

## 論文内容の要旨

論文題目 Aspherical Supernovae: Nucleosynthesis, Light Curves, and Spectra  
(非球対称な超新星：元素合成, 光度曲線, スペクトル)

氏名 前田 啓一

太陽質量( $M_{\odot}$ )の 25 倍以上の大質量星の爆発機構、特に非常にエネルギーの大きな極超新星の爆発機構においては、中心天体からの非球対称なエネルギー解放が重要であると考えられる。これら大質量星の爆発機構を解明するためには、観測と比較できる理論モデルが必要である。

本研究では中心天体のエネルギー解放が非球対称な場合の(1)爆発の流体力学的特徴及び元素合成における特徴、(2)それに基づく光度曲線及び後期スペクトルの特徴を調べた。

(1)爆発の流体力学と元素合成の研究においては、 $25M_{\odot}$ と  $40M_{\odot}$ の星について二次元の流体力学と元素合成の計算を行ない、非球対称の程度、爆発エネルギー等への依存性を詳細に調べた。(2)光度曲線、スペクトルの研究においては、(1)で得られた超新星のモデルに対してモンテカルロ法による二次元の輻射輸送計算を行い、爆発の特徴がこれら観測的特徴にどのように現れるかを調べた。

これらの結果を(1)銀河初期に形成されたと考えられる超金属欠乏星の元素パターン、及び(2)極超新星 1998bw、2002ap の観測と比較し、大質量星の爆発の特徴(非球対称の程度、爆発エネルギー等)を明らかにした。本研究の特徴は(1)爆発計算においては、(a)中心天体からのエネルギー解放率、(b)中心天体への質量降着、(c)ある方向にジェット的にエネルギーが放出されるような極限的な状況から全方向に渡ってエネルギーが放出される比較的穏やかな非球対称爆発まで広い範囲に渡って特徴を調べたことである。また、(2)光度曲線、スペクトルについては、多次元超新星爆発モデルに基づく計算そのものが今までにない試み

である。

以下、本研究の結論を列記する。

(1)爆発、元素合成の特徴:

(1-1) 非球対称爆発では、鉄、亜鉛、コバルト等を多く含んだ物質がジェット方向に沿って高速( $>10,000\text{kms}^{-1}$ )で放出されるのに対し、酸素、マグネシウム等は中心部に落ち込み高密度領域を形成する。これは、球対称爆発における元素分布と反対の傾向である。

(1-2) 中心天体からのエネルギー解放率が小さい場合には、全爆発エネルギーではなくエネルギー解放率によって元素合成の特徴が決まる。特に、エネルギーの解放率が約  $10^{52}\text{ergs s}^{-1}$  より小さい場合には、鉄の生成量は全爆発エネルギーには殆ど依らない。

(1-3) 非球対称性が大きいと、(亜鉛、コバルト)/鉄の比は大きくなり、逆に(マンガン、クロム)/鉄の比は小さくなる。この傾向は、中心天体への降着量が大きいほど顕著となる。この傾向は、超金属欠乏星に見られる傾向と一致しており、大質量星( $>25 M_{\odot}$ )の爆発の多くが非球対称であることを示唆する(図 1)。

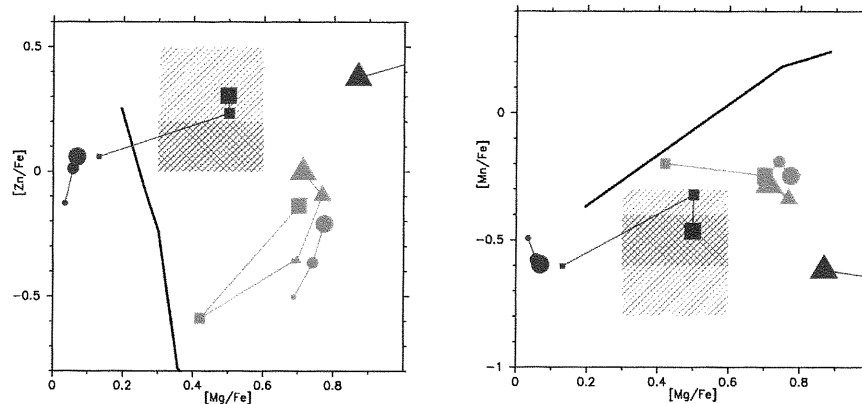


図 1 非球対称超新星の元素合成パターン。(マグネシウム/鉄)の比に対する(亜鉛/鉄)の非(左図)と(マンガン/鉄)の比(右図)。 $[X/Y]=\log_{10}(X/Y) - \log_{10}(X/Y)_{\odot}$ 。黒線は球対称モデルの予測、各点は非球対称モデルの予測を表し、サイズの大きい点ほど非球対称の程度の大いモデル。青で示した領域は金属欠乏星の元素パターン。非球対称性の大きい爆発モデルで観測値を良く説明できる。

(2)光度曲線、後期スペクトルの特徴:

(2-1)まず、角度方向に平均した光度曲線の典型的な振る舞いについて調べた。この結果、非球対称爆発の理論光度曲線は球対称モデルと異なる次のような傾向を持つことが分かった。非球対称の程度が大きいほど、最大光度到達までの時間( $t_{\text{peak}}$ )が短く、最大光度と爆発後 100 日の光度との差( $\Delta M_{100}$ )はやや大きくなる一方、100 日間の減光率( $\dot{M}_{100}$ )は殆ど変わらない。これは、爆発の特徴(高速で放出されるニッケル+低速で膨張する中心部の高密度領域)の帰結である。このことから、( $t_{\text{peak}} - \dot{M}_{100}$ )、( $t_{\text{peak}} - \Delta M_{100}$ )図上の領域を、非球対称の

程度によって幾つかに分けることができる(図 2)。この図から、典型的な Ic 型超新星と考えられている SN1994I については低質量、低エネルギーの球対称モデルで、極超新星 1998bw と 2002ap については、ともに非球対称モデルによってその光度曲線の特徴を説明することができる。非常に非球対称性の強いモデルでは観測に比べ  $t_{\text{peak}}$  が小さくなりすぎ、極超新星の非球対称性はそこまで強くないことが明らかになった。

(2-2)視線方向により、初期の光度に違いが出ることが分かった。また、この光度の違いと爆発エネルギーの間に相関が見られた。爆発のエネルギーが大きい場合には、爆発の軸に近い方向ほど光度は小さくなる。逆に低エネルギーでは、爆発の軸に近い方向ほど光度は大きくなる。これは、エネルギーが大きいほど熱源であるニッケルが高速で放出されることに起因する。

(2-3)後期スペクトルの特徴を明らかにした。非球対称爆発では、マグネシウム、酸素等の爆発前に作られた元素は中心部の低速部を占めるようになるため、細く、鋭いピークを持つ輝線として観測される。一方、爆発時に作られる鉄、カルシウム等はジェット軸方向に偏った分布を持つ。従ってこれらの元素の輝線の形は視線方向に依存し、ジェット軸に近い方向から見るほど幅が太くなる。非球対称モデルの酸素輝線の特徴は極超新星 SN1998bw、2002ap で見られたものと一致する。また、SN1998bw では強い鉄輝線が観測されており、その幅の太さから非球対称爆発をジェット軸方向から見ているものと解釈でき、これは光度曲線から得られた結果と矛盾しない(図 3)。

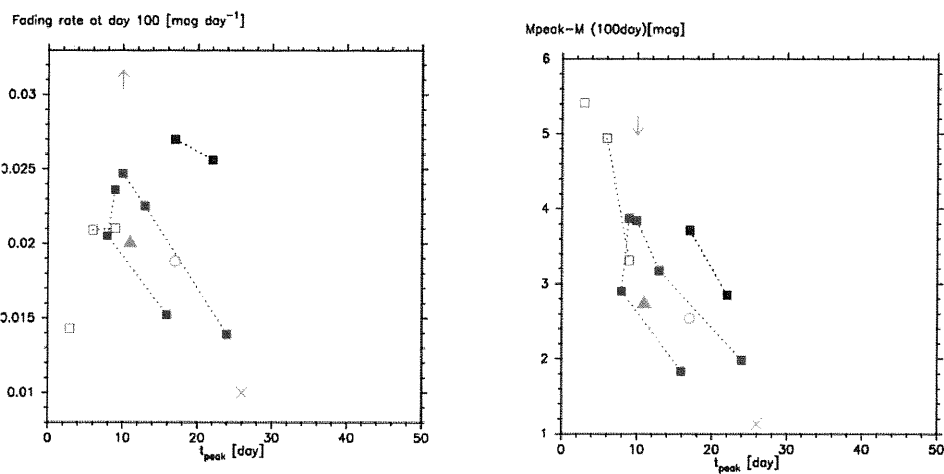


図 2 角度平均した光度曲線の特徴。 $t_{\text{peak}} - M_{100}$ (左図)、 $t_{\text{peak}} - \Delta M_{100}$ (右図)。緑の点は SN1998bw(circle)、2002ap(triangle)、1997ef(cross)、1994I(arrow)。線でつながれた各点はモデルの予測。球対称(黒)、非球対称(青)、より程度の大きな非球対称(赤)(詳細は本文及び本論文参照)。1998bw、2002ap の観測値は非球対称モデルの予測値と良い一致を示す。

(3)極超新星 SN1998bw と SN2002ap に対して、非球対称爆発モデルの光度曲線、後期スペクトルからこれらの質量、爆発エネルギー、非球対称の程度を見積もった。従来の球対称モデルでは、初期(最大光度付近)から後期(数百日)までを矛盾なく説明することはできなかった。本研究で、非球対称爆発モデルでこれを矛盾なく説明できることが分かった。

(3-1)SN1998bw については、角度平均した光度曲線の特徴(2-1)から、それほど程度の大きくない非球対称爆発であると結論できる(図 2,3)。さらに、後期スペクトル(図 3)の特徴(2-3)と初期スペクトルの特徴(視線方向に沿った高速物質の存在)から、爆発前の親星は(主系列星質量で)40 $M_{\odot}$ 程度、エネルギーは  $10^{52}$ erg 程度(球対称モデルでは  $3-5 \times 10^{52}$ erg)、視線方向は爆発の軸に近い方向(<30°)であると結論づけた。

(3-1)SN2002ap は、光度曲線からやはり非球対称モデルでよく説明できる(図 2,3)。また、光度曲線の特徴は、SN2002ap は SN1998bw よりも非球対称の程度が大きいことを示唆する(図 2)。SN2002ap については、視線方向を特定することはできなかったが、爆発軸に近い方向から見ていたのならば(25 $M_{\odot}$ 、 $5 \times 10^{51}$ erg)程度、垂直方向から見ていたのならば(30 $M_{\odot}$ 、 $10^{52}$ erg)程度であると制限を与えた。

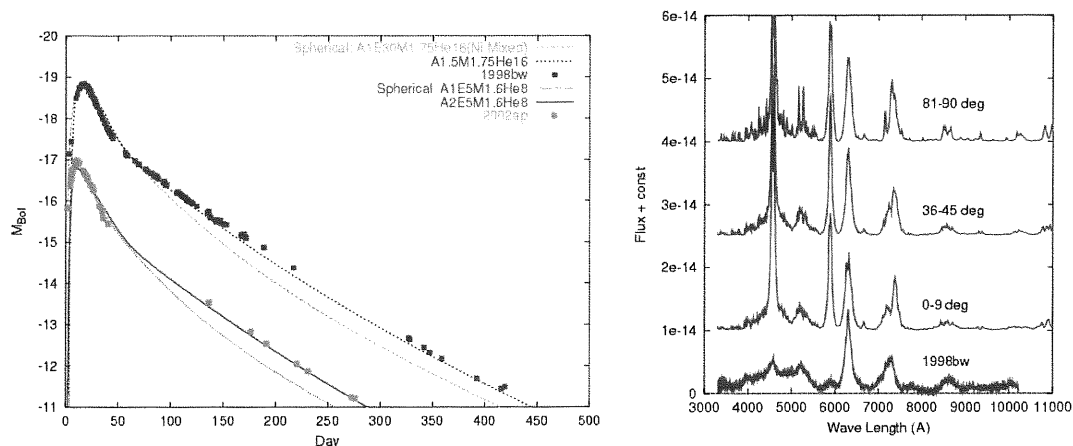


図 3 (左)非球対称モデルの光度曲線(青、赤)及び球対称モデルの光度曲線(緑、ピンク)。

(右)非球対称モデルの後期スペクトル。

以上より、(1)非球対称爆発モデルで極超新星 SN1998bw と 2002ap の観測を良く説明できること、(2)これらのモデルの予測する元素パターンと超金属欠乏星の元素パターンに良い一致がみられたこと、従って(3) 25  $M_{\odot}$  以上の大質量星の爆発の多くは非球対称であり、銀河の初期化学進化に大きく寄与した可能性がある、と結論づけた。