

## 核融合燃焼で駆動される超新星爆発 Supernova Explosions Driven by Nuclear Reactions

前田啓一  
Keiichi Maeda

京都大学 宇宙物理学教室  
Department of Astronomy, Kyoto University

### はじめに

本講演では、核融合燃焼反応により駆動される天体爆発現象の代表例であるIa型超新星について、どのような天体がどのような核反応過程により爆発すると考えられているか、様々なシナリオがどのように観測的に検証・制限されているかについて、特に近年の観測的進展を交えながら紹介する。

### 白色矮星とIa型超新星

白色矮星は、電子の縮退圧により自己重力を支えている天体であり、初期質量が比較的小さい（太陽質量の8倍程度までの）恒星の進化を経て形成される。典型的な質量は太陽質量の半分程度であり、その最大質量は1.4太陽質量程度である（チャンドラセカール限界質量）。核反応による過剰なエネルギー生成が圧力増加に直結しないため、膨張により核反応を抑制する安全弁が働かない。つまり、一度核反応が暴走を始めると系が爆発的に進化することになる。特に、質量の大きい（太陽質量～チャンドラセカール限界質量の）炭素・酸素白色矮星で核暴走反応が発生した場合には、核反応により白色矮星の半分程度が鉄族（主に $^{56}\text{Ni}$ ）、残りの大部分はケイ素、硫黄、酸素となる。この結果発生した核反応エネルギーはもともとの白色矮星の重力エネルギーを有意に超過するため、鉄族を大量に含むガス塊が高温の火の玉となって宇宙空間に高速（10,000 km s<sup>-1</sup>程度）で膨張していく。

爆発の際に生成された大量の $^{56}\text{Ni}$ は不安定元素であり、約1週間で電子捕獲反応により $^{56}\text{Co}$ となり、約100日で電子捕獲および陽電子放出により $^{56}\text{Fe}$ に壊変する。この際に放出されるガンマ線は主にコンプトン散乱を経て超新星放出物質内で熱化され、最終的に可視光として宇宙空間へと放出される。その光度は $10^{43}$  erg s<sup>-1</sup>以上（太陽光度の10億倍以上）に達し、これが

Ia型超新星の起源であると考えられている。

Ia型超新星は一様な観測的性質を持つことが、現象論的に知られている。特に、その光度と光度進化のタイムスケールに良い相関があること（光度の大きいものほどゆっくり減光すること）から、天体までの距離によらない観測指標（タイムスケール）からその絶対光度を精度よく推測できる（つまり、距離を推定できる）標準光源として利用されている。2011年ノーベル物理学賞を受賞した宇宙加速膨張の発見は、Ia型超新星を用いたハッブル図（赤方偏移 vs. 光度距離）の研究に基づくものである。

### Ia型超新星の未解決問題

天体现象としてのIa型超新星の理解には、多くの未解決問題が存在する。（1）質量の大きな白色矮星がどのような恒星進化により実現されるかという「親星問題」、（2）核暴走反応がどのように引き起こされ、伝搬するかという「爆発機構問題」。これら二つは必ずしも独立の問題ではなく、密接に関わりあっている。

親星進化としては、(a) 白色矮星と通常の恒星からなる近接連星系において、白色矮星への質量流出により白色矮星の質量が増大するシナリオ（Single Degenerate scenario; SD）、(b) 二つの白色矮星からなる近接連星が重力波放出などにより軌道崩壊し合体するシナリオ（Double Degenerate scenario; DD）が主に議論されている。SD、DDシナリオのそれぞれについて、核暴走反応の引き金や伝搬に関して様々なモデルが議論されている（以下参照）。

### Ia型超新星は「一種類」か？

Ia型超新星は一様な観測的性質を持つため、親星・爆発機構としても「一種類」が存在し、「正しい」モデルを選別することが中心課題の一つとされてきた。しかし近年の急速な観測手法の発展により、これまでとは質的・量的に異

なる観測データがもたらされるにつれ、その視点は大きく変わりつつある。通常のIa型超新星とは明らかに異なる性質を持つ亜種が複数発見されるとともに、通常の超新星の観測的特徴もこれまで考えられてきたような1つのパラメータでは説明できないことが明らかになりつつある。このことから、Ia型超新星には親星や爆発機構の異なる複数の種族が混在していることが、定説となりつつある。

### 標準モデル（遅延爆轟波モデル）

標準モデルにおいては、SD、DD進化シナリオのいずれにしろ、（炭素・酸素）白色矮星の質量がチャンドラセカール限界質量に近くなった状況を出発点とする。収縮に伴い中心密度・温度は上昇し、爆発的炭素燃焼が開始される。中心付近は相対論的縮退圧により支えられているため、爆発的核反応における熱エネルギー解放による圧力上昇は制限される（核反応生成エネルギーがフェルミ・エネルギーに比べ十分小さい）。したがって、強い圧縮を伴う爆轟波の形成は困難であり、爆燃波が形成されると考えられる。爆燃波後方の高温物質は自己重力と反対向きの浮力を受け、この対流により爆燃波は外部に向かって（亜音速で）伝搬していく。

爆燃波が白色矮星外部の低密度領域に伝搬するとともに、白色矮星の非燃焼部分も膨張していく。以上により、爆燃波面の密度は減少していく。縮退圧の寄与が下がり核反応エネルギーが効率よく圧力上昇に使われ始めるとともに、乱流のスケールが波面の厚さよりも小さくなるという状況が達成されると、爆燃波スケールでの構造に乱流が影響を与える。これにより急激に圧力が増加し、爆燃波から爆轟波への遷移（Deflagration-Detonation-Transition; DDT）が起こると期待される。これが、Ia型超新星の標準モデルである遅延爆轟波モデルである。

### その他のモデル

遅延爆轟波モデルにおいてDDTが本当に実現されるか、長年議論されているがまだ解決には至っていない。そこで、そもそもDDTが発生しない場合も検討されている。この場合、爆燃波だけでは白色矮星すべての重力エネルギーを振り切るだけの核反応エネルギーが生成されず、白色矮星の一部は束縛されたまま生き残り、残りが宇宙空間へ放出されるという不完全な爆発となる。このような爆発では、観測天体の多数を占める「通常の」Ia型超新星の観測的

性質を説明できない。一方で、このようなモデルは2000年代以降になり発見されたIa型超新星の亜種である「Iax型超新星」と呼ばれる天体現象の観測的性質を良く説明できる。

また、遅延爆轟波モデルとは異なる枠組みのモデルも提案されている。特に、チャンドラセカール限界質量に到達していない、太陽の1~1.3倍程度の質量の白色矮星の爆轟波モデルが近年精力的に研究されている。このような白色矮星では中心付近の核暴走反応は自発的に起こらないため、何かしらの外的要因による引き金を必要とする。この引き金としては、連星相手から白色矮星へのヘリウム降着にともなう、白色矮星表面でのヘリウム暴走燃焼が検討されており、これは原理的にはSD、DDの両方の親星進化で発生し得る。ヘリウム燃焼により発生した爆轟波により白色矮星内部に向かう衝撃波が駆動され、その衝突により圧力が一気に上昇した場所で炭素の爆発的燃焼が始まる。そこで一気に爆轟波が形成され、白色矮星全体を吹き飛ばすというモデルである。ヘリウム燃焼、炭素燃焼の二段階の爆轟波形成を経るため、**double-detonation model**と呼ばれる。

SDシナリオにおけるヘリウム伴星からの降着を起源とした**double-detonation model**は、80年代にはすでに提唱されていた。しかし、このモデルの予想するヘリウム燃焼の痕跡がIa型超新星の観測データに見られないこともあり、その後の議論は停滞していた。しかし、2017年以降、ヘリウム燃焼層の痕跡のある超新星が数例発見されたことで、近年精力的に議論が進んでいる。ヘリウム白色矮星を伴星とするDDシナリオへの拡張も提案され、ヘリウム燃焼層の痕跡が見られない通常の（多数の）Ia型超新星を説明し得るかが焦点となっている。

### まとめにかえて

Ia型超新星の観測データの急激な増加により、Ia型超新星を駆動する爆発的原子核反応過程も複数のシナリオが議論されている。Ia型超新星の爆発機構の研究においては、背景となる燃焼波の発生や伝搬について現象論的に取り扱われている部分も多数あり（例えばDDTの有無）、天体観測・天体現象シミュレーションに加え、燃焼波の物理のさらなる理解が重要である。

### 謝辞

本講演の内容の一部は、JSPS 科研費 20H00174、20H04737、18H05223 の助成を受けています。