

## 令和 5 年度 (2023) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：太陽ニュートリノエネルギースペクトルの研究 英文：Study of solar neutrino energy spectrum
研究代表者	中島 康博 (東京大学大学院理学系研究科・准教授)
参加研究者	東京大学大学院理学系研究科：渡辺英一朗 東京大学宇宙線研究所：中畑雅行、関谷洋之、池田一得、家城佳、矢野孝臣、中野祐樹、兼村侑希、鈴木洋一郎 神戸大学理学研究科：竹内康雄 岡山大学大学院自然科学研究科：小汐由介、原田将之、酒井聖矢、多田智昭 東京理科大学大学院創域理工学研究科：石塚正基、伊藤博士、篠木正隆 宮城教育大学教育学部：福田善之 Univ. of California, Irvine, Dept. of Physics and Astronomy: H. W. Sobel, M. B. Smy, J. Griskevich 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構：Mark Vagins
研究成果概要	<p>本研究は、スーパーカミオカンデ (SK) において、太陽ニュートリノを精密に測定することを目的としている。とりわけ、電子ニュートリノのスペクトラムを精密に測定することで、5MeV 程度以上の物質効果 (MSW 効果) が支配的な状態から、それ以下のエネルギーでの真空中のニュートリノ振動確率への遷移 (up-turn) を精密に測定することで、ニュートリノ振動モデルの精密検証を目指している。この目的のためには、安定したさらなるデータ取得と、エネルギースケールの系統誤差の削減が不可欠である。</p> <p>SK は、中性子の検出効率の飛躍的な向上を実現するため、2020 年に重量濃度 0.01% に相当するガドリニウムをその水中に溶解し、SK-Gd として新たな観測を開始した[1]。さらに 2022 年には 2020 年度の導入量の約 2 倍のガドリニウムを追加導入し、重量濃度 0.03%での観測をスタートさせた[2]。</p> <p>2023 年度の主要な成果の一つは、SK-IV 期間(2008-2018)に取得した 2970 日分のデータを含む、純水期の SK 用いた太陽ニュートリノ観測の最終結果を投稿論文として発表し、Phys. Rev. D 誌に掲載されたことである。他の太陽ニュートリノ測定実験の結果を組み合わせ、ニュートリノ振動パラメーターを推定した結果、<math>\sin^2 \theta_{12} = 0.306 \pm 0.013</math>、<math>\Delta m_{21}^2 = (6.10^{+0.95}_{-0.81}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2</math>とそれぞれ求められた。KamLAND 実験による原子炉ニュートリノ測定の結果との比較においては、<math>\theta_{12}</math>についてはコンシステントな結果が得られている一方で、<math>\Delta m_{21}^2</math>については約 <math>1.5 \sigma</math> の有意度の差異が観測された (図 1 左)。さらに、太陽ニュートリノの生存確率のエネルギー依存性を評価した結果、<math>1.2 \sigma</math> の有意度で</p>

5 MeV 付近の生存確率の遷移(up-turn)が確認された (図 1 右)。

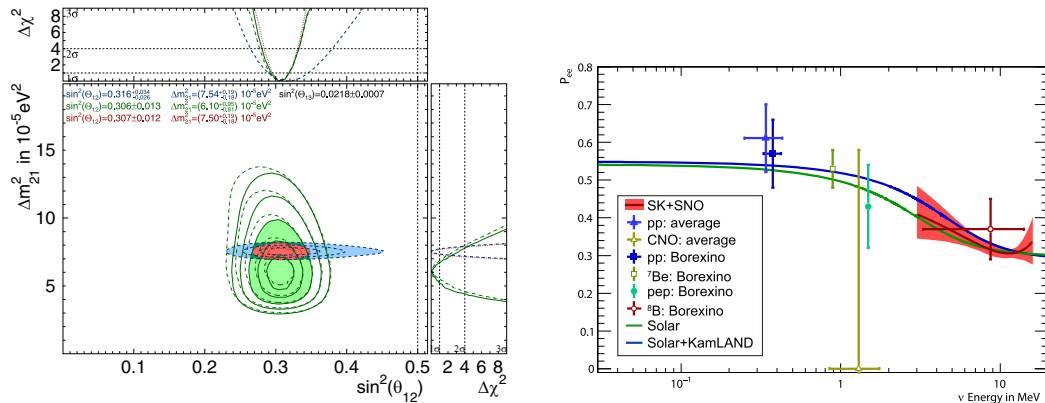


図 1: (左)太陽ニュートリノ振動パラメーターの測定結果。緑は太陽ニュートリノ観測結果、青は原子炉ニュートリノの測定結果、赤はその組み合わせによる制限を示す。(右) 太陽ニュートリノの生存確率 (振動無しの場合のフラックスで規格化したスペクトル) の評価結果。赤い領域が、SK と SNO 実験による測定結果を示す。いずれも文献[3]より引用。

SK-Gd 開始後においても、我々は引き続き太陽ニュートリノ観測を継続している。特に2023年度には0.03%Gd濃度の状態で初めて、電子線形加速器およびDeuteron-Triton中性子用源を用いたエネルギーの精密較正を行った。また、レーザー光源を用いた水の透過長の精密測定から、実機での0.03%ガドリニウム水溶液中の光の吸収および散乱パラメーターを決定した。これらの結果より、0.03%ガドリニウム濃度のSKにおけるエネルギースケールを決定した。今後、この較正結果を用い、より高統計の太陽ニュートリノスペクトルの測定を行う。

さらに、再構成精度および背景事象除去性能の向上を目指し、機械学習を用いたPMTのノイズヒット除去の研究を行っている。この手法をまずは純水期のSKのデータに適用することにより、さらなる測定精度向上を目指す。

最近の発表論文

- [1] “First gadolinium loading to Super-Kamiokande”, [Super-Kamiokande], Nucl. Instrum. Meth. A 1027 (2022) 166248.
- [2] “Second gadolinium loading to Super-Kamiokande”, [Super-Kamiokande], arXiv:2403.07796 [physics.ins-det].
- [3] “Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV”, [Super-Kamiokande], Phys. Rev. D **109**, no.9, 092001 (2024).
- [4] “Search for Periodic Time Variations of the Solar  $^8\text{B}$  Neutrino Flux Between 1996 and 2018 in Super-Kamiokande”, [Super-Kamiokande], arXiv:2311.01159 [hep-ex].