

# 論文審査の結果の要旨

氏名 佐々木 宏和

本論文は、重力崩壊型超新星から放出されるニュートリノの集団振動を計算し、それがニュートリノ観測や超新星元素合成へ及ぼす影響を調べたものである。

本論文は6章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。重力崩壊型超新星からのニュートリノの観測は超新星爆発やニュートリノの性質を理解する重要な手段となる。過去には SN1987A からのものが観測されたのみであるが、その後の観測装置の発展などにより次回の銀河系内超新星の発生時には大量の情報が得られることが期待されている。真空中においてニュートリノは3つのフレーバー ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ) 間で周期的にその存在確率を変化させ、それはニュートリノ振動と呼ばれる。ニュートリノ振動は電子との相互作用 (MSW 効果) やニュートリノ同士との相互作用 (集団振動) により影響を受けるが、後者の効果は複雑であり、その全貌は未だ明らかになっていない。先行研究において通常の超新星における集団振動が調べられたことはあるが、計算は網羅的には行われておらず、物質密度の高さなどのために MSW 効果が集団振動の効果を打ち消す例などが示されているのみである。本研究では異なった条件を考えることにより、集団振動の効果が顕著に表れる場合についての結果や、それが将来のニュートリノ観測装置によってどのように見えるのかを初めて示した。

第2章及び3章ではニュートリノ振動の基礎方程式の説明と一般的な解の性質がレビューされている。第2章では、まず本論文で用いる密度行列を用いた表式でニュートリノ振動を記述する基礎方程式を導入し、変数やパラメータの説明を行っている。さらに真空の場合と電子との相互作用がある場合のハミルトニアンを導入し、それぞれの場合について2フレーバーの場合に対する解析解を用いて解の性質に対する説明が行われている。更にニュートリノ同士の相互作用の項を導き、以下の章で仮定されるボルン近似についての説明が行われ、本論文ではニュートリノ同士の相互作用としてコヒーレントな前方散乱のみを考え、相互作用に伴う運動量のやり取りなどは無視をすることを述べている。

第3章では、まず超新星爆発におけるニュートリノの役割がレビューされている。次に単純な超新星モデルを用い、ニュートリノ同士の衝突角度の依存性を無視したシングルアングル近似のもとでのニュートリノ集団振動の解の振る舞いがレビューされている。

第4章及び5章に本論文の主な結果が書かれている。第4章では、ニュートリノ同士の衝突角度の依存性も考慮したマルチアングルの集団振動の計算が電子捕獲型超新星に対してなされている。電子捕獲型超新星を考える利点は、通常の重力崩壊型超新星と比べ外層の質量が小さいため集団振動の効果が見られやすいと期待されること、また爆発の理論計算における不定性が比較的小さいと考えられることがある。実際に集団振動の効果により、超新星爆発直後に放出されるニュートリノのスペクトルに変化があることが示され、それが将来のニュートリノ観測装置によってどのように見えるかを示した。その結果、集団振動の効果は観測されるニュートリノの高エネルギー成分と低エネルギー成分の個数比であ

る硬度比において顕著に表れ、銀河系内の超新星に対しては十分観測可能であることを示した。さらに、電子ニュートリノと反電子ニュートリノの観測を組み合わせれば、3フレーバーのニュートリノの質量の順番を見分けることも可能であることを示した。電子捕獲型超新星に対してニュートリノ集団振動の衝突角度依存性を考慮したマルチアングルの計算を行い、観測可能性について述べている研究はこれまでになく、学術的価値は高いと認められる。

第5章では  $40M_{\odot}$  の質量の星の超新星爆発を考え、爆発後に中心の中性子星から吹くニュートリノ駆動風の中での元素合成の計算を行った。この駆動風は陽子過剰になっている時期があると考えられており、その時期に強い反電子ニュートリノの照射が行われると陽子が中性子へと変換され、その中性子を捕獲することにより重元素の合成が進む。この過程は  $\nu p$  プロセスと呼ばれる。集団振動が起きると反電子ニュートリノよりも一般に高エネルギーである反  $\mu$ 、 $\tau$  ニュートリノが反電子ニュートリノへと変換されるため、 $\nu p$  プロセスの反応率の上昇が見込まれる。本章で比較的重い  $40M_{\odot}$  の爆発を考えているのは反  $\mu$ 、 $\tau$  ニュートリノと反電子ニュートリノのエネルギー差が比較的大きいためであるが、現在の理論計算では  $40M_{\odot}$  の星をうまく爆発させることはできていない。そこで本論文では爆発時の質量降着を人工的に弱めるという手法を用い爆発モデルを構築している。結果として、このような条件の下では Mo や Ru など超新星での従来の元素合成計算では少量しか作られなかった元素が集団振動の効果により顕著に作られる事をマルチアングルの計算で初めて示した。

第6章は論文のまとめと結論である。

本論文では超新星爆発時における集団振動の効果をマルチアングルで計算し、その観測可能性や元素合成への影響を調べた。得られた結果は新しいものであり、将来のニュートリノ観測から集団振動の効果を見出す有意義な指針を与えた点、新たな元素合成過程への示唆を与えた点は高く評価できる。

なお、本研究は梶野敏貴・滝脇知也・早川岳人・Baha Balantekin・Pehlivan Yamac・川越至桜・堀内俊作・石徹白晃治との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。