

# IIb 型超新星爆発の親星の多様性と爆発直前の質量放出率

大内 竜馬 (京都大学)、 前田啓一 (京都大学)

## 概要

重力崩壊型超新星は大質量星が進化の最期に起こす爆発現象であり、未だ解明されていないことも多い。特に爆発前の星 (親星) の姿やそこに至るまでの進化経路は、不明な点が多い。IIb 型超新星とは超新星爆発の観測的分類の一つであり、爆発直後には水素の吸収線が見えるが、徐々に水素の吸収線が弱くなりヘリウムの吸収線が卓越するスペクトル進化を示すことで特徴付けられる。IIb 型超新星の親星は候補天体も含めていくつかの天体が同定されているが、中でも親星が観測されている 1993J, 2008ax, 2011dh, 2013df の 4 つの IIb 型超新星は特に詳細な観測がなされている。これらの超新星と星周物質との相互作用の観測によりこれらの親星の爆発直前の質量放出率が求められているが、それによると半径の大きい親星ほど質量放出率は大きく、しかもそれらは半径が比較的小さい親星よりも、爆発前に一桁程も大きい質量放出率を持っていたことが分かった。これらの観測事実は単独星の恒星風のみを考えるのでは説明が難しい。本研究はこれらの親星の半径と爆発前の質量放出率の間の相関関係が、親星への連星進化モデルで説明できることを示した。

## 1 導入

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星 ( $\geq 8M_{\odot}$ ) がその進化の最後に起こす、大規模かつ突発的な爆発現象である。それらはスペクトルや光度曲線に応じて分類分けがなされている。スペクトルに水素の吸収線を伴うものを II 型と呼び、そうでないものを I 型と呼ぶ。さらに I 型の中でもケイ素の吸収線はないが He の吸収線を持つものを Ib 型と呼び、ケイ素線もヘリウム線も伴わないものを Ic 型と呼ぶ。我々が本研究で焦点を当てたのは IIb 型と呼ばれる超新星であり、それは初期のスペクトルには水素線が見られるが次第にそれが弱まり、代わりにヘリウム線が卓越するようなスペクトル進化を示すことで特徴付けられる。

IIb 型超新星の親星 (爆発する前の星) は、水素外層のほとんどを失った大質量星と考えられている。外層を失うシナリオとしては、単独大質量星 ( $\geq 25M_{\odot}$ ) が強い恒星風によって水素外層の大半を放出する単独星進化と、連星系をなす星が伴星へ水素外層の大半を輸送する連星進化の 2 つが考えられている。いずれが主であるかについてはまだ決着はついていないが、近年では様々な状況証拠から連星系のシナリオがより支持されつつある。

さて、超新星爆発が起きた後にその位置の爆発前のサーベイ観測のデータの中に親星候補天体を同定する作業が、いまや数多くの超新星について行われており、IIb 型超新星に関してもいくつかの親星が見つかっている。中でもとりわけ 1993J, 2008ax, 2011dh, 2013df の 4 つの超新星は、親星が観測されているうえに超新星自体についても詳細な観測がなされており、このタイプの超新星について理解を深めるための貴重なデータを与えている。特に、超新星と星周物質との相互作用に由来する後期の電波や X 線、可視光の観測により、いくつかの親星の爆発直前の質量放出率が求められている。これら 4 つの超新星の基本的な観測量を表 1 にまとめた。

表を見て気付くことは、一つには IIb 型超新星の親星は HR 図上で多様性を示すということであるが、もう一つには親星半径と質量放出率の相関関係がある。すなわち、半径の大きい親星は比較的半径の小さい親星よりも爆発前に一桁程も大きな質量放出率を持っていたということである。この傾向は、親星が観測されていないものも含めれば、より多くのサンプルによって支持されている (Kamble et al. 2016)。この傾向は単純に単独星の恒星風を考えるだけでは説明がつかない。そこで我々は、この観測事実は親星が連星をなして爆発時まで質量輸送をしてお

り、その一部が系外に放出されたためだとして説明出来ないだろうかと考えた。それを確かめるために我々は様々な初期パラメータを持った IIb 型親星の連星進化モデルを計算し、各モデルについて爆発前の質量放出率を計算したのちに、それを観測と比較した。

## 2 手法

星の進化計算には MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) コードを用いた (詳しくは Paxton et al. 2011, 2013, 2015)。MESA は 1 次元の星の進化コードであり、2 つの星の進化を同時に解いて 2 星間の質量輸送も考慮に入れた連星進化計算を行うこともできる。

初期重元素比は  $Z=0.02$  とした。対流判定条件は Ledoux を用い、計算は混合距離理論に従い混合距離を  $2.0 \times H_P$  とした ( $H_P$  はスケールハイト)。半対流は Langer et al. (1985) に従って拡散的なプロセスとして扱い、その効率を決める係数を  $\alpha_{sc} = 1.0$  とした。またオーバーシュートについては Herwig (2000) の拡散的な手法を採用し、 $f = 0.018$ ,  $f_0 = 0.002$  とした。

両星の恒星風は、光球における温度が  $1.0 \times 10^4 K$  より高い時は Vink et al. (2001) によるものを、それより低い時は Reimers (1975) に従って計算した。

主星 (以下本文では、計算開始時に質量がより重い星を主星と呼ぶことにする) がロッシュローブを満たしたときの質量輸送の計算には Ritter のスキーム (Ritter (1988)) を用いた。また今回は非保存な質量輸送のみを考え、質量輸送効率  $f$  (輸送された質量のうち、伴星に降着する割合) を  $f=0.5, 0.0$  の 2 つの値を考え、計算の間中一定に保った。この際、降着できなかった物質は伴星の軌道角運動量を持ち去るものと仮定した。また 2 星が同時に各々のロッシュローブを満たした場合は、おそらくこの後共通外層期を経ると考えられ、それは MESA では扱えないため計算は中断した。爆発直前の質量放出率は、計算終了時のモデルとそこからおよそ 1000 年前のモデルの 2 星の合計質量の差をその間の時間で割ることによって求めた。

主星の質量に関しては  $16M_{\odot}$  で固定した。これは、星の爆発前の光度は主にゼロ歳主系列星時の質量で決まると考えられるので、爆発前の光度が観測されている IIb 型超新星の親星のそれと大体一致するよ

うに選んだものである。伴星質量は、この主星質量に対して質量比  $q = M_2/M_1$  は 0.6, 0.8, 0.95 の範囲を考えた。また連星系の初期公転周期は 5 ~ 2000 日の範囲で動かした。

進化計算は 2 つの星がともに ZAMS の状態から開始し、主星が炭素燃焼を開始したときに終了した。この段階から爆発にいたるまでの時間は十分短いと考えられている。またこれらのモデルのうち、最終的な水素外層の質量が  $0.01M_{\odot} \sim 1M_{\odot}$  の範囲にあるものが IIb 型の超新星爆発を起こすと仮定した。これより水素外層が少ないものは Ib、Ic 型の超新星となり、これより水素外層の多いものは II 型の超新星爆発を起こすと考えられる。

## 3 結果

以下では、2 星同時にロッシュローブを満たすことなく炭素燃焼終了時まで計算できたモデルについての結果のみを示す。図 1 は質量輸送効率  $f=0.0$  の場合の、IIb 型の判定条件を満たした親星モデル (計算終了時のモデル) と上で述べた 4 つの IIb 型超新星の観測された親星の HR 図上での位置を比較したものである。これより、我々の連星進化モデルは観測されている 4 つの親星の HR 図上での位置を再現できていることが分かる。

次に、図 2 は半径に対する爆発前の質量放出率を我々の全てのモデル (II 型も含む) についてプロットし、それを観測値と比較したものである。これより我々のモデルは観測によって示唆された、半径の大きい親星は比較的小さいそれより 1 桁程度大きい質量放出をするという傾向を説明できていることが分かる。

## 4 議論

本節では、連星モデルにおいて、半径の大きい親星を作るモデルほど質量放出率が大きくなる傾向 (図 2) がどのようにして説明されるかを考える。

今回計算した全モデルのうち、初期公転周期が 5 日のモデルを除いた全てのモデルにおいて、計算終了時には質量輸送が行われていた。爆発前 1000 年程度の時点では、質量輸送率がそこまで大きくない ( $\dot{M}_{RLOF} \sim 10^{-6} \sim 10^{-5} M_{\odot} yr^{-1}$ ) ことから、これらの連星系では力学的、熱的に安定な質量輸送が行

超新星の名前	$\log T_{eff}(K)$	$\lg(L/L_{\odot})$	半径 ( $R_{\odot}$ )	平均質量放出率 $\dot{M}(M_{\odot}/yr)$
1993J	$3.63 \pm 0.05$	$5.1 \pm 0.3$	$\sim 600$	$(2 - 6) \times 10^{-5}$
2008ax	$3.9 \sim 4.3$	$4.4 \sim 5.25$	$\sim 50$	
2011df	$3.76 \sim 3.80$	$4.92 \pm 0.20$	$\sim 200$	$3 \times 10^{-6}$
2013df	$3.62 \sim 3.64$	$4.94 \pm 0.06$	$\sim 600$	$(5.4 \pm 3.2) \times 10^{-5}$

表 1: 詳細な観測がなされている 4 つの IIb 型超新星の親星に関する基本的な観測量。平均質量放出率は爆発前おおよそ 1000 年程度での系からの平均質量放出率を表す。HR 図上での位置に関するデータは Maund et al. (2004)、Folatelli et al. (2015)、Maund et al. (2011)、Van Dyk et al. (2014) から、また質量放出率のデータは Fransson et al. (1995) Maeda et al. (2014), Maeda et al. (2015) から取った。

われていると考えられる。このとき、質量輸送率は次のように書けることが知られている。

$$-\dot{M}_{RLOF} = \frac{M_1}{\zeta_{eq} - \zeta_L} \left( \frac{\partial \ln R_1}{\partial t} - \frac{\partial \ln R_{r1,1}}{\partial t} \right) \Big|_{\dot{M}_1=0} \quad (1)$$

ただし、 $M_1$  は主星、つまりドナーの質量であり、 $R_1, R_{r1,1}$  はそれぞれ主星の半径、ロッシュローブ半径を表す。また  $\zeta_{eq}$  は熱的平衡状態を保ったまま質量を変化させたときの半径の変化率を、 $\zeta_L$  は質量の変化に対するロッシュローブ半径の変化率を表し、それぞれ

$$\zeta_{eq} \equiv \left( \frac{\partial \ln R_1}{\partial \ln M_1} \right)_{eq} \quad (2)$$

$$\zeta_L \equiv \frac{\partial \ln R_{r1,1}}{\partial \ln M_1} \quad (3)$$

と定義される。(1) 式の括弧の中の第二項は重力波によるもので、今考えている系では無視できる。しかも  $\zeta_L$  に関して、最後  $\sim 1000$  年ではほとんどモデルに依らず  $-1$  程度であることが示せる。結局、質量輸送率は

$$-\dot{M}_{RLOF} \simeq \frac{M_1}{\zeta_{eq} + 1} \frac{\partial \ln R}{\partial t} \Big|_{\dot{M}_1=0} \quad (4)$$

さらに言えば、 $\frac{\partial \ln R_1}{\partial t} \Big|_{\dot{M}_1=0}$  はコアの振る舞いによって決まると考えられるが、IIb 型の親星モデルのコア質量は  $4 \sim 5 M_{\odot}$  とどのモデルも初期パラメータに依らず同じ程度の値を持つので、この項はモデルによってそれ程値が異ならないと考えられる。

以上の議論より、モデルごとに質量輸送率を変化させているのは主に  $\zeta_{eq}$  の項だと考えられる。実際、次のことからその議論の妥当性が示せる。

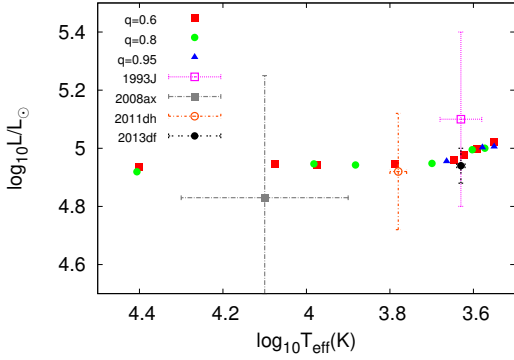


図 1: 計算した IIb 型親星モデルと観測されている親星の HR 図上での位置の比較

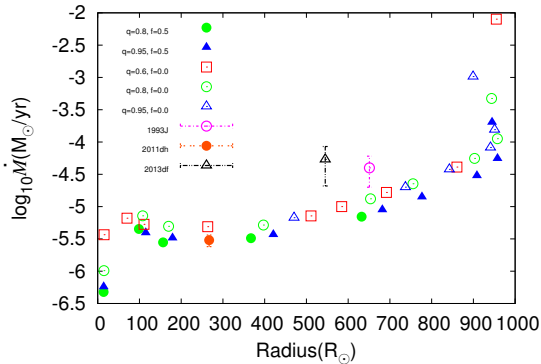


図 2: 半径に対する爆発前の質量放出率をモデルと観測とで比較したもの

完全平衡状態にある炭素燃焼終了時の単独星の半径と水素外層質量の関係を示したもの図3である。 $\zeta_{eq}$ は定義より、この曲線の傾きに反比例する。しかも、これと図2を比較すると、曲線は同じような形状を示していることが分かる。これは質量輸送率を変化させているのが主に $\zeta_{eq}$ の項だという上の主張を裏付けるものである。

したがって、半径が大きい親星ほど質量輸送率(ひいては質量放出率)が大きいのは、半径の大きいものほど $\zeta_{eq}$ が小さいためだとして説明できる。あるいは物理的に言えば次のようになる。半径の大きい星は、質量輸送に伴って質量を失ったのちにケルビン・ヘルムホルツ時間 $\tau_{KH} \approx 10yr$ で完全平衡状態に至ったときの半径がもとはあまり変化しないため、ほとんどコア進化に伴う膨張の時間スケールで質量を輸送する。一方で半径の小さい星は $\zeta_{eq}$ が小さいため、質量を失うと半径が大きく減少する。その結果、再び輸送をするためには上の場合よりより長い時間をかけて星の膨張を待たねばならず、質量輸送率の起こるタイムスケールは大きくなり、質量輸送率は小さくなる。

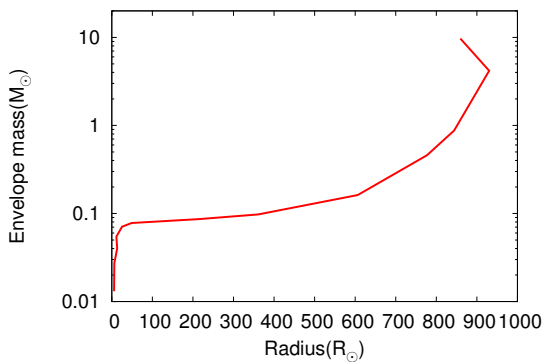


図3: 完全平衡状態にある単独星の、炭素燃焼終了時における半径と水素外層質量との関係

## 5 要約

4つのIIb型超新星爆発(1993J、2008ax、2011dh、2013df)は親星に関する情報や爆発直前の質量放出率が観測的に求められている。これらのデータによると、親星半径と爆発前の質量放出率との間には相

関関係があり、半径の大きい親星は半径の比較的小さい親星よりも1桁程度大きい質量放出率を持っていたことが示唆されている。このような傾向は単に恒星風を考えるだけでは説明が難しい。本研究では、IIb型親星の連星進化モデルを計算し、様々なパラメータを持った連星を進化させ爆発直前まで進化計算を行った。その結果計算したほとんど全てのモデルにおいて、爆発時には質量輸送が行われており、しかもその質量輸送率(ひいては質量放出率)は親星半径が大きいものほど大きな値を持つことが示された。このように、我々のIIb型親星への連星進化モデルは、観測されている親星のHR図上での位置を再現するだけでなく、観測より示唆される親星半径と質量放出率の関係をも説明できることを示した。この結果は、IIb型親星の生成機構として連星進化シナリオを支持するものである。

## 参考文献

- [1] Folatelli, G., et al. 2015ApJ, 811, 147
- [2] Fransson, C. et al., 1996ApJ, 461, 993
- [3] Herwig, F., 2000A&A, 360, 952
- [4] Kamble, A., et al. 2016ApJ, 818, 111
- [5] Langer, N., et al. 1985A&A, 145, 179
- [6] Maeda, K., et al. 2014ApJ, 785, 95
- [7] Maeda, K., et al. 2015ApJ, 807, 35
- [8] Maund, J. R., et al. 2004Natur, 427, 129
- [9] Maund, J. R., et al. 2011ApJ, 739L, 37
- [10] Paxton, B., et al. 2011ApJS, 192, 3
- [11] Paxton, B., et al. 2013ApJS, 208, 4
- [12] Paxton, B., et al. 2015ApJS, 220, 15
- [13] D. Reimers "Problems in Stellar Atmospheres and Envelopes" Baschek, Kegel, Traving (eds), Springer, Berlin, 1975, p. 229
- [14] Ritter, H. 1988A&A, 202, 93
- [15] Van Dyk, S. D., et al. 2014AJ, 147, 37
- [16] Vink, J. S., et al. 2001A&A, 369, 574