

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：太陽ニュートリノにおける昼夜効果の精密観測 英文：Precise measurement of Day/Night effect for B8 solar neutrinos
研究代表者	宮城教育大学・教授・福田 善之
参加研究者	東京大学 宇宙線研究所・教授・中畑 雅行
研究成果概要	2015年に梶田先生とともにノーベル物理学賞を受賞したA. McDonald教授が率いたSNO実験による太陽ニュートリノ振動の確立は、2001年のスーパーカミオカンデによる結果も大きな寄与を与えていた。その太陽ニュートリノ振動のグローバル解がLMA領域にあることは、その後にカムランド実験による原子炉ニュートリノ観測結果や最新の観測結果から同様にLMA解を支持していることから、ほぼ確定したと思われる。しかし、混合角の値には実験的な誤差があり、真の解を具体的に特定することが急務となってきた。本研究は、太陽ニュートリノを精密に観測し続けているスーパーカミオカンデのデータを解析し、昼夜効果の精密な観測を行うことによりLMA解に対して独立に制限を与えてニュートリノ振動解を特定するとともに、太陽ニュートリノ振動の確実な証拠を得ることを目的としている。 2018年5月にSK-IVは終了し、5万トン水槽タンクを開け、SK-Gdを開始するための準備として故障した光電子増倍管の交換とタンクの補修工事を行い、2018年12月にSK-Gd用の純水装置に交換し純水の供給を始めた。純水によるSK-Vの約1年のデータ取得の後にGdの溶解を開始し、2020年8月から0.011wt%の濃度でSK-VIを開始した。更に、2022年6月には0.033wt%まで溶解させてSK-VIIを開始した。これまでにSK-IVまでの全期間のデータを用いてB8太陽ニュートリノ観測の解析結果から昼夜の太陽ニュートリノの流量差や季節変化による昼夜効果の評価を行い、昨年度にはGdを溶解したSK-VI以降の解析を開始している。2025年度の研究計画では、SK-VI以降のデータを用いて、Gdを溶解させたことによるスーパーカミオカンデ検出器の観測事象のエネルギー再構成と角度依存性の影響や、また、バックグラウンド事象の発生場所依存性や方向の特性を理解する。ニュートリノ振動のLMA解における昼夜効果は、ニュートリノフラックスを数%レベルの精密さで観測量の違いを要求するため、スーパーカミオカンデ検出器のエネルギー決定精度や系統誤差の評価は極めて重要である。特に、Gd溶解後に観測されている低エネルギー事象の増加について慎重に議論する必要がある。そこで、定期的に行われるLINAC（電子発生装置）によるスーパーカミオカンデ検出器のエネルギー較正や、DT中性子発生器により発生するN16の崩壊電子による場所依存性や方向依存性などの較正を継続的に行い、これらの系統誤差の精密な評価を行う計画である。

SK-Gdの開始にともない、スーパーカミオカンデ検出器の太陽ニュートリノ観測における有効領域、バックグラウンド、および系統誤差を再評価する必要がある。SK-IVではバックグラウンドを低減させるため、純水の注入温度をコントロールすることにより、底面に存在しているバックグラウンドを外部に押し下げ、エネルギー閾値を3.5MeVまで引き下げることにより成功し、事象トリガー効率は99.18%を得ている。これまで3.5MeV-4.5MeVまでの有効体積は検出器の上部8.9ktonに限られていたが、今回のSK-Gd用の改修した純粋供給方法の改善により、 $z=-12\text{m}$ までの底部を含む領域まで有効となっている。しかし、Gd溶解後に観測されている低エネルギー事象数の増加と、それらがタンク下部に集中して観測されていることから、それらの昼夜観測に対する影響が懸念される。そこで、選別した有効体積における事象のエネルギーやバーテックス、上下対称性などの方向による系統誤差を再評価し、太陽ニュートリノフラックスの昼夜の非対称性のエネルギー依存性を観測する計画である。また、SK-IV以降のバックグラウンドによる系統誤差の評価方法や、太陽ニュートリノフラックスの昼夜効果とニュートリノ振動のパラメータを用いたフィッティングの手法を用い、SK-Gdにおける昼夜効果によるニュートリノ振動解を4シグマの統計的優位度での観測が重要である。

そこで、2024年度はGdを溶解した後のSK-6やSK-7を含む全期間の太陽ニュートリノ観測の解析を開始したが（図1）、2025年度はSK-1からSK-5までの約 6,181日の全データについて、昼夜ニュートリノフラックスの非対称性を求めた。その結果、 $AND=-0.0268 \pm 0.0085(\text{stat.}) \pm 0.0032(\text{syst.})$ が得られた。この系統誤差を維持しながら、SKが今後5年間観測を継続したときの、昼夜ニュートリノ対称性の統計的有意性を評価した。図2は、SK1からSK-5の昼夜対称性の結果を想定し、統計的な優位性を示している。赤線は、90%のライブタイム、黒線は70%のライブタイムで観測を推移させた時の有位性を示している。この結果、4シグマの有位性を得るためには、SKを可能な限り効率的なライブタイムが必須といえる。一方、点線は有効領域を拡大したときの推移図である。このことから、有効領域の拡大は4シグマの獲得には重要であることがわかる。今後、検出器のライブタイムを得るとともに、有効領域の拡大を評価する計画である。

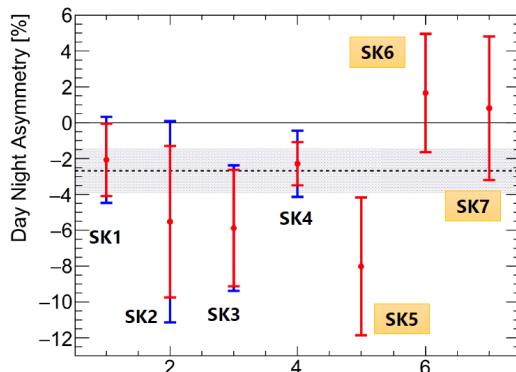


図 2 SK1~7 までの昼夜フラックス対称性

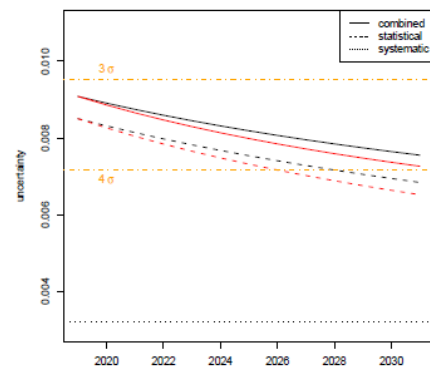


図 1 昼夜フラックス対称性の統計的推移