

重力崩壊型超新星の物理——研究の現状と今後の課題



長倉 洋樹

国立天文台
hiroki.nagakura@nao.ac.jp



山田 章一

早稲田大学
shoichi@waseda.jp

重力崩壊型超新星爆発は、宇宙で起こる**大質量星**の爆発現象である。爆発を駆動している星の中心付近では、高密度（核密度）かつ高温（10 MeV 以上）環境が実現され、強い力・弱い力・電磁気力・重力という自然界で働く4つの基本的な力全てが爆発機構に関わっており、理論物理学の観点からも興味深い。爆発によって重元素の生成と宇宙空間への放出が起こるため、宇宙の化学組成を決める重要な天体現象である。また、爆発後には**中性子星**やブラックホールなどの高密度天体を残すことから、宇宙で起こる様々な他の高エネルギー天体現象とも密接に関連する。このように、重力崩壊型超新星爆発の研究は非常に学際的な分野であり、素・核・宇宙・天文学などの幅広い分野の研究者らによって、実験・観測・理論・シミュレーションなどの様々なアプローチにより研究が行われている。

超新星爆発を駆動している中心エンジンは、複数の物理過程が非線形に絡まった系である。その爆発機構は複雑で、理論宇宙物理学の難題の一つとして位置づけられてきた。しかし、ここ10年ほどの間に、超新星爆発の理論は著しく進展した。特に、理論計算（数値シミュレーション）においては、それまで爆発の再現に失敗していたのに対し、近年ではこれに成功するモデルが多く報告されている。こうした進展の一つの理由は、計算機能力の向上と数値計算手法の発展のおかげで、より正確に詳細な物理過程を取り込んだ多次元**ニュートリノ輻射流体計算**が実行可能になったことである。例えば、第一原理計算に最も近いとされる、ボルツマン方程式を直接解く多次元輻射流体計算が「富岳」などのスパコンで

少数のモデルに対して実行されている一方、近似的なニュートリノ輸送法を用いた多次元計算がより多くのモデルに対して系統的に行われている。また、ニュートリノと物質との弱い相互作用の扱いについても精密化が進み、例えば核子の weak current における形状因子やストレンジネスの寄与、さらには多体効果なども、シミュレーションでは既に取り込まれている。

シミュレーションが、長時間かつ様々なタイプの大質量星に対して系統的に行えるようになり、観測量の定量的な推定が行えるようになってきたことも、近年の重要な進歩である。実際、過去の超新星理論モデルとは違い、最終的な爆発エネルギーの値や形成される中性子星の質量や半径などが定量的に議論できるようになってきた。電磁波・重力波・ニュートリノに関する理論モデルの精度も格段に上がり、**マルチメッセンジャー天文学**の発展にも貢献している。

このように超新星爆発の研究は、近年著しく発展したが、それでも超新星爆発機構が完全に解明されたわけではない。実際、現在考慮されているニュートリノ反応の取り扱いには不定性が大きく、それが爆発可否に影響する可能性がある。また、**ニュートリノ集団振動**に代表される量子運動論的な効果は、現在の最も進んだ超新星爆発計算にも取り込まれておらず、現在の超新星爆発の理論を一変させてしまうかもしれない。ニュートリノ反応計算の精度を上げ、量子運動論的ニュートリノ輻射輸送計算に基づいた超新星モデルの再構築が、今後10年の超新星爆発の理論的研究の主要なターゲットになるだろう。

用語解説

大質量星：

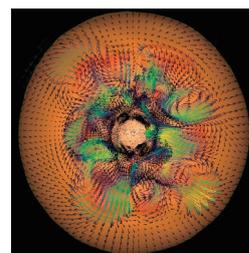
恒星は核融合反応によって光り輝いている星。大質量星は太陽のおよそ10倍以上の質量を持つ恒星を指す。

中性子星：

主に中性子から構成されている半径10 kmほどの星。質量は太陽よりも重く、現在のところ、その2倍程度の質量を持つものの存在が明らかになっている。

ニュートリノ輻射流体シミュレーション：

ニュートリノと物質の相互作用を考慮し、物質の流体力学的運動と、ニュートリノ輸送を同時に解く数値計算。以下に、空間3次元超新星爆発シミュレーション結果の例を載せる（岩上わか・長倉洋樹によって作成）。



マルチメッセンジャー天文学：

ある天体から発せられる様々なシグナル（電磁波、ニュートリノ・重力波・宇宙線など）を同時期に観測し、これら複数の観測量を協調させて、天体現象の起源を探ること。

ニュートリノ集団振動：

ニュートリノの自己相互作用によって駆動されるニュートリノ振動（フレーバー混合）現象。