

2020 (令和二) 年度 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よる超新星ニュートリノの観測テンプレートの開発

英文：Development of the observation templates of supernova neutrinos on Super Kamiokande

研究代表者 原田 了 (東京大学宇宙線研究所)

参加研究者 住吉 光介 (沼津工業高等専門学校)、中里 健一郎 (九州大学)、諏訪 雄大 (京都産業大学)、小汐 由介、原田 将之 (岡山大学)、Roger Wendell、森 正光 (京都大学)

研究成果概要

本研究の目的は、超新星爆発からのニュートリノがスーパー/ハイパーカミオカンデでどのように観測されるかを理論研究者と観測研究者が緊密に連携して検討し、観測テンプレートを構築することである。超新星爆発のメカニズムは未解明ながらニュートリノが重要な役割を果たすと信じられており、銀河系内で起こる超新星からのニュートリノを検出することでメカニズムの情報を得ることができる。一方で、検出された信号を理論的に解釈するためには、超新星の物理量と観測されるニュートリノの性質を関連付けるテンプレートや解析手法が必要である。本研究の目的は、理論研究者の超新星シミュレーションで計算されるニュートリノ放出量に基づき、実験研究者がスーパー/ハイパーカミオカンデで予測される観測テンプレートを開発すること、及び新たな解析手法を両者の議論を通じて開発することである。

具体的な成果は、①ニュートリノ光度曲線の解析解の開発と②超新星爆発からニュートリノ検出までの一貫したシミュレーションフレームワークの開発である。

①将来の超新星ニュートリノをスーパー/ハイパーカミオカンデで検出した場合、最も素早くそれを解析する方法は、ニュートリノ信号の解析解を開発することで原始中性子星の質量などの超新星の物理量にニュートリノ信号がどのように依存するかを調べておくことである。我々はこのために、原始中性子星が等エントロピー静水圧平衡状態にあることを仮定し、表面構造とその組成に由来する吸収係数をパラメータ化し、ニュートリノ輸送に拡散近似を適用することで、ニュートリノ光度・平均エネルギーが原始中性子星の質量・半径にどのように依存するかを見出した。これらは 2019 年度に調べてお

いた数値計算の結果ともよく一致する。さらに、これらを検出器でのイベントレートと陽電子平均エネルギーに換算し、これらの組み合わせから原始中性子星の半径が解のパラメータに依らずに定まることを見出した。解析解を導くにあたり、様々な単純化を施してはいるが、まずデータから超新星の物理量にあたりを付け、その後の詳細な解析を行う際の指針とする、という使い方の上では有用なツールになると期待される。

②超新星爆発が起こる際のニュートリノ信号は、衝撃波復活に伴うものからその後の原始中性子星冷却フェーズによるものまで、数十秒間続く。一方で、先行研究では超新星シミュレーションはバウンス後数秒程度のものしかなく、原始中性子星冷却フェーズまで一貫してつながる長時間のものがない。加えて、ニュートリノ信号から超新星の物理量を導くには、①の解析解を利用しつつも、最終的には詳細な超新星爆発・原始中性子星冷却シミュレーションからスーパー/ハイパーカミオカンデでの検出シミュレーションまでも一貫して行う必要がある。そのため、我々はこれら2つの意味で一貫させたシミュレーションフレームワークを開発した。具体的には、一次元球対称超新星爆発の公開コード **GR1D** を重力崩壊開始から原始中性子星冷却まで連続してシミュレーションできるようコードを改造し、またそこから出力されるニュートリノデータに基づいて検出器でのイベントをモンテカルロ計算によって予言するシミュレーションコードを開発した。このフレームワークを用いて、球対称であっても爆発する軽い親星による超新星を調べたところ、銀河系内で起こる爆発であれば電子型ニュートリノ信号の異方性に基づいて方向を決定できること、ガドリニウム入りスーパーカミオカンデを用いると方向決定精度が上がることを確認し、また電子型反ニュートリノの平均エネルギーがどの程度の精度で再現できるかがわかった。加えて、この軽い親星での爆発エネルギーは通常のもの1/10程度でニュートリノの検出イベントレートも小さいが、平均エネルギーや信号の継続時間等は実際に観測されている超新星と近いこともわかった。このフレームワークも、将来超新星爆発が近傍で起こった際に解析上非常に有用なツールになると期待される。

整理番号 I03