

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	川田 七海	提出年	令和 4 年
学位論文の 題目	Spectroscopic measurement of geoneutrinos from uranium and thorium with KamLAND (カムランドによるウラン・トリウムに由来する地球ニュートリノの分離測定)		

論文目次

1. Introduction
2. Neutrino Geoscience
3. KamLAND Experiment
4. Event Reconstruction and Detector Calibration
5. Anti-neutrino Event Selection
6. Background Estimation
7. Neutrino-oscillation Analysis
8. Geoneutrino Analysis
9. Conclusion

要旨

1. 研究背景

地球が地殻-マントル-コアの三層構造を持つことは 20 世紀に始まった地震波観測で明らかになった。地球化学は地球の材料と考えられるコンドライト隕石や地表での岩石サンプルの組成から地殻とマントルの平均組成を推定している。しかし、地球内部物質のサンプルは存在せず、どのような種類の隕石が地球を作ったかも未確定なため、地球化学による組成推定には本質的な不定性がある。

また、地球はただの岩の塊ではなく生きており、地球進化の歴史を考える上では、プレート移動、火山、地震、地磁気といったダイナミクスを駆動する熱源を理解することも欠かせない。地表での熱流は 47 ± 2 TW と見積もられており、その熱源としては原始熱のほか内核成長による潜熱や放射性物質に由来する放射化熱が考えられる。これらのうち放射化熱は、現在の量を測定すれば放射性元素の半減期を用いて過去のあらゆる時点の量を計算でき、地球の熱進化を解明する上で特に重要である。

地球内部の放射化熱量については、地震波観測結果とマントル対流モデルに基づく予測(High-Q モデル)、主に炭素質コンドライト隕石の組成に基づく予測(Middle-Q モデル)、エンスタタイトコンドライト隕石の組成に基づく予測(Low-Q モデル)などが存在するが、それぞれ異なる量を予測している。

ここで鍵となるのが地球ニュートリノ(地球 ν_e)である。地球 ν_e は地球内部でウラン、トリウム、カリウムといった放射性元素の崩壊系列から発生し、その高い透過性によりほとんど反応せずに地表に到達する。地表での地球 ν_e 量を測定すれば、地球内部の放射性物質量を直接決定でき、放射化熱量も計算できる。また、放射性元素毎に異なるエネルギーの地球 ν_e を発生するから、そのスペクトルから元素毎の存在量、つまり地球内部の化学組成を直接検証できる。さらに、地球 ν_e 観測結果で上に示したモデルを検証することで、地球進化の歴史や地球内部のダイナミクスに迫ることができる。

2. KamLAND 検出器

KamLAND は純化した 1 kt の液体シンチレータと 1,879 本の光電子増倍管からなる反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) 検出器で、MeV スケールのニュートリノに対して高い感度を持つ。 $\bar{\nu}_e$ が起こす逆ベータ崩壊反応 ($\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$) を遅延同時計測することにより、背景事象と $\bar{\nu}_e$ 信号を効率的に識別することができる。加えて、 $\bar{\nu}_e$ のもつエネルギーを再構成できる点も特徴である。2005 年には世界で初めて地球 $\bar{\nu}_e$ の観測に成功し、ニュートリノ地球科学を創始した。その後、反ニュートリノ信号の主要な背景事象の一つであった $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 事象を低減するための蒸留純化を経て、現在まで 20 年間以上に渡り観測を続けている。本研究は 2002 年から 2020 年末までのデータセットを用いた地球 $\bar{\nu}_e$ 観測結果をまとめる。

3. 原子炉ニュートリノ背景事象

国内の原子炉から飛来するニュートリノ(原子炉 ν_e)は地球ニュートリノ信号の最も大きな背景事象である。2011 年の東日本大震災により日本国内の原子炉が停止したことは、最大の背景事象である原子炉 ν_e の少ない環境で地球 ν_e を精密観測する機会をもたらした。

国内原子炉の寄与が劇的に減少した結果、海外の原子炉からのニュートリノの寄与が相対的に大きくなる。そこで、IAEA が毎年出版する報告書を基に 2002 年から 2020 年までの全世界の原子炉の月毎の電気出力をまとめ、KamLAND に届く原子炉 ν_e の量を見積もった。その結果、2010 年以前には KamLAND に届く原子炉 ν_e の 1%程度だった中国原子炉の寄与は低原子炉期間には 10.5%に相当することが分かった。また、その他の国からの寄与は、2010 年以前の約 0.5%程度に対し、低原子炉期間では 2.5%に当たると見積もられた。

4. ウラン・トリウムに由来する地球ニュートリノ信号数と地球モデルに対する制限

地球 ν_e 信号数は KamLAND で観測された候補事象の頻度、観測エネルギー、時刻情報を組み合わせた un-binned maximum likelihood 法で求めた。低原子炉期間では地球 ν_e のスペクトル形状が顕に確認でき、地球内部のウランとトリウムの量を独立に測定することが可能となった。本解析から、 ^{238}U 、 ^{232}Th に由来する地球 ν_e 信号数はそれぞれ $116.6^{+41.0}_{-38.5}$ 、 $57.5^{+24.5}_{-24.1}$ 事象と見積もられた。ここから ^{238}U 、 ^{232}Th に由来する地球 ν_e フラックスはそれぞれ $14.7^{+5.2}_{-4.8} \times 10^5$ 、 $23.9^{+10.2}_{-10.0} \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と得られ、放射化熱量に換算すると $Q^{\text{U}} = 3.3^{+3.2}_{-0.8} \text{ TW}$ 、 $Q^{\text{Th}} = 12.1^{+8.3}_{-8.6} \text{ TW}$ が得られる。

この結果を各地球モデルと比較すると、KamLAND データはコンドライト隕石組成解析に基づく Low-Q 及び Middle-Q モデルと一致する一方で、マントル一層対流を駆動するため比較的多くの放射化熱を予測する High-Q モデルは 99.76%の信頼度で排除される。High-Q モデルの棄却から、このモデルが論拠とする地震波観測データの解釈、あるいはマントル対流についての地球物理学的モデルに修正が必要であることが分かる。一方で、KamLAND 観測データが示す放射化熱量は Low-Q/Middle-Q モデルの予言値とよく一致しており、マントル対流がこれらのモデルが想定する複数層構造を持つという示唆が得られた。

5. 結論

KamLAND 検出器は 2002 年から現在まで地球 ν_e 観測を継続している。2011 年以降国内原子炉の多くが停止したことで、地球 ν_e 信号の最大の背景事象である原子炉 ν_e が大幅に減少した。これによりウラン・トリウムに由来する地球 ν_e 信号を分離測定した結果、それぞれに由来するマントル中の放射化熱は $Q^U = 3.3^{+3.2}_{-0.8}$ TW, $Q^{Th} = 12.1^{+8.3}_{-8.6}$ TW と得られ、地球モデルの検証を通してマントル複数層対流への示唆が得られた。一方、現在の観測精度では Low-Q/Middle-Q モデルを分離することはできず、地球内部の化学組成の解明のためには更なる高統計化や地球ニュートリノの方向検出、地底での地球ニュートリノ観測といった実験的発展が必要である。

別 紙

論文審査の結果の要旨

本論文は、カムランド実験での地球内部の放射性崩壊を起源とする地球ニュートリノの観測において、バックグラウンド源となる国内原子炉の多くが停止している期間のデータを蓄積し、地球ニュートリノ観測による地球モデルの弁別を世界で初めて実現したものである。

地球内部のエネルギー・物質輸送には未解明なことが多い。透過性の高い地球ニュートリノは、地球深部情報を直接的にもたらすものの、かつては技術的に不可能と考えられた。カムランド実験はその巨大さと極低放射能で世界初の地球ニュートリノ観測を実現した。さらなる低放射能化に加え、東日本大震災に伴う国内原子炉の停止は、大幅なバックグラウンド低減につながっており、18年超の観測期間のうち低原子炉運転期間は8年に及ぶ。統計精度向上は、スペクトルを使ったウラン・トリウム分離測定にも繋がった。相対的に重要となる国外原子炉の稼働状況評価の精緻化とともに、利用が始まったMOX燃料の影響評価も詳細に行われた。また、解析による詳細な較正とともに、光電子増倍管の性能劣化を電子回路で補償する対策などで、長期間の安定稼働が実現した。その結果、 ^{238}U 、 ^{232}Th 起源の地球ニュートリノは、それぞれ $14.7^{+5.2}_{-4.8} \times 10^5$ 、 $23.9^{+10.2}_{-10.0} \times 10^5$ / cm^2/sec と測定された。一方、地球科学の重要課題であるマントル対流様式や地球始原隕石については、マントルの粘性を推定しマントル大循環を帰結する地球物理学モデル (High-Q)、マントルの多層循環を想定する地球化学モデルで、元素比に立脚し炭素質コンドライトを始原隕石とするモデル (Middle-Q)、同位体比に立脚しエンスタタイトコンドライトを始原隕石とするモデル (Low-Q) に分類される。これらの地球モデルは、異なる放射性熱量そして地球ニュートリノ量を予言する。観測結果からは、High-Qモデルが信頼度99.76%で排除される。世界初の地球モデル弁別の実現であり、マントル対流様式に対して新たな知見をもたらした。今後は始原隕石特定への発展が期待される。

本論文は、低原子炉運転期間を含む長期間の地球ニュートリノ観測によって、初めて地球モデルの弁別に成功し、地球内部の新たな知見をもたらしたものである。これらの成果は、自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することを示しており、したがって、川田七海提出の博士論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。