

氏 名 鈴木 重太郎

学位 (専攻分野) 博士 (理学)

学位記番号 総研大甲第 1448 号

学位授与の日付 平成 23 年 9 月 30 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Cosmic History of Core-Collapse Supernovae and
Supernova Relic Neutrinos

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄
教授 家 正則
准教授 中村 文隆
教授 鈴木 英之 (東京理科大学)
教授 中畑 雅行 (東京大学)

論文内容の要旨

超新星爆発は、質量降着型と重力崩壊型に大別される。重力崩壊型超新星爆発からは多量のニュートリノが発生し、爆発の際に解放される重力エネルギーのほとんどはこれらのニュートリノが持ち去る。また、ニュートリノは物質との相互作用が極めて弱いため超新星内部から容易に脱出することができ、光では観測できない恒星内部で起きている物理過程の情報を含んでいる。さらに、宇宙初期から現在までに発生した超新星爆発起源のニュートリノ（残存超新星起源ニュートリノ, Supernova Relic Neutrino, SRN）は、星間物質等による吸収・減衰を受けることなく宇宙空間を飛びまわっていると考えられる。

従って、これらのニュートリノを検出し、エネルギースペクトルや強度などの情報を引き出すことができれば、超新星爆発におけるニュートリノ温度やニュートリノの性質について、さらには宇宙開闢以来の大質量星の形成史を知ることができるであろう。しかしながら、SNR 検出の際には、そのエネルギースペクトルに影響を与える多くの物理的要素があり、それぞれに不定性が指摘されている。

本研究の目的は SRN エネルギースペクトルの理論予測にたまたまこまれている物理的要素を一つひとつ検証して、そこで用いられている観測・実験結果を最新のデータに更新するとともに、理論的な仮定の妥当性を定量的に評価し、現在最も信頼できる精度で SRN 検出率を予測することである。

本研究では、高い赤方偏移を持つ宇宙論的距離における星形成率についての新しい観測データに基づいて、親星の質量に応じて爆発後に中性子星・ブラックホール・ガンマ線バースト、及び、白色矮星を各々残すような全ての超新星に対して、ニュートリノ振動を考慮した上で、次世代ニュートリノ検出装置として計画されている Hyper Kamiokande（メガトン級水チェレンコフ型検出装置）を用いた場合に検出されるエネルギースペクトルを、以下の諸元についての詳細な考察に基づいて予測した。

- ・ 超新星爆発発生頻度の標準的な宇宙論パラメータへの依存性を検討した。
- ・ 星形成率の電波～X・ガンマ線の各波長にわたる観測結果を網羅し、星間物質による吸収の影響が問題となるサブミリ波・赤外線・紫外線を用いた観測結果については、補正を考慮して、星形成率を赤方偏移の関数として導出した。
- ・ 超新星爆発の親星の質量に応じた爆発モデルを導入した。具体的には、Salpeter (1955) の初期質量関数を用いた上で、8~25 太陽質量の親星は爆発後に中性子星を残す (Neutron-Star SN) としたが、8~10 太陽質量の親星の一部が爆発後に白色矮星を残す (O-Ne-Mg SN) 可能性についても検討した。25~125 太陽質量の親星はその大多数が爆発後にブラックホールを残すが (failed SN, fSN)、一部はガンマ線バースト後にブラックホールを残す (Gamma-Ray Burst) という最新の超新星モデルを導入した。
- ・ 銀河化学進化モデルと隕石中のホウ素同位体存在比の照合を根拠に、Neutron-Star SN の μ 型・ τ 型ニュートリノ温度をそれぞれ推定した。

- ・ fSN におけるニュートリノエネルギースペクトルの計算には, Shen et al. (1998) 及び Lattimer & Swesty (1991) の状態方程式に基づく二通りのスペクトルモデルを採用した。
- ・ 超新星爆発発生率における, 実測値と理論的計算値の食い違い (最大で 2 倍) について, fSN の発生率・爆発モデル及び O-Ne-Ma SN の影響という二通りの原因を想定し, 各々の場合について SRN エネルギースペクトルへの影響を考察した。
- ・ Gamma-Ray Burst におけるニュートリノエネルギースペクトルの計算には Harikae (2010) モデルを採用した。
- ・ これらの SRN エネルギースペクトルの考察では, ニュートリノ振動効果を考慮した。

本研究で得られた結論は以下のようなものである。

- 1) 予測される SRN エネルギースペクトルは赤方偏移 $z \sim 1.5$ 程度までの星形成率や超新星爆発の際のニュートリノ温度に大きく依存することが明らかになったため, メガトン級チェレンコフ型検出装置を用いてエネルギースペクトルを検出すればこれらに対して強い制限を加え得る可能性を示した。
- 2) また, 超新星爆発頻度の観測値と理論値の差が fSN や爆発モデルに起因する場合, fSN 発生率や fSN のコアの状態方程式に応じてニュートリノ振動パラメータにより強い制限を加え得る可能性を示した。

博士論文の審査結果の要旨

大質量星が進化の最期に起こす重力崩壊型超新星爆発では、多量の高エネルギーニュートリノが発生する。ニュートリノは物質と弱い相互作用しかしないので、他では得られない恒星内部の物理状態の診断に利用することができる。また、これまでに発生した超新星爆発起源のニュートリノ(残存超新星起源ニュートリノ:Supernova Relic Neutrino, SRN)は、星間物質に吸収されずに宇宙を飛び回っている。これらのSRNをメガトン級の水チェレンコフ型ニュートリノ検出器(ハイパーカミオカンデ, 計画中)で捉えて超新星の宇宙進化史を解明することが、ニュートリノ天文学の一つの大きな目標である。近年、超新星爆発の観測が飛躍的に進んだが、重力崩壊型超新星の発生率が星形成率の観測から予測される発生率の半分程度しかないことが明らかになった。これは「暗くて観測にかからない超新星」の存在を示唆する。本研究は、SRNを観測することにより、この超新星発生率の不整合が示唆する「暗くて観測にかからない超新星」の正体、ニュートリノ光度・温度などを明らかにすることを目的としている。そのために、ハイパーカミオカンデによるSRNの検出率を高い精度で理論的に予測する計算手法を確立し、ニュートリノ振動パラメータと超新星の状態方程式を制限できる可能性と「暗い超新星」の正体に迫る可能性を議論している。

論文は5章からなる。第1章は序章であり、SRNの検出についてのこれまでの研究の概要が述べられている。第2章では、ニュートリノの物理と超新星爆発モデル(重力崩壊によって爆発後に中性子星を残す標準的な超新星、0-Ne-Mg超新星、ブラックホールを残す超新星、 γ 線バースト)が概観されている。第3章では、SRNの検出予測のモデルと計算手法が詳細に示されている。SRNには多くの物理的要素が介在しており、検出率の予測には多くの不定性が存在する。すなわち、星形成率、発生時のニュートリノフレーバー毎のエネルギー分布、超新星コアの状態方程式、ニュートリノ振動効果の不定性である。本研究では、これらの不定性を除去するために、大質量星形成率の最新データを精査し、先行研究では中性子星を残す標準的な重力崩壊型超新星のみしか考慮されていなかったのに対して、0-Ne-Mg超新星、ブラックホールを残す超新星、 γ 線バーストといった様々な超新星のSRNへの寄与を導入し、さらにこれら最新の超新星モデルにもとづいてニュートリノ光度・温度の推定をより精緻に行い、SRN検出率を高精度で理論予測できるモデルを世界で初めて構築したとしている。第4章では、ニュートリノ検出装置ハイパーカミオカンデ(水チェレンコフ型、100万トン、 GdCl_3 0.2%添加)で10年間継続して観測を行うという条件のもとで、標準宇宙論モデルに基づいてSRNのエネルギースペクトルの赤方偏移や星形成率、超新星ニュートリノ温度への依存性、標準的な超新星・0-Ne-Mg超新星・ブラックホールを残す超新星・ γ 線バーストの発生率への依存性を詳細に調べた。その結果、超新星発生率の不整合が示唆する「暗くて観測にかからない超新星」がブラックホールを残す超新星である場合には、SRNのエネルギースペクトルの観測から超新星の状態方程式と未知のニュートリノ振動パラメータ(混合角 θ_{13} と質量階層)に制限をつけることができると結論した。一方、「暗い超新星」が0-Ne-Mg超新星である場合には、星形成率と超新星発生率の違いを検証することも、ニュートリノ振動パラメータや超新星の状態方程式を制限することも困難であることを明らかにした。

現在、最も信頼できる精度で残存超新星起源ニュートリノ(SRN)の検出率を理論的に予測

し、ブラックホールを残す超新星の爆発機構やコアの状態方程式に強く制限を付け、「暗くて観測にかからない超新星」の謎を解明できる可能性を理論的に示したことは高く評価できる。また、モデルの構築、計算、結果の取りまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に研究を行っていることが認められる。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判断した。