

論文の内容の要旨

論文題目 Theoretical Light Curves of Highly Luminous Type Ia Supernovae
(極めて明るい Ia 型超新星の理論的な光度曲線)

氏 名 神 谷 保 臣

超新星は、恒星が一生の最期に大爆発する天体現象である。観測されたスペクトルや光度曲線がもつ特徴によって、超新星はいくつかの型に分類される。本論文で取り扱う Ia 型超新星は、初期のスペクトルに水素やヘリウムの吸収線はないが、強いケイ素の吸収線がある超新星である、と定義されている。Ia 型超新星は、近接連星系にある、炭素と酸素からなる白色矮星の熱核爆発であり、以下の過程を経て爆発に至ると考えられている。

- (1) 伴星からの物質が白色矮星表面に降り積もり、白色矮星が「太って」ゆく。
- (2) 白色矮星の質量がチャンドラセカール質量（約 1.4 太陽質量）に非常に近くなると、白色矮星の中心部にある炭素に「火がつく」。
- (3) 電子の縮退圧によって支えられている白色矮星は膨張して温度を下げるができないため、核反応が暴走的に進み、結果として星全体が爆発する。

このような爆発機構から、Ia 型超新星はどれも同じような性質を持つことが期待される。たとえば、実際に観測された Ia 型超新星は（同じ距離に置いたと仮定したときに）どれも最大光度がほぼ同じである。遠方の宇宙に出現しても観測できるほど明るいことから、Ia 型超新星を宇宙論における距離指標として使うことができる。現実には Ia 型超新星の最大

光度にばらつきがあり、そのままでは距離指標にするのは難しい。しかし、数多くの Ia 型超新星の観測から、最大光度と光度曲線の幅との間にある関係が発見されている。この関係によって補正されて初めて、Ia 型超新星は距離指標として用いることができる。このようにして Ia 型超新星の観測から宇宙膨張の加速が判明したことは記憶に新しい。

近年、極めて明るい Ia 型超新星がいくつか観測、報告されている (図 1)。これらの特異な Ia 型超新星は、通常の Ia 型超新星よりもかなり明るい。Ia 型超新星は明るく輝くのは、主に、超新星爆発時に合成されたニッケル 56 やその娘核種のコバルト 56 が崩壊し、周囲の物質を加熱するためである。したがって、観測された明るさからニッケル 56 の質量をある程度推定することができる。極めて明るい Ia 型超新星は、その明るさからニッケル 56 が多量に、中には Chandrasekhar 質量よりも多く、合成されたことが推測されている。こうしたニッケル 56 の質量は、Chandrasekhar 質量の白色矮星の核爆発では説明することが難しい。そこで、極めて明るい Ia 型超新星を説明するために、爆発した白色矮星が超 Chandrasekhar 質量であったとする考え方が提唱されている。こうした重い白色矮星は高速回転しており、遠心力のために Chandrasekhar 質量を超えることができると考えられている。ただ、Chandrasekhar 質量よりも重い白色矮星に関する研究 (安定的な成長シナリオや爆発のシミュレーションなど) は多くないが現状である。また、ニッケル 56 の質量や爆発した白色矮星の質量を推定する際には解析的な手法が用いられている。極めて明るい Ia 型超新星のそうした性質を推定し、超 Chandrasekhar 質量の白色矮星やその爆発などを議論するためには、より精緻なアプローチをとる必要がある。

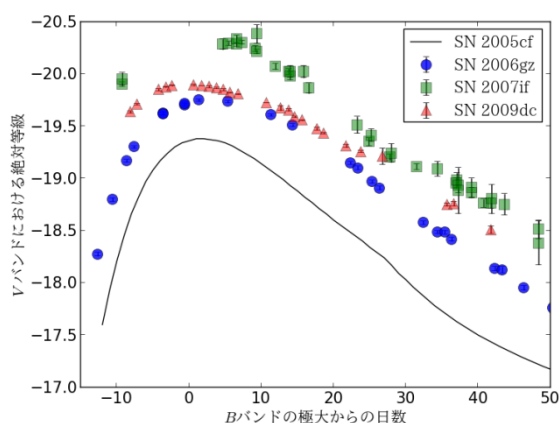


図 1 観測された Ia 型超新星の光度曲線。SN 2005cf は典型的なもので、SN 2006gz と SN 2007if、および SN 2009dc は極めて明るいものである。なお、SN 2007if と SN 2009dc は母銀河による減光を補正していない。

本論文では、観測された極めて明るい Ia 型超新星の 1 つである SN 2009dc に注目し、

- (1) 簡略化された 1 次元の超チャンドラセカール質量の理論モデルを構築し、
- (2) そのモデルの光度曲線を輻射流体計算から求め、
- (3) 得られたモデルと観測された光度曲線などを比較する

ことで、SN 2009dc の先駆天体の性質を推定した。モデルのパラメータは、鉄族元素（安定的な鉄・コバルト・ニッケル）とニッケル 56、中間質量元素（ケイ素・硫黄・カルシウム）、炭素・酸素、および爆発した白色矮星の質量である。典型的な Ia 型超新星の性質を再現するチャンドラセカール質量のモデルの流体力学的な構造を「スケール」することで、爆発後に一様膨張している超チャンドラセカール質量のモデルを考えた。本論文では、観測が示唆するニッケル 56 の質量やケイ素の吸収線速度などを考慮しており、現実的なモデルを構築している（図 2）。また、光度曲線の計算においては、約 16 万本のスペクトル線を考慮に入れて吸収係数を現実的に求める、1 次元の多波長輻射流体計算コードを用い、輻射光度だけでなく各波長帯における光度曲線を得た。なお、超チャンドラセカール質量のモデルの各波長帯の光度曲線は、本研究によって初めて得られたものである。観測との比較では、光度曲線だけではなく、モデルの光球速度と観測されたケイ素の吸収線速度も比較している。

計算で得られた各モデルがもつ光度曲線やその立ち上がり時間、および光球速度と、SN 2009dc の観測を比較した結果、母銀河による減光が無視できるならば、爆発した白色矮

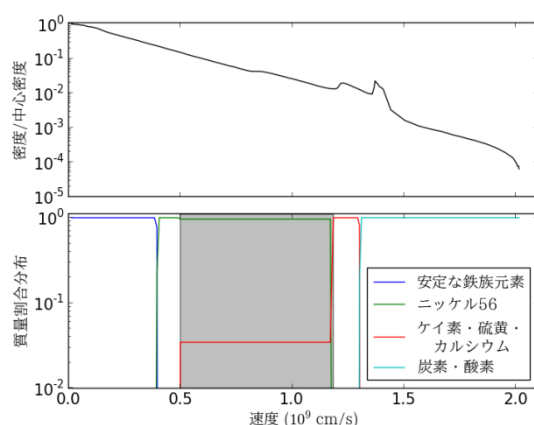


図 2 モデルの密度分布（上）と元素分布（下）の一例。観測されたケイ素の吸収線速度から、影の領域の物質混交を仮定している。モデルの全体とニッケル 56 の質量は、それぞれ 2.0 太陽質量と 1.2 太陽質量、また安定的な鉄族元素と炭素・酸素が、それぞれ全体の 20%と 10%（質量比）である。

星の質量は 2.2~2.4 太陽質量であり、爆発時に合成されたニッケル 56 の質量は 1.2~1.4 太陽質量であるモデルが、観測を良く再現することが分かった (図 3)。一方で、母銀河による減光が大きい場合には、本論文で構築したモデルでは観測をある程度までしか説明できないものの、爆発した白色矮星とニッケル 56 の質量は、それぞれ 2.8 太陽質量と約 1.8 太陽質量であることが示唆された。また、母銀河による減光がどれだけあるにせよ、爆発した白色矮星は元素合成を経ても、全体の質量の 20~30%に相当する「燃え残り」の炭素と酸素を最外層に持つことが分かった。このことは、SN 2009dc の初期スペクトルに遅い速度を持った炭素の吸収線が見られた観測事実と一致しており、放出物質中に炭素が存在することを意味する。本論文で得られた SN 2009dc の先駆天体の性質は現在の Ia 型超新星の理論で説明することは難しい。しかし、最新の連星進化の理論計算を考慮すれば、チャンドラセカール質量を超えるような白色矮星が非縮退の伴星から質量降着を受けて形成され、質量が約 2.4 太陽質量になると回転に対する不安定性が生じ、それが極めて明るい Ia 型超新星爆発の引き金となる、という描像が考えられる。

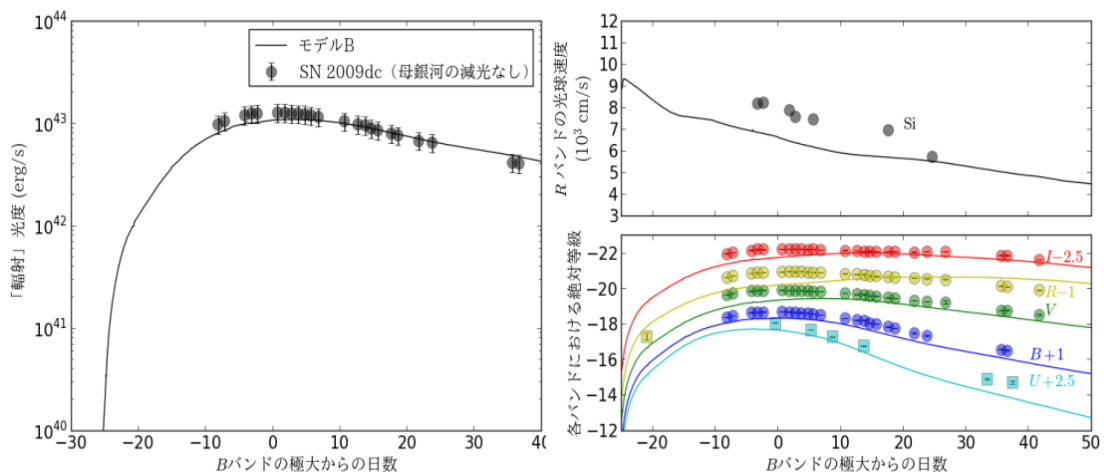


図 3 モデルの「輻射」光度の時間変化 (左) と各波長帯における光度曲線 (右下)、および光球速度と観測されたケイ素の吸収線速度との比較の一例。モデルの全体とニッケル 56 の質量は、それぞれ 2.4 太陽質量と 1.2 太陽質量、また安定な鉄族元素と炭素・酸素が、それぞれ全体の 10%と 30% (質量比) である。ここで「輻射」光度としているのは、それが文字通り輻射光度ではなく、 $B \sim I$ バンドの光度を足し合わせたような光度を考えているためである。