

# 連星系中の超新星爆発

早稲田大学 M1

平井 遼介

## 1 背景

現在観測されている星の7割以上は連星系を組んでいることが近年の観測から知られている。また、大質量の星ほど連星系を組みやすいということも観測からわかっている。このように、宇宙には連星系が溢れているため、その進化や発展を知るとは宇宙の進化を知る上でも非常に重要である。

その中でも、私は連星系中の超新星爆発について研究している。具体的には、爆風が伴星にどのような影響を及ぼすかを数値的に計算している。Ia型超新星を起こすような低質量の連星系中の超新星爆発に関してはそのような研究が進んでいる。しかし、大質量の連星系についてはあまり進んでいないため、私はそのような大質量の連星系に焦点を当てた。伴星が爆風によってどのような影響を受けるかを計算することでIa型以外の超新星爆発の親星などに理論的な制限を与えられることを目標にしている。

## 2 研究内容

私の研究は、大質量( $\geq 8M_{\odot}$ )の連星系中で、片方の星が超新星爆発を起こしたときに伴星がどのような影響を受けるかの数値シミュレーションです。具体的にはどの程度質量が剥ぎとられるかと、爆発後に重心がどのような速度を持つかを計算しています。

## 3 シミュレーション

シミュレーションに使用したコードは、Central schemeでオイラー方程式を解く流体コードである。しかし、エネルギー式に重力の項は含めなかった。そのため、星の平衡形状を保つために初期の星の圧力分布を一様で小さいものにした。シミュレーション自体は大きく2段階に分けて行った。第一段階は超新星爆発から自由膨張期まで、第二段階は爆風の伴星への衝突の段階である。

### 3.1 モデル

爆発による影響が、どのような依存性を持つのかを調べるために複数のモデルを用意して計算を行った。

- 伴星の質量は  $7.95M_{\odot}$  で固定
- 基準となる星間距離 (separation) は (1) 式 (Eggleton's relation) を使用して Roche lobe Overflow を起こさないような最小の距離を計算して設定。
- 全部で4モデル計算する。

models	Primary mass	separation
17s <sub>1</sub>	3.39M <sub>⊙</sub>	1.5 × 10 <sup>14</sup> [cm]
17s <sub>3</sub>	3.39M <sub>⊙</sub>	4.5 × 10 <sup>14</sup> [cm]
17s <sub>5</sub>	3.39M <sub>⊙</sub>	7.5 × 10 <sup>14</sup> [cm]
1s <sub>3</sub> <sub>1</sub>	10.75M <sub>⊙</sub>	1.5 × 10 <sup>14</sup> [cm]

表 1: シミュレーションに使用した 4 モデル

Models	Mass	Radius
17s	3.39M <sub>⊙</sub>	1.5 × 10 <sup>11</sup> cm
1s3	10.75M <sub>⊙</sub>	9.6 × 10 <sup>10</sup> cm

表 2: 爆発する星のモデル

$$\frac{r_L}{A} = \frac{0.49q^{\frac{2}{5}}}{0.6q^{\frac{2}{5}} + \ln 1 + q^{\frac{1}{5}}} \quad (1)$$

但し、 $q$  は連星の質量比、 $A$  は separation を表す。

### 3.2 第一段階

第一段階ではまず、初期条件として Heger&Wellstein の超新星爆発直前の星のモデルを使用して極座標グリッド上に 1 次元球対称な星のモデルを作成した。中心には 1.4M<sub>⊙</sub> の中性子星が残ると仮定して中心から 1.4M<sub>⊙</sub> より外側の部分 10mesh 分の領域に超新星爆発の典型的な爆発エネルギーである 10<sup>51</sup>erg のエネルギーを注入して爆発をさせた。この段階で使用したモデルは以下の二つ。

この段階で得られた結果は以下のとおり。星内部の時間発展は図のとおり。その後、衝撃波が星表

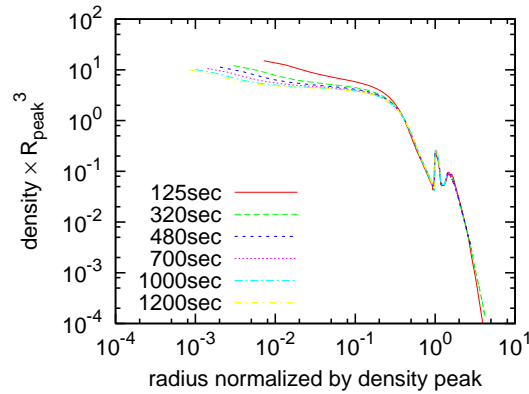


図 1: 超新星爆発による星内部の密度の時間発展

面を抜けてから半径の 4 倍の距離に到達するまでは自由膨張していることを確認した。その後も自由膨張を続けると仮定して今後のシミュレーションを進める。

### 3.3 第二段階

第二段階では、まず伴星を軸対称な円筒座標グリッド上に作成する。中心軸方向の境界条件として第一段階で得られた爆風のデータを外挿する。separation などを変えて合計 4 モデルで計算を行う。計算時間は、爆風の密度が最も高い部分が計算領域を通過するまでを追った。

## 4 結果

発表では、密度、圧力、速度の時間発展を動画で紹介した。得られた結果は、以下の表の通り。

Models	Threshold[g/cc]	Remaining mass[ $M_{\odot}$ ]	Mass loss Ratio[%]	Kick Velocity[cm/s]
17s <sub>1</sub>	$2 \times 10^{-8}$	6.01	24.4	$6.06 \times 10^6$
17s <sub>3</sub>	$2 \times 10^{-8}$	6.03	24.2	$6.03 \times 10^6$
17s <sub>5</sub>	$2 \times 10^{-8}$	5.28	33.6	$7.13 \times 10^5$
1s3 <sub>1</sub>	$2 \times 10^{-8}$	4.81	39.5	$6.08 \times 10^6$

表 3: 第二段階の結果

ここで、Threshold とは、残った星を定義するための閾値である。今回の計算では重力項を含めていないため、残った星を定義するのにある密度を設定した。その閾値以上の密度を持つセルを残った星とし、その質量を積分することで残った星の質量を計算した。

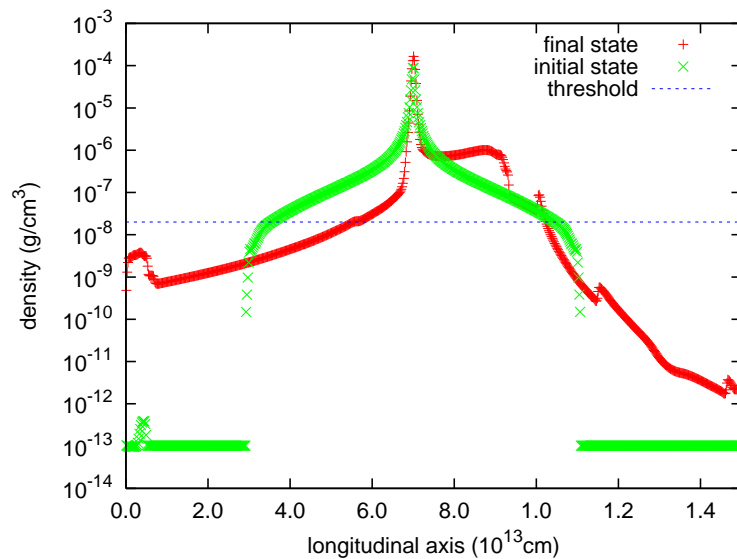


図 2: 爆風到達前後の密度分布と閾値

結果の表から、伴星は 2 割 ~ 4 割と、比較的多くの質量を失っていることがわかる。また、連星系がケプラー速度で公転しているとすると、 $1.6 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^6$  cm/s の速度で動いているため、爆風によって与えられた速度もそれと同等の大きなものであることがわかる。

## 5 まとめ

残った星の定義の仕方によって大きく変わってしまうが、星の2～4割が爆発によって吹き飛ばされる可能性があることがわかった。また、与えられる速度は公転速度と同等のものである。

## 6 今後の展望

今回は以上のような結果を得られたが、近似が粗い点がいくつかあるため今後はそれを修正していきたい。

- 重力の影響も考慮して計算を行う。
- 公転の影響も今回は考慮していないため、それによる遠心力も考慮して計算を行う。
- 伴星の中心付近の mesh が粗いため、Adaptive Mesh Refinement(AMR)などをコードに組み込む必要がある。
- もっとたくさんのモデルを解いて詳細な傾向をつかみたい。