令和６年度（2024）共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名　和文：スーパーカミオカンデを用いた宇宙素粒子研究

英文：Astroparticle physics using the Super-Kamiokande detector

研究代表者　　東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設・教授・中畑雅行

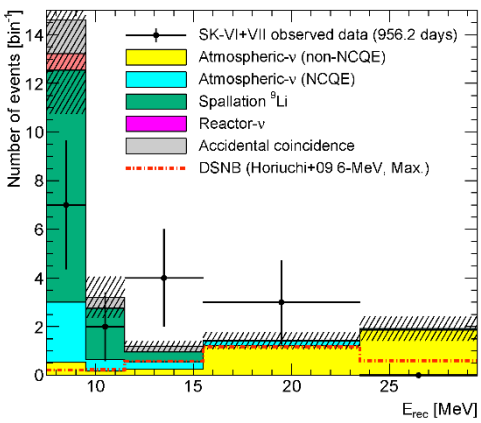
参加研究者　　以下の大学・研究機関から総勢 254 名（2025 年 1 月）

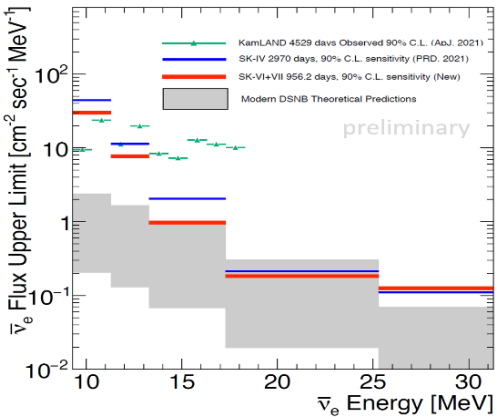
KEK、神戸大学、京都大学、岡山大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、東海大学、宮城教育大学、岐阜大学、横浜国立大学、東京理科大学、静岡福祉大学、慶應大学、日本大学、大阪電気通信大学、ボストン大学、カリフォルニア州立大学、デューク大学、ストーニーブルック大学、カリフォルニア大学アーバイン校/デービス校、ハワイ大学、ミネソタ大学、ソウル大学校、全南大学校、光州科学技術院、成均館大学、National Center for Nuclear Research、ワルシャワ大学、シレジア大、BC 工科大学、トライアンフ研究所、トロント大学、ウィニペグ大学、ブリティッシュコロンビア大学、清華大学、マドリード自治大学、インペリアル・カレッジ・ロンドン、キングスカレッジロンドン大学、リバプール大学、オックスフォード大学、シェフィールド大学、ラザフォード・アップルトン・ラボラトリー、ウォーリック大学、グラスゴー大学、INFN パドバ大学、INFN ナポリ大学、INFN ローマ支部、INFN バリ支部、エコールポリテクニーク、ベトナム IFIRSE

研究成果概要

本研究では、スーパーカミオカンデ（以下、SK）が観測する大気・太陽ニュートリノデータを用いて精密なニュートリノ振動研究をおこなうとともに、超新星ニュートリノの観測等を通して天体物理学の研究もおこなっている。また、陽子崩壊事象の探索をおこない、未知なる大統一理論の解明を目指す研究もおこなっている。

2024 年度には Gd を導入した 2020 年以降に取得されたデータを用いて超新星背景ニュートリノ(DSNB)の探索が行われた。0.01%Gd 濃度で取得された 552 日分のデータ(SK-VI とよぶ)、その後 0.03%Gd 濃度で取得されたデータ（SK-VII とよぶ）の初期の 404 日分のデータを統合して解析した。2023 年度には SK-VI の 552 日分のデータのみを使用して解析結果を論文にしたが、それは従来の手法で早々に解析した結果だった。2024 年度はそのデータに対して、新たに機械学習の手法とともに大気ニュートリノに





よる BG の削減の手法を導入して DSNB 探索を実施した。それにより、機械学習の有効性と低エネルギーBG の削減を確認することがでした。そして、SK-VII の 404 日分のデータに対し上記の手法を適用して DSNB 探索を実施、さらに SK-VI の結果と組み合わせた解析を実施した。その SK-VI と SK-VII を統合したデータを左図に示す。またこれから得られる DSNB のフラックスに対する感度を右図に示す。これらは統計に制限されており、さらなる改善が見込まれるが、すでに 13MeV 以上で理論モデルから予想される領域に到達していることが確認できる。得られたイベントのスペクトルに対し各モデルから期待されるスペクトルを Fit することで、そのモデルの予想するフラックスを検証する解析も行った。その結果、90~95%信頼度で Null(DSNB のフラックスがゼロ)を排除している。今後の観測により DSNB の兆候を検証していく。

大気ニュートリノ観測においては、これまで利用できていなかった検出器外周の事象を解析に取り入れることで統計量を従来よりも 48%増やすことに成功した。さらに事象中の中性子同定を行うことで、正・反ニュートリノ反応の識別能力を向上したほか、新たな手法で複数リング事象のニュートリノ種別分離性能を向上した。以上により、質量階層性以外のニュートリノ振動パラメータの不定性を考慮すると、92.3 %の信頼度で標準階層性を示唆する結果が得られ、それを論文にした。また、大気ニュートリノ事象にともなう発生中性子数を Gd 導入後のデータを用いて測定し、原子核物理に新たな知見をもたらした。

最近の主要発表論文

(1) “Atmospheric neutrino oscillation analysis with neutron tagging and an expanded fiducial volume in Super-Kamiokande I-V“, T. Wester et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Phys. Rev. D109, 072014(2024).

(2) “Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV“, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Phys. Rev. D109, 092001(2024).

(3) “Second gadolinium loading to Super-Kamiokande“, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Nucl. Instrum, Methods, Phys. Res. A1065(2024)169480.

(4) “Search for Periodic Time Variations of the Solar ^{8}B Neutrino Flux between 1996 and 2018 in Super-Kamiokande“, K. Abe et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Phys. Rev. Rev. Lett. 132, 241803 (2024).

(5) “Performance of SK-Gd’s Upgraded Real-time Supernova Monitoring System“, Y. Kashiwagi et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Astrophysical Journal 970, 93 (2024).

(6) “New methods and simulations for cosmogenic induced spallation removal in Super-Kamiokande-IV“, S. Locke et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Phys. Rev. D110, 032003 (2024).

(7) “Combined Pre-supernova Alert System with KamLAND and Super-Kamiokande“, K. Abe et al. (The KamLAND Collaboration and The Super-Kamiokande Coll.), Astrophysical Journal 973, 140 (2024).

(8) “Search for proton decay via $p \to e^{+}\eta$ and $p \to \mu^{+}\eta$ with a 0.37 Mton-year exposure of Super-Kamiokande“, H. Kitagawa et al. (The Super-Kamiokande Coll.), Phys. Rev. D 110, 112011(2024).

(9) “First Joint Oscillation Analysis of Super-Kamiokande Atmospheric and T2K Accelerator Neutrino Data“, Super-Kamiokande Collaboration and T2K Collaboration, Phys. Rev. Lett. 134, 011801 (2025).

整理番号 A01