

# 大質量連星系における超新星爆発が伴星に与える影響

平井 遼介 (早稲田大学大学院 先進理工学研究科)

## Abstract

超新星爆発の爆発メカニズムを探るため、詳細な物理を考慮した大規模な数値計算が行われているが、観測に合うような爆発を再現出来た例はまだない。超新星の親星は大質量であると考えられているため、連星系を組んでいる可能性が高い。連星系による影響が超新星の爆発メカニズムに何らかの影響を及ぼしていることも考えられるため、超新星親星が連星系を組んでいるかどうかは重要な問題である。本研究ではそれを観測から制限できるようになるための第一歩として超新星爆発が伴星の質量をどの程度剥ぎとっていくかを計算した。また、その質量が連星の初期パラメータ(公転半径、主星質量、伴星質量)にどのように依存するかを調べた。

## 1 Introduction

超新星爆発は太陽の 10 倍以上の重たい星がその進化の最後に起こすとされている高エネルギー現象である。現在の標準的な理論では星の中心部が重力崩壊を起こして、そこで発生した衝撃波が星の内部を伝わることで起きるとされている。そのような中、詳細な物理を考慮した大規模な計算が行われているが、爆発しない、爆発エネルギーが観測と比べて小さいなど問題は多く残されており、その爆発メカニズムは未だに解明されていない。

一方、観測される星の大部分(約 5 割)は連星系を組んでいることが観測から知られている。特に、大質量な星ほどその割合が高く、O 型星では約 8 割にもものぼる。超新星爆発は大質量の星が起こすとされているため、連星系中で起きている可能性が非常に高い。連星系を組んでいる星はその進化の過程で質量交換をすることで単独星とは全く異なる進化をする。そのことが超新星の爆発メカニズムに影響を与えている可能性があるため、連星系を組んでいるか否か、またその連星系がどのような性質(主星質量、質量比、公転周期)を持つかは超新星の爆発メカニズムを探る上でも非常に重要である。

連星系中で超新星爆発が起きた場合、その爆発が伴星の表面物質を剥ぎとり、観測へ何らかの影響を与えることが考えられる。爆発が表面物質と混ざることによってスペクトルが変わることや、超新星残骸中に見つかる星の質量や明るさが変わることなどである。

本研究はそのような影響を調べるために、実際に超新星爆発が連星系内で起きた場合にその爆発が伴星の質量をどれくらい剥ぎとるかを数値シミュレーションによって検証した。Ia 型超新星に関しては同様の研究が進んでいるが(Pan et al. (2012))、重力崩壊型超新星に関してこのような計算を行った例は初めてである。

## 2 Methods

Euler 方程式を解く流体コードを使用し(Sawai et al. (2013))、シミュレーションを 2 段階に分けて行った。第一段階は主星の爆発、第二段階は爆発が伴星に衝突する段階である。重力の Poisson 方程式を解くことで自己重力を含めた計算を行った。また、ポアソン方程式の境界条件は球対称を仮定し、多重極展開を用いて与えた。

### 2.1 Models

連星のモデルとしては、大質量星同士の連星を想定し、連星パラメータ(主星質量、伴星質量、公転半径)をそれぞれ変えた複数モデルについて計算を行った。基準とするモデルは  $10M_{\odot} - 10M_{\odot}$  の連星系(主星は連星進化の結果  $60M_{\odot}$  から  $10M_{\odot}$  まで mass loss しているモデル)で、公転半径はこれらの星が

Roche lobe overflow(RLOF) を起こさないような最低の値を Eggleton relation(1) を用いて与えた。

$$\frac{r_L}{A} = \frac{0.49q^{\frac{2}{3}}}{0.6q^{\frac{2}{3}} + \ln(1 + q^{\frac{1}{3}})} \quad (1)$$

## 2.2 Primary Star Explosion

主星の爆発は球対称であると仮定して行った。1次元球座標グリッド上に Heger & Wellstein 1999 (unpublished) の親星モデルを置き、その中心部に  $3 \times 10^{51}$ erg のエネルギーを注入し、爆発させた。このとき、中心には  $1.4M_{\odot}$  の中性子星が残るように内側の境界を設定した。外側の境界は星半径の4倍程度に取った。星の外側で、距離の異なるいくつかの点で、密度、圧力、内部エネルギー、速度の時間変化を調べた。各点における物理量の時間変化が距離にどのように依存しているかを比較した。その結果、少なくともこの半径の4倍の距離までは超新星爆発が断熱自由膨張していることが確認できたため、その後も自由膨張を続けると仮定して次の段階にこの結果を使用した。

## 2.3 Impact on Companion

伴星も球対称を仮定して2次元球座標グリッド上に Woosley, Heger & Weaver 2000 の親星モデルを置き、中心軸方向から第一段階で得られた爆風のデータを外挿した。爆風の密度ピークが計算領域を抜けるまで計算を続けた。最終的にどれだけの質量が星に束縛されたままているかを計算し、剥ぎとれた質量を見積もった。このとき、星の中心付近は density scaleheight が追いかれておらず、解像度が不足していたため、半径  $5 \times 10^{11}$ [cm] までをくり抜いて計算を行った。

## 3 Results

第一段階の結果は図1の通り。爆風からの距離に応じて密度ピークが到着する時間が遅れ、密度も距離の3乗に比例して落ちていることが確認できた。ま

た、圧力や速度などに関しても同様の減衰が見られ、自由膨張していることが確認できた。

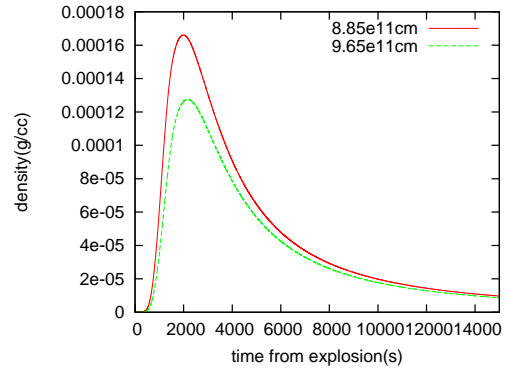


図 1: 爆風の密度の時間変化

図2は第二段階の結果の一部である。図の左側から、第一段階で得られた爆風が吹き込んでいて、中心にある伴星に当たっている。図2は密度分布を表していて、伴星表面に衝撃波が発生している様子が見て取れる。星の表面物質がはぎ取れている様子も見て取れる。

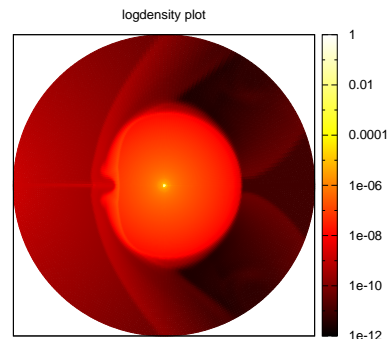


図 2: ある time step での密度分布

また、最終的にはぎ取れた質量は  $2M_{\odot}$  であった。

## 4 Discussion

今回の結果は preliminary であり、まだ全体の傾向をつかむまでには至っていない。今後はより詳細な結果を得るために以下の変更点を加える。

- モデル数を増やす  
パラメータを変えることによる結果の依存性をより詳しく知るため、モデル数を増やして計算を行う。
- AMR 化  
今回は伴星の中心部をくり抜いて計算を行ったため、重心の移動に対応できていない。伴星が爆風によってどれくらい動かされたかを知るために中心まで解く必要があるが、中心部の大きな density scaleheight を追い切るために AMR(Adaptive Mesh Refinement) 化が必要である。
- 3D 化  
本計算では軸対象を仮定した 2 次元で計算を行ったが、実際は伴星は自転しており、連星なので公転もしているため、3 次元計算が必要である。
- 組成  
表面組成などを考慮して計算を行い、観測時のスペクトルへの影響などを考慮する。

## 5 Conclusion

今回基準としたモデルでは  $10M_{\odot}$  の星が爆風によって  $2M_{\odot}$  の質量を失うことが分かった。これは、星の約 20% に当たり、その後の連星の進化や超新星残骸中に見つかる星のスペクトルなどに小さくない影響を与えることが考えられる。

## Reference

- K.-C.Pan and P.M.Ricker and R.E.Taam 2012. Astrophysical Journal
- H.Sawai and S.Yamada and K.Kotake and H.Suzuki 2013. Astrophysical Journal