

課題名(タイトル):

## 超新星爆発から超新星残骸への進化の統一的理解

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

**研究の背景** 重力崩壊型超新星爆発は宇宙で起こる最もエネルギーが高い爆発的天体現象の一つである。しかしそのメカニズムはよく分かっていない。我々の銀河系内で超新星爆発が起きる頻度は数 100 年に一度程度と低く、銀河系外で起きるものは観測される頻度は高まる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。そのため超新星の観測から爆発の詳細を知ることが難しい。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されているものがある。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要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、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る。

**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い、超新星爆発から超新星残骸まで一貫した3次元の流体数値計算に基づく理論的研究を行う。今回、研究対象となる天体は超新星 1987A である。この超新星はその爆発由来のニュートリノをカムイオカンデで初検出したことで小柴氏のノーベル賞受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球対称から逸脱してい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があり、親星が進化の過程で放出した恒星風によるものと思われるが、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も関わる謎である。加えて、爆発から約 400 日後の観測から超新星爆発の際の元素合成で作られた放射性元素  $^{56}\text{Ni}$  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  $^{56}\text{Ni}$  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自体、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、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。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コードは FLASH と呼ばれる流体の並列計算コード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、主要な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、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。観測から超新星爆発の運動エネルギーに対してある程度の制限があるため主なモデル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モデル空間とするこれまで、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、超新星 1987A の親星の形成シナリオとして、伴星進化シナリオが提唱されている。既存の単独進化の親星モデル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伴星進化シナリオに基づく親星モデルを考慮する。

**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）を共同研究者として迎え入れ、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った。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、反応率の部分を分子反応に対応するものに適切に置き換えた。

### 3. 結果

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爆発 400 日後の鉄輝線 [Fe II] (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である  $^{56}\text{Ni}$  が崩壊したもの) 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。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  $^{56}\text{Ni}$  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となる。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低解像度計算を行い、その中で観測と最も合うモデルの高解像度計算を行うことで次のようなことが分かった。

どのような爆発形状であっても、既存の親星モデルを用いた計算では鉄輝線の観測を十分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では上記の観測をよく再現する爆発形状があることが分かった (図 1 参照)。このことから、特に 親星の密度構造は超新星爆発における物質混合へ影響を与える大きな因子であることが分かった。

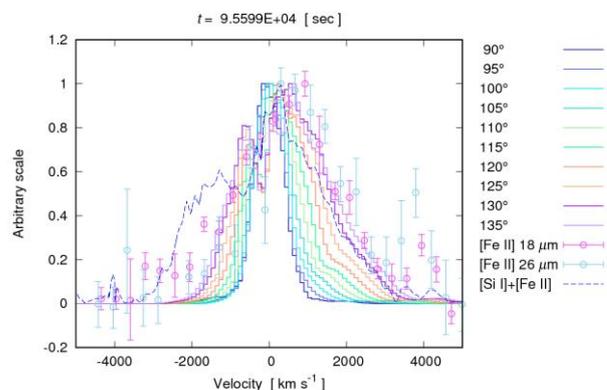


図 1.  $^{56}\text{Ni}$  の視線速度分布 (実線) と鉄輝線 [Fe II] の観測 (エラーバーがついた点) との比較。(色の違いは観測者の視線方向と bipolar 的爆発の軸の方向が異なる角度の違いを表す。)

上記の鉄輝線の観測をよく説明する超新星爆発計算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 (現在は爆発から約 30 年たったところ) 程度まで追った。比較のために、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。Orlando 氏は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 線の光度曲線の観測と比較し議論した。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計算の方が観測をよく説明することが分かった (図 2 参照)。このことから、超新星 1987A の親星の形成シナリオとして伴星進化シナリオが支持されると言える。このような違いが生まれる原因とし

ては、進化シナリオの違いによって親星の密度構造が大きく異なることが物質混合等に影響を与えるためだと考えられる。

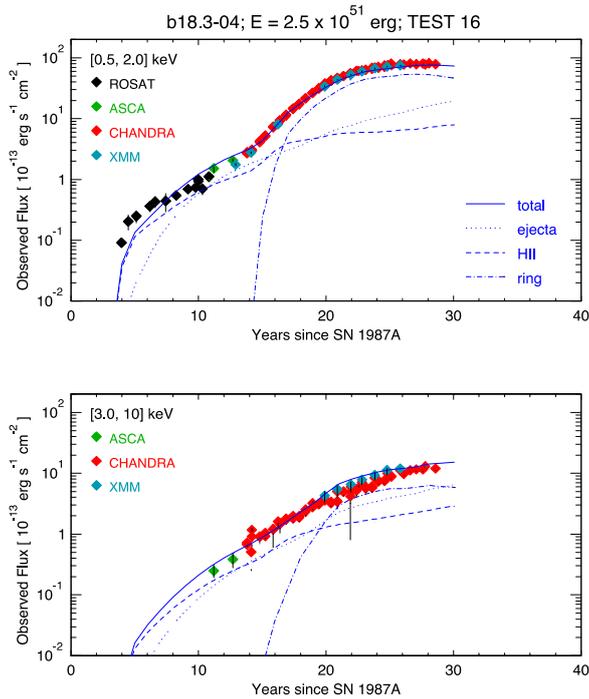


図 2. 観測された X 線の光度曲線（点）と 3 次元の低解像度超新星爆発計算の結果から評価した X 線放射の光度曲線（点線は各成分からの寄与。実線がそれらの合計）。

上記で最も成功した超新星爆発モデルの計算結果に基づいて分子反応ネットワーク計算を行い、超新星 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、そのようなリング状の分布が確認され（図 3 参照）、これは超新星爆発が大局的に bipolar な爆発であることに起因することが分かった。これまで 3 次元の流体計算による超新星爆発モデルに基づく分子形成の理論的研究は世界でも報告例がなく画期的な成果と言える。

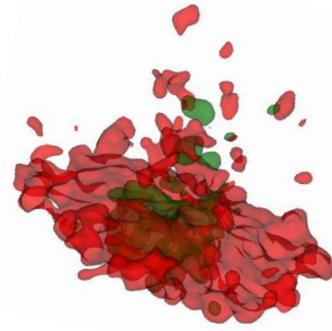


図 3. 分子反応ネットワーク計算の結果。赤は CO 分子の分布。緑は SiO 分子の分布を表す。

#### 4. まとめ

世界で初めて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、超新星爆発の形状や物質混合が反映されていると考えられる種々の観測との比較を行った。その結果、観測をよく説明する親星モデルと超新星爆発の非球対称性を発見し、そのことから超新星 1987A の親星の形成シナリオ、超新星爆発の形状について議論を行った。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 分布に対してそのような分布となる一つの解釈を与えた。

#### 5. 今後の計画・展望

近年の観測から超新星 1987A の超新星放出物質の内部でダストが多量に生成されている証拠が見つかった。ダストの形成メカニズムもまだよく分かっておらず、これまで 1 次元の流体計算に基づいたダストの理論計算しか行われていなかった。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 3 次元流体計算に基づいたダスト形成計算を行う予定である。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

(招待講演) “3D numerical modeling of SN 1987A: the dynamical and chemical evolution from the supernova to the supernova remnant”, M. Ono, Workshop on “Physics at HIAF High-Energy Beam Lines”, Beihang University, China, December 15, 2018

“3D numerical modeling of SN 1987A: the evolution from the explosion to the supernova remnant, nucleosynthesis, and molecule formation inside the ejecta”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, and G. Peres, An informal SN/SNR workshop, “SUURI-KOOL” office, Maskawa Building, Kyoto University, Japan, July 25, 2018

(招待講演) “SN 1987A における核合成から分子形成まで”, 小野勝臣, 核宇宙インフォーマル勉強会, 理化学研究所, 仁科ホール, 2018 年 4 月 25 日

**【ポスター発表】**

“3D numerical modeling of SN 1987A: the evolution from the explosion to the supernova remnant”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagatak, H. Umeda, T. Yoshida, O. Petruk, G. Peres, Physics of Core-collapse Supernovae and Compact Star Formation, Waseda University, Japan, March 19-21, 2018