

課題名(タイトル):

超新星爆発から超新星残骸までの物質化学進化の解明

利用者氏名:

○小野 勝臣(1)

理研における所属研究室名:

(1) 研究開発本部 長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

本研究は(重力崩壊型の)超新星爆発から超新星残骸までの3次元の大規模な流体数値計算に基づいて、親星から超新星爆発、超新星残骸へ至る様々な物理過程を理論的に評価して観測との比較を行うことで関わる力学的、化学的進化を統一的に解明することを目的にここ数年継続して進めている国際共同研究の一環である。

研究の背景 重力崩壊型超新星爆発は大質量星がその進化の最後に起こす高エネルギー天体現象(およそ 10^{51} erg) である。しかし、そのメカニズムは 50 年にわたり未解明である。銀河系内での超新星爆発の頻度は 100 年に一回程度であり極稀である。一方、銀河系外で起きるものはその頻度は高いが、その距離の遠さから点状の光源(超新星)としてしか観測されない。そのため超新星の電磁波観測から爆発の詳細を直接的に知ることは難しい。他方、超新星爆発で生じた衝撃波が星間空間を伝搬し、掃き集めた物質を暖めて(爆発から数百年後に)主として X 線で輝く超新星残骸と呼ばれる天体はその空間的構造が観測で解像出来るものがある。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親星や爆発的元素合成の手がかりが得られると期待される。実際、本研究での対象天体である超新星 1987A (SN 1987A) や超新星残骸 Cassiopeia A (Cas A) の観測から、超新星放出物質が極めて非球対称であることが分かっている。しかしながら、これまでの超新星残骸の理論的研究においては、球対称を仮定した簡単な爆発モデルが用いられており(e.g. Orlando et al. 2015)、このような観測と直接比較できる理論的モデルが存在しない現状にあった。

研究目的 上記の背景を踏まえ、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、伊)がその結果を初期条件として更に超新星残骸フェーズの 3 次元の磁気流体計算と X 線放射の評価までを行う。今回、研究対象となる SN 1987A はその爆発由来のニュートリノをカミオカンデで初検出したことで小柴氏のノーベル賞に繋がった重要な天体である。現在爆発から 30 年が経ち若い超新星残骸のフェーズに入ってきたことで、超新星放出物質の空間的構造が観測で捉えられるようになってきた。その形状は明らかに非球対称であるがその理由は分かっていない。また、超新星 1987A の周辺には三重のリング構造をした星周物質(親星が進化の過程で放出した恒星風によると考えられている)があり、何故そのような非球対称な構造をしているのか不明である。これは親星の形成シナリオに関わると考えられる。

他方、SN 1987A の爆発から初期の(約 400 日)鉄輝線 [Fe II] の観測 (Haas et al. 1990) から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。これは星の中心付近で生成された ^{56}Ni を外層まで運ぶ何らかのメカニズム(“物質混合”)が必要であることを意味する。超新星爆発自体の非球対称性やレイリー・テイラー不安定性に代表される流体不安定性が考えられているが解明されていない。このように超新星残骸、更に時間を遡って超新星爆発や親星の成り立ちを解明するには、現実的な親星モデル、超新星爆発モデルから出発した空間 3 次元の超新星残骸の理論モデルが必要不可欠である。そこで本研究では、爆発の非球対称性や親星モデルが異なる 3 次元の大規模な流体数値実験を行い、現在の超新星 1987A 残骸の観測と比較して議論する。特に最近のアルマ望遠鏡の 1987A の観測から CO および SiO 分子の回転遷移線の空間分布が初めて観測された (Abellán et al. 2017)。超新星放出物質の形状や、超新星における分子・ダスト(宇宙塵)形成を理解する上で非常に重要な手がかり

となる。本研究ではこれらの観測を検証する理論的研究の第一歩として3次元の流体数値計算の結果に基づいた超新星放出物質における分子形成計算も行う。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3次元の流体数値計算 報告者は自身の先行研究において高解像度な2次元の流体数値実験を行なった。本研究ではその手法を踏襲し3次元に拡張した計算を行う。計算に用いる数値計算は公開の流体の並列計算コード (FLASH) をベースに必要な修正を加えて行う。この流体計算コードには小規模な核反応ネットワークが組み込まれており、 ^{56}Ni を含む爆発的要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割り当てることが出来る。本研究では非常に幅広い時間的空間的スケールの範囲をカバーすることが必要なため (空間で 10^6 桁の違い)、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非球対称に注入することによって非球対称な爆発モデルを構築する。爆発の運動エネルギーに対しては観測からの制限があるためパラメータとはなり得ない。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。特に親星モデルは既存の単独星進化シナリオによるものが用いられてきたが、近年、SN 1987A の親星の形成シナリオとして、伴星の合体進化シナリオが提唱されている。既存の単独星進化の親星モデル3つと最近になって共同研究者である梅田氏 (東大)、吉田氏 (東大) の恒星進化の理論グループによって発表された (Urushibata et al. 2018) 伴星進化シナリオに基づく親星モデルをこの分野の研究で初めて考慮する。

分子形成計算 超新星 1987A における CO および SiO 分子の観測報告を受け、報告者のグループはダストの形成の専門家である野沢氏 (国立天文台) との分子およびダスト形成計算を行う計画をスタートさせた。ファーストステップとして、報告者が行った超新星爆発の3次元の流体計算の結果 (爆発から1日後) を用いて、超新星放出物質領域にテスト粒子を分布させ、各粒子のラグランジュ的な温度と密度の時間発展にべき則を仮定することで、各テスト粒子に対して分子反応ネットワーク計算を行う。解くべき方程式は核反応ネットワークと同じであるため、反応率の部分分子

反応に対応するものに適切に置き換えた。

3. 結果 ※ 以下 [] の数字は成果リストの通し番号

超新星爆発における物質混合の一つの証拠となった観測として初期の鉄輝線 [Fe II] (鉄は超新星爆発の際の爆発的要素合成で生成された放射性元素 ^{56}Ni の崩壊物質) の観測があり、それによって輝線のドップラー速度の分布が得られている (Haas et al. 1990)。この分布には超新星爆発の非球対称性や物質混合が反映されていると考えられることから、これに対応する ^{56}Ni の視線速度分布と上記の鉄輝線の観測との一致は、超新星爆発モデルが妥当であるかどうかの重要な指標である。報告者は超新星爆発の非球対称性や親星モデルを様々に変えた計算を行い、次のようなことが分かった [1]。どのような爆発形状であっても、既存の単独星の親星モデルを用いた計算では鉄輝線の観測を満足に説明するモデルは得られなかった。他方、伴星進化シナリオに基づく親星モデルを用いた計算 (図 1 参照) で上記の鉄輝線の観測をよく再現することが分かった (図 2 参照)。このことから、SN 1987A の親星が伴星進化したことを支持する [1]。

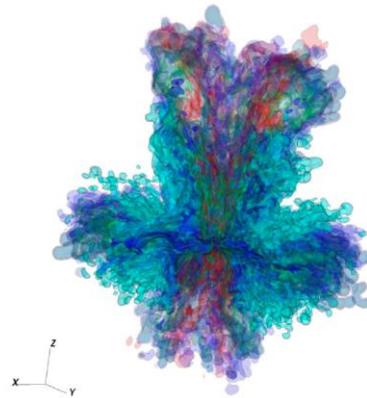


図 1. 超新星衝撃波が親星の表面を貫通した直後の代表的な元素の分布 (赤: ^{56}Ni , 緑: ^{28}Si , 青: ^{16}O , 水色: ^4He)。Web ブラウザ上で操作可能な 3D モデル (Sketchfab) が以下からアクセス出来る (<https://skfb.ly/6OZDu>)。

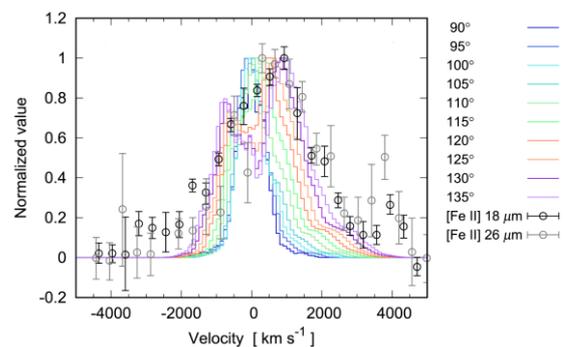


図 2. ^{56}Ni の視線速度分布 (実線) と鉄輝線 [Fe II] の観

測 (エラーバーがついた点)との比較。色の違いは観測者の視線方向と bipolar 的爆発の軸の方向がなす角度の違いを表す。

上記の鉄輝線の観測をよく説明する爆発モデルの結果を初期条件として、Orlando 氏が更に 3 次元の磁気流体計算を行い、爆発から 50 年後まで追った [2]。更に、3 次元の磁気流体計算の結果から X 線放射を評価し、超新星 1987A の X 線の光度曲線とイメージの観測と比較した [2]。比較のため、爆発に関連するパラメータは変えずに親星モデルのみを既存の単独星進化モデルに置き換えた超新星爆発計算結果を初期条件とした計算も行い両者を比較した。その結果、X 線の光度曲線においても、伴星進化シナリオによる親星モデルに基づいた爆発モデルが光度曲線とイメージの観測を共によく再現出来ること分かった (図 3 参照)。

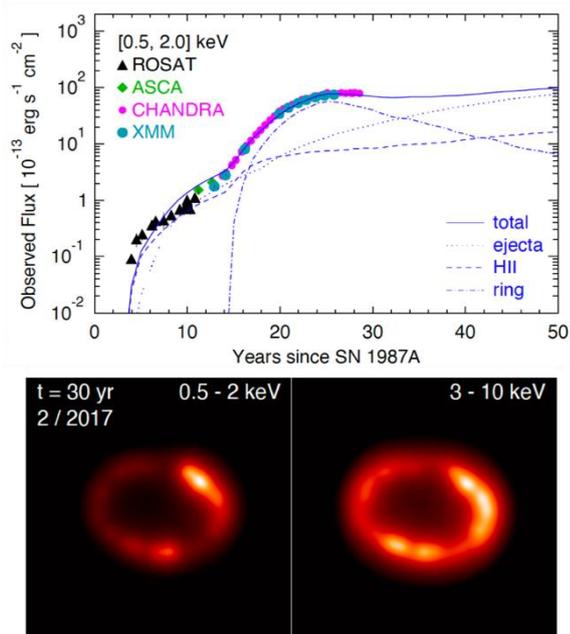


図 3. (上) 評価した X 線の光度曲線 (線) と観測 (点) の比較。異なる点線は各成分からの寄与、実線はそれらの合計である。(下) 爆発から約 30 年後に対応する計算から評価した X 線放射のイメージ。左右の違いは異なるエネルギーバンドを表す。

更に、上記で最も成功した超新星爆発モデル [1] の計算結果に基づき、その後の超新星放出物質の温度・密度の時間発展としてべき則を仮定することで分子反応ネットワーク計算を行った。SN 1987A の CO と SiO 分子の空間分布の観測との比較を行った。観測では、CO 分子の分布は SiO 分子のそれと比べてより外側に分布し、かつリング状の構造が確認できることが報告されている。本研究にお

けるベストモデルにおいても、定性的にはそのようなリング状の分布が確認された (図 4 参照)。これは超新星爆発が大局的に bipolar な爆発であったことを反映していると考えられる。分子形成計算に関してはまだプレリミナーな結果であるが、国際会議等 [4,5,6,7,8,9] で報告し、一つの会議の収録の掲載許可を得た [3]。

4. まとめ

SN 1987A の超新星爆発から超新星残骸までの進化の 3 次元の大規模な流体数値計算を一貫して行い、種々の観測との比較をすることで、観測を説明する超新星爆発の形状や親星の進化シナリオを調べた。その結果、SN 1987A の親星は伴星進化の過程で超新星爆発を起こす前に伴星同士が合体したものであること。大局的には bipolar 的な爆発であったと考えられる。また、3 次元の超新星爆発モデルに基づく分子形成計算を初めて行い、観測された CO および SiO 分布に見られる定性的な特徴を今回のモデルで説明できることを示した。

5. 今後の計画・展望

最近のアルマ望遠鏡の SN 1987A の追観測 (Cigan et al. 2019) から、CO および SiO 分子に加えて、ダスト放射の分布も詳細に分かりつつある。超新星はダストの主要な起源の一つと考えられているが、理論的に本当に超新星が起源となり得るか分かっていない。その理由には、ダストの形成メカニズムもまだよく分かっておらず、仮に超新星放出物質で生成されたとしても、超新星残骸フェーズで発生する逆行衝撃波によってその一部は破壊されると考えられている (Nozawa et al. 2010)。しかしながら、これまでのダストの理論計算のほとんどは 1 次元の流体計算に基づいたものであった。ダストや分子形成は密度と温度の関数に非常に敏感であり、1 次元では考慮できない非球対称性やクランプ構造の存在が大きく影響を与える可能性がある。今後、ダスト形成理論の専門家である野沢氏 (国立天文台) と超新星残骸フェーズまでの 3 次元流体計算の結果 [2] に基づいたダスト形成計算を行う予定である。

6. 利用がなかった場合の理由

本年度は前年度までに主として得られた結果の詳細な解析や、それによって得られた成果を論文として報告することに集中する必要が生じたため、HOKUSAI を用いた追加の大規模計算は行わなかった。

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- [1] “Matter Mixing in Aspherical Core-collapse Supernovae: Three-dimensional Simulations with Single Star and Binary Merger Progenitor Models for SN 1987A”, M. Ono, S. Nagataki, G. Ferrand, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, S. Orlando, and M. Miceli, *The Astrophysical Journal*, Vol. 888 (2020) article id. 111 (40 pp.)
- [2] “Hydrodynamic simulations unravel the progenitor-supernova-remnant connection in SN 1987A”, S. Orlando, M. Ono, M. Miceli, S. Nagataki, H. Umeda, G. Ferrand, F. Bocchino, O. Petruk, G. Peres, K. Takahashi, and T. Yoshida (11), accepted for publication in *Astronomy & Astrophysics* (arXiv:1912.03070)

【会議の予稿集】

- [3] “Three-dimensional simulations from supernovae to their supernova remnants: the dynamical and chemical evolution of Supernova 1987A”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, and G. Ferrand, *The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15)*, accepted for publication in *JPS Conference Proceedings* (記載なし: ページ数の制限のため謝辞を記載するスペースがなかったため)

【口頭発表】 (記載なし: 時間の制限のため発表スライドには謝辞を記載していなかった)

- [4] (Keynote talk) “Three-dimensional simulations of SN 1987A: nucleosynthesis, X-ray emission, and molecule formation”, M. Ono, Collaborative Meeting on Supernova Remnants between Japan and USA, Wako, RIKEN, Japan, November 8, 2019
- [5] “Three-dimensional simulations from supernovae to their supernova remnants: nucleosynthesis and molecule formation in the supernova ejecta of SN 1987A”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, G. Press, and G. Ferrand (12), *Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4M-COCOS)*, Fukuoka University, Japan, October 21, 2019
- [6] (Invited talk) “Three-dimensional simulations of supernova 1987A: nucleosynthesis and molecule formation in the supernova ejecta”, M. Ono, *The 1st r-EMU symposium*, Wako, RIKEN, Japan, August 2, 2019
- [7] “Three-dimensional simulations from supernovae to their supernova remnants: the dynamical and chemical evolution of SN 1987A”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, and G. Ferrand, *The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15)*, YITP, Kyoto University, Japan, July 4, 2019
- [8] (Invited talk) “3D numerical modeling from supernovae to their supernova remnants: the dynamical and chemical evolution for the case of SN 1987A”, M. Ono, *Colloquium at Institute of Astronomy*, Institute of Astronomy, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, April 12, 2019

- [9] (Invited talk) “Evolution from supernovae to their supernova remnants: 3D numerical modeling for the case of SN 1987A”, M. Ono, Mini-workshop on massive stars, core-collapse supernovae, and nucleosynthesis, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, April 9, 2019

【ポスター発表】

- [10] “3D Simulation of Supernova Explosions Toward Understanding the Evolution from Supernovae to Their Remnants”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagasaki, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, and G. Ferrand, 第6回「京」を中核とするHPCI システム利用研究課題 成果報告会, THE GRAND HALL (東京・品川), 2019 年11 月1 日