

論文審査の結果の要旨

氏名 黒田 仰生

本論文は6章と Appendix からなる。第1章は導入部である。この章では、まず恒星のうち特に太陽質量の約10倍以上の質量を持つ大質量星の構造進化と、進化の最終段階で迎える重力崩壊について概観し、多くの観測から重力崩壊型超新星は非球対称的な爆発を引き起こしているとの示唆があることを指摘している。非球対称爆発の原因として磁気回転効果が重要であることに注目し、本論文で、ニュートン近似および一般相対論を取り入れた二つの3次元磁気流体コードを独自に開発し、超新星爆発の数値シミュレーションを実行することによって、非球対称な爆発機構を解明するという目的が述べられている。さらに、第二の目的として、非球対称な重力崩壊型超新星に特徴的な重力波波形を理論的に予測し、次世代の重力波検出器による観測可能性を明らかにするという狙いも述べられている。

第2章と第3章では、それぞれ3次元磁気流体コードの開発および数値計算テストについて詳しく論じている。超新星爆発の磁気流体計算では、重力崩壊後に中心部に形成される中性子星の半径約10km から鉄コアの外側約5000km を越す広いダイナミックレンジに対して、高い計算精度が必要とされる。本論文で論文提出者が開発した磁気流体コードでは Adaptive-Mesh-Refinement method を採用することで、十分な精度が確保できることを示した。また、一般相対論のメトリックの時間発展は、現在最も安定した方法として定評のある Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura method を用いた。衝撃波管問題、線形 Teukolsky 波問題、回転中性子星周囲の動的メトリック問題等の数値計算テストを行い、さらにエネルギー運動量保存、磁場の非発散、Bondi 質量降着、等の物理法則が正しく成り立っていることを数値計算で確認することで、構築した二つの3次元磁気流体コードが信頼性のある数値計算を可能にしていることを示している。

第4章では、開発した3次元磁気流体コードを15倍太陽質量の超新星に適用した数値計算に基づいて、磁場と回転を伴う重力崩壊型超新星の非球対称爆発機構について論じている。まず、強磁場を想定したモデルでは回転軸方向に高速度のアウトフローが形成されること、さらに回転エネルギーが重力エネルギーに対して1〜3%であるような比較的ゆっくりとした現実的な回転に対しては、差動回転領域の内側で発生する回転不安定性がダ

イポールのな密度ゆらぎのモードを増幅し、一本腕のスパイラル構造が出現することを確認した。また、一般相対論的な効果は約30%の中心密度の上昇を引き起こし、よりコンパクトな中心付近の構造を作り出すとともにスパイラル構造の形成を助長することを見いだした。これらの結果は既に先行研究で示唆されていたことであるが、本研究において精度の高い一般相対論3次元磁気流体コードで明確に示したことは高く評価できる。

第5章では、本研究の中心課題である非球対称な重力崩壊型超新星から放出される重力波の特徴を詳しく論じている。まず、初期回転角速度を固定した強磁場および弱磁場の両方のモデルによる一般相対論計算から、コアバウンス時に放出される重力波の波形は先行研究の結果と矛盾しないことを確かめた。次に、ニュートン近似と一般相対論の計算結果を比較し、コアバウンス後30ミリ秒までにニュートン近似計算に現れたアウトフロー形成が一般相対論計算では見られない原因を追究した。従来の解釈では原因はニュートリノ冷却の差にあるとしていたが、本研究では、一般相対論的な効果としてより強い重力の影響で中心天体がより圧縮されることによって非軸対称のスパイラル波が出現しやすくなり、その結果アウトフローの形成が妨げられるとの解釈を提案している。結果として、重力波の波形には磁場の強弱によらず定性的な相違が見られないことを見いだした。さらに、コアバウンス後約15ミリ秒からスパイラル SASI と呼ばれる不安定性 (spiral standing accretion shock instability) が生じてショック面近傍の物質密度が激しく変化し、この空間スケールに対応する低振動数帯100–300ヘルツに特徴的な重力波波形のスペクトルが出現することを発見した。従来の研究では、数ミリ秒の周期で高速回転する原始中性子星から放出される重力波が約1000ヘルツ帯に強く現れるとの予想が報告されているが、スパイラル SASI に起因して低振動数帯の重力波放出が起こる可能性を示したのは、本研究が初めてである。次世代の重力波検出器による観測が期待される。

以上、本論文では、第6章に纏められているように、論文提出者が独自に構築した3次元磁気流体コードを用いて重力崩壊型超新星の非球対称な爆発機構を研究し、放出される重力波スペクトルを理論的に予測して将来の天文観測に資する新しい提言を行った。これらの独創的な研究成果は高く評価できる。

なお、本論文の第2章から第4章までの内容の一部は梅田秀之との共同研究であるが、新たに行った第6章の研究とあわせて論文提出者が主体となって行ったもので、研究成果は論文提出者を筆頭著者とする論文としてまとめて発表する予定であり、論文提出者の寄与は十分であると判断できる。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。