

SN 1987A の ^{56}Ni の膨張速度を説明する
ニュートリノによる非球対称な超新星爆発について

九州大学宇宙物理理論研究室

修士一年 守田佳永

紹介論文

A&A 453, 661-678 (2006)

Non-spherical core collapse supernovae

II. The late-time evolution of globally anisotropic neutrino-driven explosions and their implications for SN 1987A

K. Kifonidis, T. Plewa, L. Scheck, H.-Th. Janka, and E. Müller

概要

回転のない 1.5 太陽質量青色超巨星が非等方性の強い超新星爆発をするようなシミュレーションを行い、衝撃波形成直後から数時間後までを追った。衝撃波が復活するとき low-order モードが支配的であるような爆発は SN 1987A の観測と一致する。low-mode モデルは鉄族の最大最終速度 3300kms^{-1} 、He/H 境界における強い混合、水素の下降速度 500kms^{-1} 、イジェクタの縦横比 1.6 を示す。low-mode 爆発の成功は、metal-rich クランプの high-mode モデルよりも大きな初期最大速度と衝撃波の変形とによる。初期速度の大きなクランプは He コアをリバースショックの形成時間よりも短いタイムスケールで通り抜け、リバースショックと相互作用しない。衝撃波の変形は He/H 境界に多くの渦を生むことで、強い Richtmyer-Meshkov 不安定を誘発し、イジェクタに非等方性をもたらす。

1. イントロダクション

大きなスケールの非等方性や混合は超新星残骸の一般的な特徴であり、これは流体力学的不安定性が原因だと考えられてきた。親星のモデルにエネルギーを入れ超新星爆発が生じるようにしてシミュレーションが行われてきたが、観測を満足に説明することはできなかった。

Paper I (Kifonidis et al. 2003) では、ニュートリノ駆動型爆発パラダイムを用いて、コア崩壊から衝撃波が光球を脱出した後までの流体力学的進化と非等方性の成長を追った。SN 1987A のニッケルの高い速度の再現を試みて、ニュートリノフラックスの初期値を高くし、続いて指数関数的に減少するようにした。かなりエネルギーの高い爆発となったが、得られたニッケルの最終速度は期待外れに小さかった。

さらに、このモデルセットだと爆発は急速に進み、流体力学的不安定が認められない。球対称からの逸脱は比較的小さなスケールでしかなく、SN 1987A

で観測されたイジェクタの非等方性や混合を再現できない。

この問題はニュートリノの影響の記述を改良することで解決できる。コアニュートリノフラックスの初期値を下げ、それからゆっくり減少するようにした。爆発が十分にゆっくり進むならば、小さな摂動から成長した **low-mode** の不安定が衝撃波とイジェクタの非等方性をもたらす。

2. モデル

Model	t_{exp} [s]	$E_{\text{exp}}^{t=3000\text{s}}$ [10^{51} erg]	M_{ns} [M_{\odot}]	t_{sim} [s]
b18a (disregarded)	0.190	1.0	1.3	10^4
b18b	0.185	1.0	1.3	2×10^4
b23a	0.138	2.0	1.2	2×10^4
T310a (Paper I)	0.062	1.7	1.1	2×10^4

非動径流体力学的不安定を誘発するため初期速度場にランダムに摂動を加えた。b18a と b18b はその摂動が異なる。b23a は b18 の 2 倍の爆発エネルギーを持つ。

3. 結果

図 1 はそれぞれ $t=4\text{s}$ と $t=100\text{s}$ におけるモデル b23a のシミュレート結果である。カラーは密度を表している。衝撃波は最初上下に長く変形し、それから赤道部の膨らみをもった表面に取って代わられ、次第に球形になる。ダウンフローが合流することで He/H 境界面に二つの湾曲が生じる。よって衝撃波はこの境界面に対して斜めにぶつかり、境界層に相当数の渦が生まれ、強い Richtmyer-Meshkov 混合を誘発する。

図 2 は $t=10000\text{s}$ におけるエントロピー分布を示している。二つのほとんど同じ大きさの水素のポケットが成長し、メタルコアから物質を引き出す。最終的な元素の空間分布は衝撃波の最初の形に依存する。

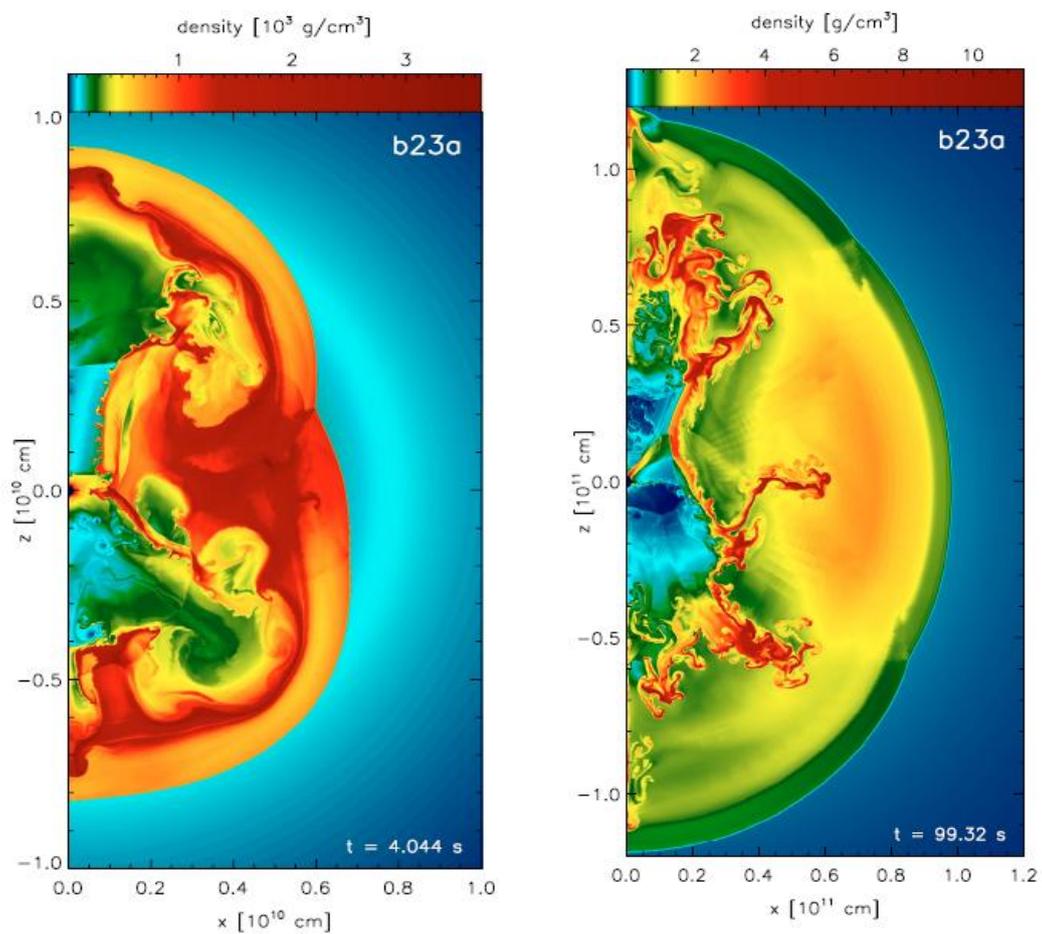


図1 モデル b23a の密度分布 ($t=4s, 100s$)

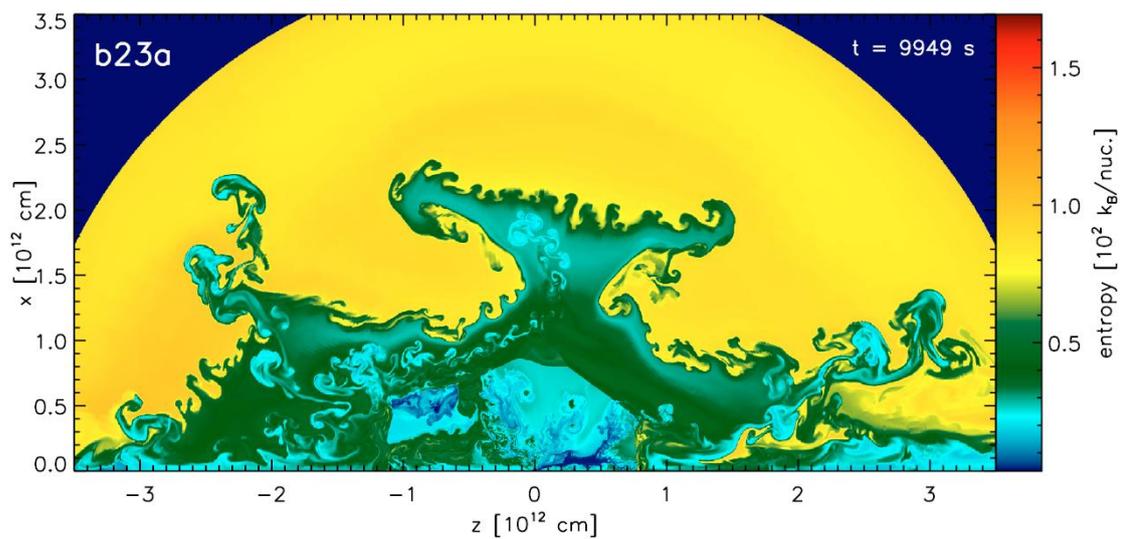


図2 モデル b23a のエントロピー分布 ($t=10000s$)

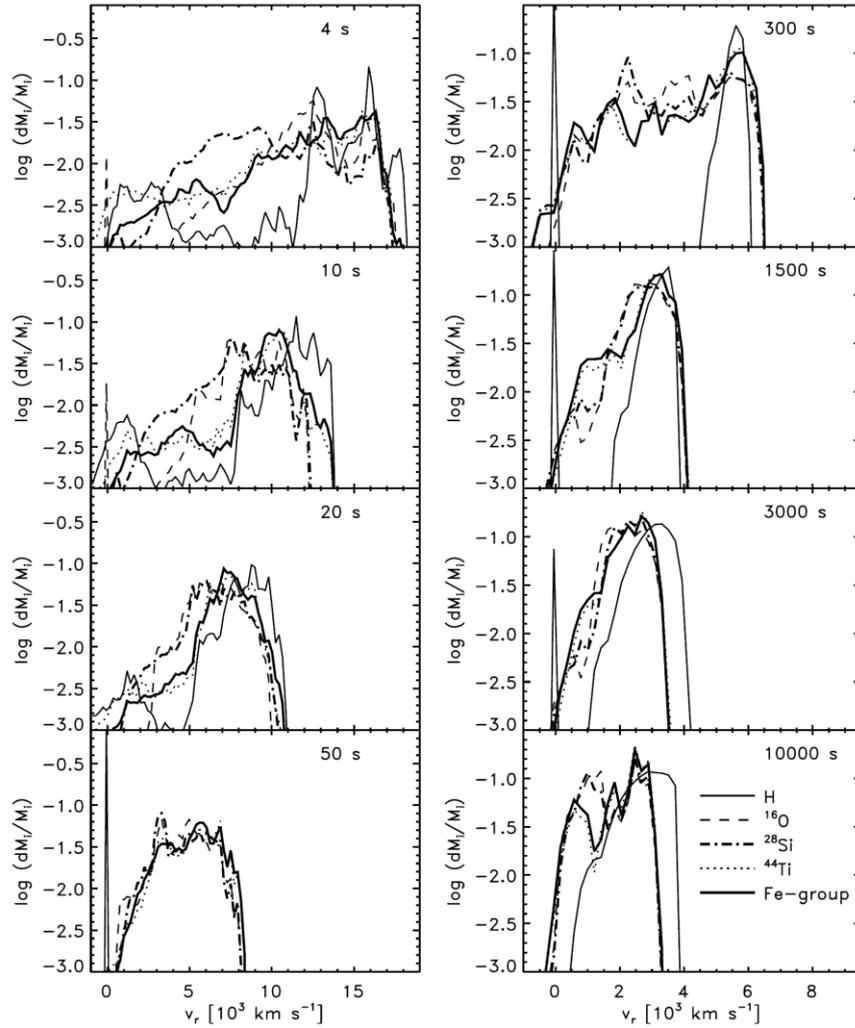


図3 モデル b23a における各元素の動径方向の速さに対する質量比

モデル b23a における各元素の速さの時間変化は図3のようになる。コアバウンスから数秒後の鉄族原子核の速度空間はモデル T310a よりも広い分布を示し、コアバウンスから4秒後のメタルの最大速度は T310a より40%大きい。

T310a では $t=1500\text{s}$ 以降、メタルは強いリバースショックとの相互作用によって劇的にスローダウンしたが、b23a だと最も速いクランプはコアバウンスの300秒後に He/H 境界にほとんど達しており、このとき強いリバースショックはまだ発生していない。従って、最も速いクランプはこのリバースショックの相互作用による減速を受けない。

また、メタルクランプが He/H 境界の Richtmyer-Meshkov 不安定の渦に飲み込まれることによっても減速は小さくなる。衝撃波が球対称なときは利用できなかったこの層の渦のエネルギーを遅い時間に取り出すことができる。

結果として鉄族原子核の最大速度はわずかにしか減少せず、 $t=10000\text{s}$ にお

いて 3300km^{-1} を示し、これは SN 1987A の観測結果とよく一致する。

4. 結論

15 太陽質量青色超巨星の超新星爆発の爆発直後 low-mode 不安定になると、その爆発プロセスは SN 1987A の観測データと定量的によく一致する。low-mode モデルは鉄族の最大最終速度 3300kms^{-1} 、He/H 境界における強い混合、水素の下降速度 500kms^{-1} 、イジェクタの縦横比 1.6 を示す。イジェクタの大きなスケールの非等方性や low-mode 不安定、Richtmyer-Meshkov 不安定性が SN1987A の観測結果を再現するのに必要である。