNU 0 0 0 0 8.5 JUNC KamLAND 8.0 TW radiogenic power in BSE 20 High_C 10 ledium_C Approxin low-C 0 30 20 40 10 50 マントル下部の Hidden Reservoir Lithospheric flux in TNU 19 をスキャンする 地殻の寄与を決める

Šrámek et al., EPSL, 10, 1016 (2013)

Šrámek et al., S. Rep. 33034 (2016)

神岡での課題:地殻の寄与を正確に見積もる

神岡での観測では地殻の寄与が75%を占める

理由:①近い ②大陸地殻はマントルよりもはるかに多くの U & Th を含む(100倍くらい)



- ・半分が半径 500 km から
- ・1/4 が半径 50 km から
- ・1~2% が神岡鉱山から
- 1/4 がマントルから
 ⇒ 地殻組成を1割間違えると
 マントル組成を4割間違える
 (観測誤差は別)



地殻は「手が届くから簡単」???

- 表層分布は全体分布を代表しない(気がする)
- 現在の神岡周辺地質のモデルでは
 「表層がそのまま垂直に分布」を仮定
 (それ以外に方法がなかった&昔はそれで良かった)

確率的地殻構造組成モデルの構築 (東大地震研・東大・東北大・UW)

地震波トモグラフィーからの ベイズ岩相推定



確率的岩石組成モデル



フラックス確率分布 (ベイズ確率)



確率的 U/Th 分布地図

濃度の誤差分布





21

夢:方向感度のあるシンチレータ



角度が分ると:

- ・原子炉ニュートリノの分離
- ・地殻とマントルの分離
- ・層構造の分解



・多地点高統計で地球トモグラフィー!!

希望:

・中性子はニュートリノの向きをおぼろげに覚えている $\overline{V}_e + p \rightarrow e^+ + n$



困難:

- ・中性子のランダムウォーク
- rが明後日の方角へ飛んでいく
- ・位置分解能が足りない

⁶Li (n, α) で中性子を吸収し、カメラで写真を撮る…

<u>方向感度シンチレータの開発(東北大学)</u>



渡辺寛子

<u> 夢:40K からのニュートリノ検出</u>

エンドポイント: 1.31 MeV (逆ベータ崩壊の最小エネルギー: 1.02 MeV)

低い Q_β, 小さい *ft* の核を探すと..

	Natural Abundance	Ethresh [MeV]	Amount for ~100 ev/yr
¹⁸⁷ Os	1.6%	1.025	16 Gton
³ He	<0.01%	1.041	7.4 ton
¹⁰⁷ Ag	51.8%	1.055	1.7 Gton
¹⁵¹ Eu	47.8%	1.098	680 kton
⁹³ Nb	100%	1.114	6.8 Gton
¹⁷¹ Yb	14.3%	1.119	98 kton
¹⁴ N	99.6%	1.179	98 Mton
⁷⁹ Br	50.7%	1.181	2.1 Gton
³⁵ Cl	75.8%	1.190	4.9 Mton
¹³⁵ Ba	6.6%	1.227	470 Gton
¹⁵⁵ Gd	14.8%	1.268	550 Mton
³³ S	0.76%	1.271	14 kton
¹⁰⁶ Cd	1.2%	1.216	~10 kton



Kobayashi et al, Geophys.Res.Lett. 18, 633 (1991)

Chen, Neutrino Science 2005

どれも無理っぽい…

<u>まとめ</u>

地球ニュートリノは地球熱学・地球化学の直接プローブ

- 熱収支問題に対する直接の観測
- 原料隕石,元素分配,…
- マントル構造, Hidden Reservoir, …

原子炉の停止により KamLAND の感度が大幅に向上

- 観測誤差がモデル不定性を下回る
- 現実的なマントルモデルにも制約をあたえつつある
- Th/U 質量比への感度も
- 地殻モデルをちゃんと作り直す必要

技術開発課題

- 角度感度のあるシンチレータ
- ⁴⁰K ニュートリノの検出

