

SN 1987A の超新星爆発から超新星残骸へ至る進化の3次元流体数値実験

小野 勝臣 (理化学研究所)

利用カテゴリ XC-B

研究の背景 重力崩壊型超新星爆発はその爆発メカニズムは現在もよく分かっていない。通常、超新星は点状の光源としてしか観測されないため、爆発の詳細を知ることは難しい。他方、銀河系内の若い超新星残骸のいくつかはその空間的構造が観測から分かるものがある。ゆえに超新星爆発の形状やメカニズム、その超新星放出元素の空間分布から元素合成に対しても手がかりが得られると期待される。しかしながら、これまでの超新星残骸の理論研究は球対称を仮定した簡単な爆発モデルが用いられており、このような観測と直接比較できる空間3次元の理論的モデルが存在しない。

研究目的 本研究では共同研究として報告者が3次元の超新星爆発の流体数値計算を行い、Orlando氏(パレルモ天文台、イタリア)がその結果を初期条件として超新星残骸フェーズの3次元の流体計算とX線放射の評価を行う。研究対象となる天体SN 1987Aである。超新星1987Aの周辺には特徴的な三重のリング構造があり、最近の観測から中心の超新星放出物質の分布は極めて非球対称であることが分かっている。また、初期の超新星1987Aの鉄輝線の観測などからは超新星爆発の際の元素合成で作られた放射性元素 ^{56}Ni が星の外層まで運ばれていることが分かった。このことから星の中心付近で生成された ^{56}Ni を外層まで運ぶ物質混合が必要である。そのメカニズムとして流体不安定性の一種であるレイリー・テイラー不安定性や超新星爆発自体の非球対称性である可能性が考えられているがよく分かっていない。また、超新星1987Aの親星のモデルとしてこれまで単独進化シナリオに基づく親星モデルが用いられてきた。しかし、近年伴星進化シナリオによる超新星1987Aモデルが提唱されている。親星の密度構造は物質混合に大きな影響を与えると考えられる。そこで本研究では特に初期の鉄輝線の観測とX線の光度曲線を説明する3次元の理論モデルを構築すべく、爆発の非球対称性や親星モデルをパラメータとする3次元の超新星爆発の流体数値実験を行う。

具体的な計算方法 報告者は自身の先行研究において本研究と同じ天体について高解像度な2次元の流体数値実験を行なった [1, 2]。本研究ではそれを3次元計算に拡張する。計算に用いる流体の数値計算コードはFLASHである。この流体計算コードには核反応ネットワークが組み込まれており、元素合成と元素の移流を追うことができる。また適合格子最適化法 (AMR) によって必要な領域にのみ計算格子を細かく取ることができる。本研究では非常に幅広い時間的空間的スケール (衝撃波発生は 10^{7-8} cm, 親星の半径は 10^{12-13} cm) の範囲をカバーすることが必要なため、衝撃波が中心から外側に伝搬するのに合わせて適切に計算領域を徐々に広げる。超新星爆発は、計算開始時に計算領域の中心付近に熱エネルギーと運動エネルギーを注入することによって起こさせる。

その際に初期の動径速度を非球対称に分布させることによって非球対称な爆発モデルを構築する。今回は爆発の非球対称性と親星モデルをパラメータとする。親星モデルは、単独星進化シナリオによるものと伴星進化シナリオによるもの [3] を考慮する。Orlando 氏は報告者の計算結果を初期条件としてリング状の星周物質密度などを不定性の範囲内で仮定しやはり 3 次元の磁気流体計算を PLUTO コードを用いて行い、X 線放射を評価する。基本的な手法は Orlando 氏の先行研究 [4] に基づいている。

結果 本研究はまだ完成していないが、高解像度 1 次元および低解像度 3 次元の多くの計算を行った。図 1. に一例として元素分布を示す。報告者が行ったそれらの 3 次元の低解像度計算の結果を初期条件として Orlando 氏がやはり低解像度で現在の超新星 1987A の年齢である爆発から数十年程度までの 3 次元流体計算を行った。これらの結果から低解像度計算の結果であるが、超新星 1987A の初期の鉄輝線のドップラー速度の観測 (図 2. 参照) と X 線の光度曲線 (図 3. 参照) を上手く説明する親星モデルと爆発の非球対称性に関するパラメータが見つかった。また一連のモデル計算から以下のことが分かった。① 鉄輝線のドップラー速度を説明するには初期に上下非対称な bipolar 的速度分布が必要である。② X 線の初期の光度曲線は親星の密度構造に非常に敏感であり、爆発エネルギーや爆発の非球対称性にはあまり依らない。③ X 線の光度曲線はリングを含む星周物質の密度等の不定性の影響を受けるが、その不定性を考慮しても伴星進化シナリオに基づく親星モデルが最も良く光度曲線を説明する。

References

1. Mao, J., Ono, M., Nagataki, S., Hashimoto, M., Ito, H., Matsumoto, J., Dainotti, M. G., and Lee S.-H. 2015, ApJ, 808, 164
2. Ono, M., Nagataki, S., Ito, H., Lee, S.-H., Mao, J., Hashimoto, M., and Tolstov, A. 2013, ApJ, 773, 161
3. Urushibata, T., Takahashi, K., Umeda, H., and Yoshida, T. 2018, MNRAS, 473, L101
4. Orlando, S., Miceli, M., Pumo, M. L., and Bocchino, F. 2015, ApJ, 810, 168

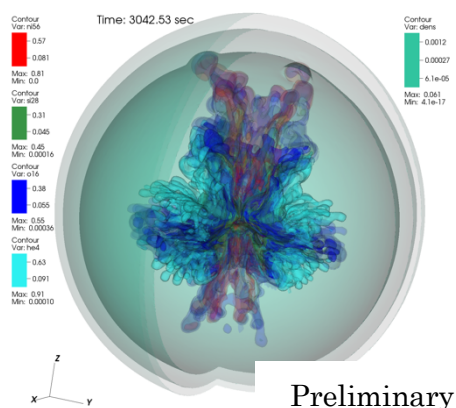


図 1. 代表的な元素 (^{56}Ni , ^{28}Si , ^{16}O , ^4He) の分布。各元素について質量比の等値面 (最大値の 10% と 70% の値) が示されている。色はそれぞれ ^{56}Ni :赤、 ^{28}Si :緑、 ^{16}O :青、 ^4He :水色。外側の青緑の等値面は密度である。

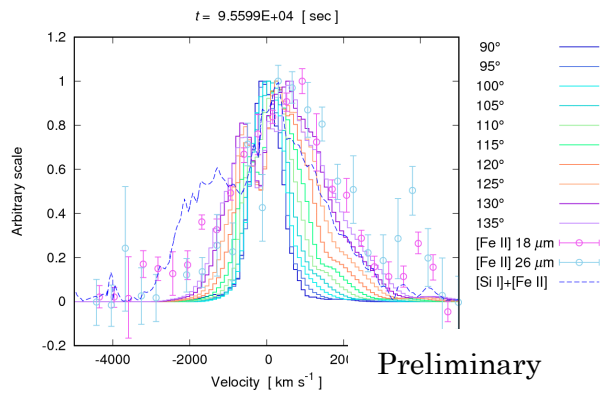


図2. 鉄輝線 [Fe II] の分布 (エラーバーがついた点) と 3次元の低解像度超新星爆発計算の結果から見積もった鉄輝線に対応する分布 (^{56}Ni の視線速度分布: 実線。色の違いは観測者の視線方向と bipolar 的爆発の方向がなす角度の違いを表す。)

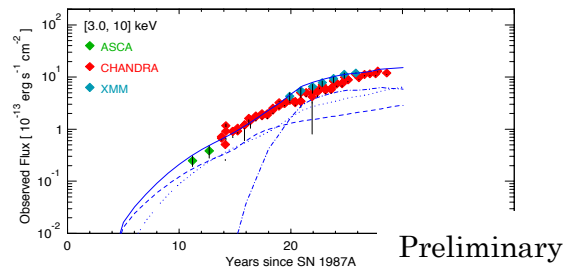
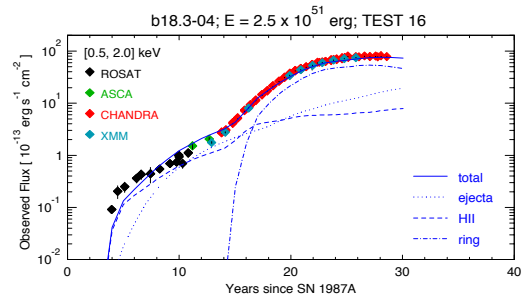


図3. 観測された X 線の光度曲線 (点) と 3次元の低解像度計算の結果から評価した X 線放射の光度曲線 (点線は各成分からの寄与。実線がそれらの合計)。