様式８

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における超新星ニュートリノ観測データの解析手法の開発

英文：Development of new analysis techniques for supernova neutrino observation by Super Kamiokande

研究代表者　　原田了

参加研究者　　住吉光介、中里健一郎、諏訪雄大、森正光、小汐由介、原田将之、中西史美、Roger Wendell、赤穂龍一郎

研究成果概要

2024年度の成果は、①超新星ニュートリノを利用した超新星までの距離推定手法の開発、②超新星ニュートリノの最後の1イベントに着目した解析手法の開発、である。

2022-2023年度に開発した、スーパーカミオカンデにおける超新星ニュートリノ信号の解析パイプラインでは、超新星までの距離を既知のものとし、中心中性子星の質量、半径、ニュートリノ放射エネルギーを推定していた。このパイプラインの実用上の課題として、距離の推定は実際には簡単ではないということがあった。一方で近年、中性子星の観測が発達するにつれて、中性子星は半径がほぼ一定であることがわかってきた。そこで2024年度では発想を逆転させ、中性子星の半径を既知のものとし、距離、質量、ニュートリノ放射エネルギーを推定する形の解析パイプライン(距離推定パイプライン)を提案した[1]。この距離推定パイプラインを用いて距離8 kpcにおける模擬観測データを解析したところ、距離の推定値は8.1 kpcとなった。さらに本パイプラインに基づく推定距離の1σ信用区間は8%程度であり、実際の距離が不明であっても、精度良く推定できることがわかる。加えて、本パイプラインは他の観測信号と組み合わせることでより有効に利用できる。すなわち、超新星ニュートリノをスーパーカミオカンデで検出し、そこから超新星までの距離を推定する。この推定距離を事前確率分布として、他の電磁波望遠鏡等を利用したフォローアップ観測により、より精度よく距離を推定する。更新した距離に基づき、2022-2023年度の解析パイプラインによって超新星のパラメータをより精度良く推定する。このような反復的なパイプラインの利用法により、スーパーカミオカンデとその他の観測装置のシナジーを生み出すことができる。本結果はThe Astrophysical Journal誌で出版された [1]。

本研究課題の前身として行っていた研究では、超新星シミュレーション中のニュートリノ信号モデルに基づき、検出される超新星ニュートリノのうち最後の1イベントから時間を遡って解析する(逆時間解析)ことで、超新星に関する豊富な情報を得ることを提案した。しかし、この研究は理想的な状況を仮定したものであり、統計的なゆらぎや検出器応答まで考えた時、そうした情報をどのように、どの程度の精度で得られるかが正確にはわかっていなかった。そこで2024年度では、検出器応答や背景ノイズ等を加味した現実的な超新星ニュートリノ検出データについて、最後の1イベントを推定する方法とその精度、さらにそこから逆時間解析が超新星モデルを峻別する能力について詳細に調査した。その結果、最後の1イベントの推定精度はニュートリノ信号の振る舞いに大きく依存することがわかった。この推定の不確かさなどにより、超新星モデルの峻別能力はどのような信号になるかによって大きく変わった。しかし、最後の1イベントではなく、最後から500番目や1000番目のイベントを基準に逆時間解析を行うことで、ニュートリノ信号の統計誤差を抑え、より精

度良くモデル峻別が可能になることがわかった。現在は本結果をまとめた論文を執筆中であり、近くThe Astrophysical Journal誌に投稿予定である。

[1] Suwa, Y., Harada, A., Mori, M., Nakazato, K., Akaho, R., Harada, M., Koshio, Y., Nakanishi, F., Sumiyoshi, K., Wendell, R. A., “Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. V. Distance Estimation with Neutrinos”, The Astrophysical Journal, **980**, 117 (2025)

整理番号 I03