

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム



滝脇 知也

国立天文台天文シミュレーションプロジェクト



固武 慶

福岡大学大学院理学研究科

重力崩壊型超新星は、大質量を持つ星がその進化の最終段階に迎える断末魔で、宇宙で最も激しい爆発現象のひとつである。超新星は今後建設が計画されている超大型光学望遠鏡のターゲットとなっているばかりでなく、小柴名誉教授らがノーベル賞と共に切り拓いたニュートリノ天文学や、今後ノーベル賞が期待される重力波天文学の重要な候補天体になっている。また爆発後に残される中性子星、ブラックホールといったコンパクト天体の形成過程そのものであり、爆発時に合成される元素組成は銀河の化学進化を決め、膨張する衝撃波は宇宙線加速の現場にもなっている。このような多面性から、超新星は一天体現象でありながら、天文学や高エネルギー宇宙物理分野において最も注目される天体現象の一つである。

このような重要性にもかかわらず、爆発がどのような物理機構で引き起こされるのかについて、極めて長きにわたる研究の歴史を持ちつつも、いまだ完全には明らかにされていない。爆発メカニズムの解明には、超新星の中心核（コア）で起こっている微視的な物理素過程を理解することがまず第一に重要である。さらにその上で、星が爆発していく巨視的なプラズマ・電磁流体现象としての動的な振舞いも同時に明らかにする必要がある。このように自然界の4つの力をすべて含むマルチフィジックス・マルチスケールの現象が非線形に進化していく系の時間発展を追うためには、数値シミュレーションの実行が欠かせない。

最も有力視されているシナリオは、コア内で一度は止まってしまった衝撃波をニュートリノで加熱して温め復活させるというものである。超新星コアは、ニュートリノによる物質の加熱・冷却が起きる場所が異なる大局的なシステムであり、この現象をシミュレートするためにはボルツマン輻射輸送方程式を一般相対論的な流体・時空の進化と合わせてセルフコンシステントに解く必要がある。従って非常に高い計算コストが要求され、これを効率的に解くことは数値宇宙物理学のファイナルフロンティアの一つである。

そうした複雑な問題を解くのに適しているのはスーパーコンピュータである。近年の超新星理論の急速な進展は計算機の発展によりもたらされている部分が多い。原子核・素粒子物理の発展に伴うマイクロ物理の精緻化とそれを組み込む流体・輻射輸送の数値コードの改良の末、ようやく空間3次元の超新星シミュレーションが可能になった今、「爆発する超新星モデルが作れない」という長年の問題が解決に向かいつつある。今後の最重要課題は、爆発時に放たれるマルチメッセンジャー（重力波・ニュートリノ・電磁波）のシグナルに関する理論モデルを総合的に解析し、将来の観測と比較できるようにすることである。次世代計算機とマルチメッセンジャー観測という2つのスポットライトに照らされて、長い間ペールに包まれていた壮絶なる星の最期の真の姿がいよいよ我々の前に現れようとしている。

—Keywords—

重力崩壊型超新星：

太陽のおよそ10倍以上の質量を持つ恒星はその進化の最終段階に中心部に鉄のコアを生成する。この鉄コアが重力的に不安定になり崩壊を開始することが引き金となって生じる大爆発現象。爆発後には、中性子星もしくはブラックホールが残される。重力崩壊を如何に爆発に転じさせるか、その爆発のメカニズムは今だ完全には明らかになっていない。

ニュートリノ加熱メカニズム：

コアの中心付近の高温、高密度領域から放射されるニュートリノで、衝撃波背面の物質を加熱し、一度は止まってしまった衝撃波を復活させて爆発を起こすメカニズム。加熱領域においては、重力的な束縛（エネルギー）に打ち勝つ量のニュートリノ加熱（熱エネルギー）を受けた時のみ、このメカニズムで星を爆発させることができる。近年、加熱領域における対流や乱流、星の自転など、熱輸送効率を高める多次元効果が注目されている。

超新星シミュレーション：

ニュートリノ加熱により爆発が起こるかどうかを判定するには、究極的に7変数（時間1、空間3次元、運動量空間3次元）を持つニュートリノの分布関数に対するボルツマン方程式と、一般相対論的な流体・時空の進化をセルフコンシステントに解かなければならない。その計算コストは極めて高く、数値スキームの開発だけでなく、「京」をはじめとするスーパーコンピュータで計算効率を限界まで高めることが、「計算機の中で星を爆発させる」ための必須条件となっている。