

課題名(タイトル):

3次元流体数値計算に基づく超新星爆発から超新星残骸までの物理化学進化の解明

利用者氏名:

○小野勝臣(1)

理研における所属研究室名:

(1) 開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係

概要 本課題は重力崩壊型超新星の爆発から超新星残骸へ至るまでの進化を 3 次元流体数値実験に基づいて関連付け、超新星や超新星残骸観測との比較から、直接的に情報を得る事が難しい親星や爆発初期の物理過程を解明するための国際共同研究プロジェクトの一環である。本課題では ALMA や最新の JWST 観測によって捉えられた超新星放出物質中の分子ガス、鉄分布等を説明することが目的である。

研究の背景 超新星 1987A (SN 1987A) は近傍で発見された最後の重力崩壊型の超新星であり、爆発から 37 年以上経過した現在、若い超新星残骸とみなされる時期に入った。発見から現在まで多くの観測が継続されており、超新星放出物質の最深部が空間的に解像されていることから、重力型超新星の爆発から超新星残骸の初期段階までの進化を解明するのに適した唯一無二の天体である。しかしながら、重力波やニュートリノシグナルを除いては、超新星からの電磁波放射でまだ光学的に見通せない爆発初期の情報を直接的に得ることは出来ない。爆発初期の情報を得るには爆発初期から超新星残骸までの進化を繋いだ理論モデルが必要不可欠である。後述のように超新星放出物質の 3 次元空間分布が明らかになっていることから、爆発から超新星残骸までの一貫した 3 次元モデルの構築が望ましい。

報告者らはこれまでに、現実的親星モデルを初期条件として用いた爆発形状をパラメタライズした、超新星爆発から超新星衝撃波が親星表面を貫通 (shock breakout) するまでの 3 次元流体計算 (Ono et al. 2020)、それを初期条件として更なる進化を爆発から数十年まで追った 3 次元磁気流体計算 (Orlando et al. 2020) を行なった。その結果、超新星衝撃が親星の内部を伝搬する過程で物質混合が起こっている証拠と考えられる初期の鉄輝線 [Fe II] 観測 (Haas et al. 1990) や超新星残骸フェーズの X 線放射観測 (e.g. Frank et al. 2016) を上手く

説明可能なモデルを発見した (Ono et al. 2020; Orlando et al. 2020)。また、このことから、SN 1987A の親星は、SN 1987A nebula で発見されている三重リング構造形成に有利である伴星合体で出来たこと、爆発は非対称な bipolar 的であったことなどが示唆された。これらの成功を受け、得られた 3 次元モデルに基づいた X 線吸収を加味した X 線スペクトル解析から、未だ直接的に発見されていない、SN 1987A の中性子星からの非熱的放射の存在を示唆した (Greco et al. 2021; 2022)。同 3 次元モデルと中性子星の熱的進化モデルを用いて、将来の X 線観測 (Lynx) を用いた中性子星特性の制限についても議論した (Dohi et al. 2023)。3 次元モデルに基づいたスペクトルモデルから、エネルギー分解能の高い XRISM によってまもなく得られる X 線輝線観測が、超新星放出物質と星間物質を区別したダイナミクス診断に有用であることを示した (Sapienza et al. 2024)。

近年の ALMA による観測から、SN 1987A の放出物質内部の CO, SiO 分子の 3 次元分布が超新星としては初めて得られた (Abellán et al. 2017; 図 1 参照)。特に、CO がリング状に分布していることなどから、爆発の非球対称性や物質混合の結果を反映していると考えられるが、これらが分子ガスの形成に与える影響は知られていない。本課題では、上述の 3 次元モデルに基づいた分子形成計算を行い、これを調べる。

最新の JWST による赤外観測 (Larsson et al. 2023) から、超新星放出物質最深部にある鉄が broken dipole 状に分布している事が明らかになった。上述までのモデルでは説明が難しい特徴であり、3 次元モデルの再考が必要である、本課題の後半で、3 次元モデルの改善に取り組む (現在遂行中)。

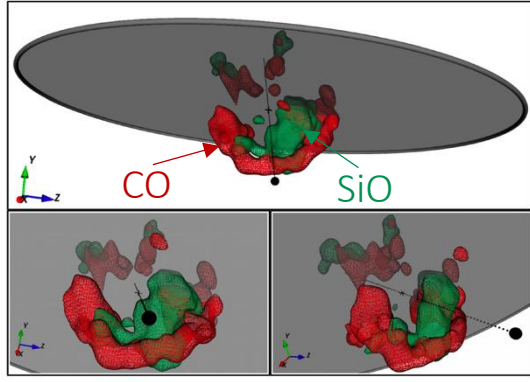


図 1: ALMA が捉えた SN 1987A 超新星放出物質中の CO (赤), SiO (緑) 分子ガスの分布 (Abellán et al. 2017 より抜粋)。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3 次元モデルに基づいた分子形成計算 上述の 3 次元流体計算モデル (Ono et al. 2020) の最後のスナップショット (図 2 参照) から、動径方向の各物理量の 1 次元プロファイルを構築する。角度方向に平均化したプロファイルや、特定の方向のプロファイルを抽出することで、物質混合や爆発の非球対称性を実行的に考慮する。得られた 1 次元プロファイルを初期条件として 1 次元の流体計算を球対称の仮定の下に行い、分子計算に必要な温度と密度の時間発展の爆発から約 1 万日程度までの流体モデルを得る。分子形成計算はラグランジュ的描像の仮想流体粒子に対して行う。上記の流体モデルの計算領域にテスト粒子を分布させ、流体の時間発展と共に移動する粒子の位置及び各物理量を流体計算の各スナップショットの内挿から得る。

本研究課題のため、分子反応計算のための分子反応ネットワークを構築した。CO, SiO を含む 24 種の二原子分子、分子の種となる 11 種の原子、その他、分子及び原子が一階電離したイオン、電子の計 75 種を考慮した。分子反応率は UMIST データベース (<https://umistdatabase.uk/>) 及び関連文献から上記 75 種が関わる反応を可能な限り採用した。分子反応率は温度に敏感なため、温度進化に影響を与え得る以下の二つの効果を考慮する。一つは超新星放出物質に含まれる放射性元素 ^{56}Ni ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$) の崩壊ガンマ線がガスを加熱する効果。もう一つは CO 分子の回転振動遷移に伴うガスの冷却である。二つの効果は分子形成計算と同時に上記の流体計算から得られた温度の二つの効果による修正を加えながら解く。前者に関連して、 ^{56}Ni (^{56}Co) の崩壊ガンマ線に起因する高エネルギー電子による原子や分子の電離、分子の破壊の効果

も考慮してある。これらの効果の取り扱いについては先行研究 (Liu & Dalgarno 1995; Cherchneff & Dwek 2009) を参考に導入した。各テスト粒子についてそれぞれ分子計算を行い、物質混合や非球対称爆発の分子形成の影響を調べる。

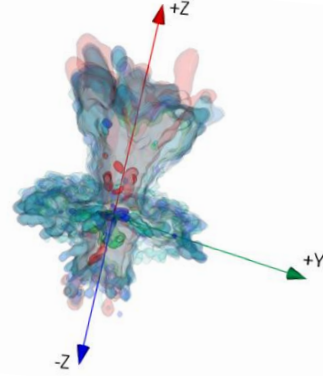


図 2: 3 次元超新星爆発モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111) から得られた超新星放出物質中の元素の空間分布。 ^{56}Ni (赤), ^{28}Si (緑), ^{16}O (青), ^{12}C (水色)。(Ono et al. 2024, ApJS, 271, 33 から抜粋)。

3 次元流体モデルの再考 上述のように最新の JWST 観測が明らかにした鉄の分布は、既存モデルでは説明出来ない特徴を持つ。また、既存の 3 次元モデル (Ono et al. 2020) で鉄輝線 [Fe II] (Haas et al. 1990) をそれまでの先行研究より上手く説明したが、まだ説明しきれていない部分があった。具体的には約 $4,000 \text{ km s}^{-1}$ のドップラー速度で赤方偏移側と青方偏移側の両方に孤立して存在していると考えられる鉄成分である。JWST 観測と合わせて、より極端な非球対称爆発やより複雑な爆発形状が必要と考えられる。Ono et al. 2020 では、計算開始時に非対称な bipolar 的爆発が得られるよう、初期の熱エネルギーと運動エネルギー分布を人工的に与えた。今回、星の中心付近の実行的境界条件領域にエネルギー、運動量、質量流速を有限時間境界条件として与えることで爆発を誘発する。この際、各流速を与える領域や流速値を角度依存させ、パラメータ化することで、前回と比べ、より複雑かつ極端な爆発が、より自然な仮定の下で可能となる。

3. 結果

分子形成計算の結果 本解題の結果は雑誌掲載済み (Ono et al. 2024, ApJS, 271, 33; 研究成果リスト参照) である。計算の結果から得られた主要な結論を以下に挙げる。爆発の非球対称性および物質混合の影響から、分子形成が開始される以前の超新星放出物質中の種原子と放射性元素 ^{56}Ni の分布が球対称の場合と比べて大きく異なる。総

じて、完全な球対称ではほとんど共存しない水素やヘリウムと CO や SiO 分子の種となる原子が共存することから H^+ , He^+ が CO, SiO と反応して CO, SiO が破壊される反応が起きる。また球対称の場合と比べ、 ^{56}Ni が炭素や酸素が存在する外層にまで侵入している影響で、 ^{56}Ni (実質的には ^{56}Co) の崩壊に伴う高エネルギー電子 (コンプトン電子) による電離や分子の破壊が起きやすい。また ^{56}Ni は bipolar 的爆発の軸方向に集中して存在するので、軸方向と赤道面方向で温度進化が大きく異なる。軸方向では、崩壊熱によってガスが加熱されるため、分子形成が始まるのに必要な温度 (10^4 K) にまで冷却するのに時間がかかる。結果的に分子形成開始が遅れ、その間に密度が下がるために分子形成が効率良く進まない。赤道面方向ではその逆に分子形成が効率的に起きる。このような爆発に伴う bipolar 的な非球対称性のため、軸上では CO 分子の形成が特に抑えられ、ALMA で観測された CO, SiO 分子の 3 次元的空間分布 (Abellán et al. 2017) が示唆する CO 分子のリング状の分布や、SiO 分子が CO のリングに取り囲まれている状況と定性的に矛盾しないことが分かった。以下に一例として、3 次元モデルを角度方向に平均化することで得られた 1 次元プロファイルに基づいて得られた分子形成計算の結果 (各分子の総量の時間発展) を示す (図 3 参照)。爆発から数百日で CO, 特に SiO 分子の減少が見られるが、これは主として ^{56}Co 崩壊に伴うコンプトン電子による破壊の影響である。

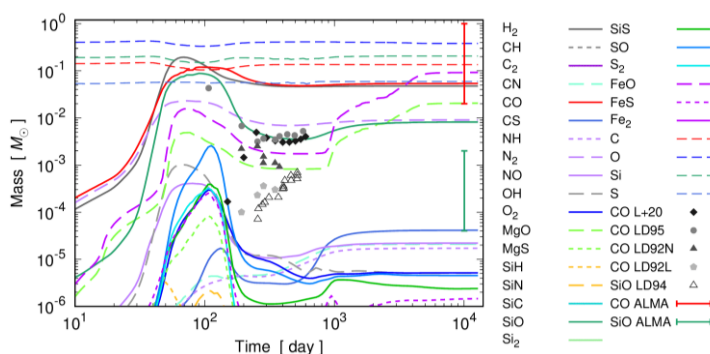


図 3: 各分子の総量の時間発展。CO (赤), SiO (緑)。点は観測より先行研究によって見積もられた CO と SiO 分子の量。時間は爆発からの経過時間。(Ono et al. 2024, ApJS, 271, 33 より抜粋)。

再考した 3 次元流体計算の結果 現在進行中のため、プレリナリーな結果を短く紹介する。最新の JWST 観測 (Larsson et al. 2023) によって明らかになった鉄 (主として ^{56}Fe : ^{56}Ni の崩壊核) の broken dipole 的分布を参考に、比較的オープンアングルの大きい非対称な bipolar 的

流速を与えた成分と、上下で折れ曲がりのある小さいオープンアングルの流速成分を組み合わせた爆発をパラメタライズして計算を行なっている。上述のように既存 3 次元モデル (Ono et al. 2020) では初期の鉄輝線 [Fe II] の観測 (Haas et al. 1990) の説明に不十分な点があった。その問題点を改善することを目標に現在パラメータサーベイを行なっている。以下に計算結果の一例を紹介する。次に示す図 (図 4) は計算開始初期の密度分布の 2 次元スライスである。上述の 2 成分を組み合わせて実現した爆発が確認できる。

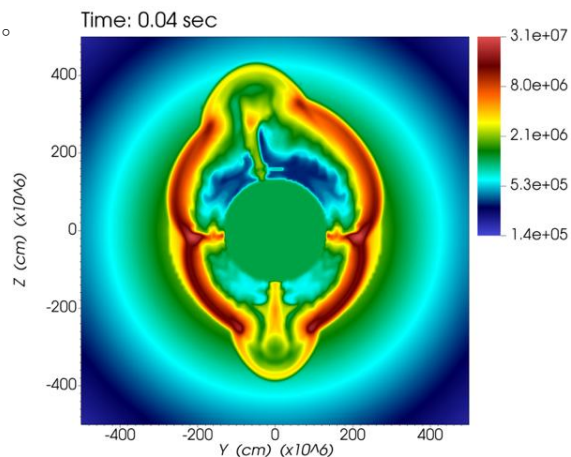


図 4: 密度分布の 2 次元スライス。

以下に鉄輝線観測との比較も示す (図 5)。

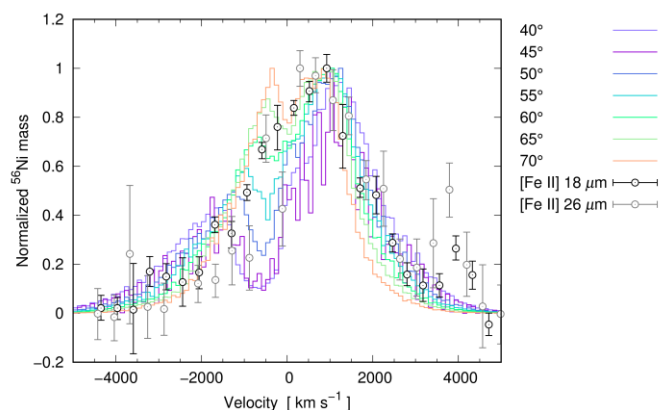


図 5: 鉄輝線 [Fe II] 観測 (Haas et al. 1990) と対応する ^{56}Ni 質量のドップラー速度分布の比較。エラーバーのついた点が観測。実線は計算結果で色の違いは viewing angle の違い。

4. 今後の計画・展望

分子形成計算については、今回 1 次元プロファイルに基づいた計算であったが、3 次元モデルへの直接的な適応、よく分かっていないダスト形成を念頭においた化学反応計算の拡張を行う。3 次元流体モデルの再考については、鉄輝線観測や JWST 観測を上手く説明出来るモデルから、爆発メカニズムに何らかの (ニュートリノ加熱優勢か磁気回転駆動優勢かなど) 示唆を与えたい。

2024 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

“The impact of effective matter mixing based on three-dimensional hydrodynamical models on the molecule formation in the ejecta of SN 1987A”, M. Ono, T. Nozawa, S. Nagataki, A. Kozyreva, S. Orlando, M. Miceli, K.-J. Chen, The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 271 (2024) article id. 33 (57 pp.)

【口頭発表】

※ 以下、口頭発表においては時間の都合上、謝辞省略のため、HOKUSAI 利用の記載なし

“Evolution of core-collapse supernovae from explosion to supernova remnant: The case of SN 1987”, M. Ono, Theories of Astrophysical Big Bangs 2025, RIKEN, Japan, February 19, 2025 (招待講演)

“Long-term evolution of core-collapse supernovae based on 3D hydrodynamics: understanding the explosion mechanism, neutron star, and molecular formation”, M. Ono, Colloquium at Institute of Astronomy, National Central University, Taiwan, March 29, 2024 (招待講演)

“Impact of effective matter mixing on molecule formation in the ejecta of SN 1987A based on 3D hydrodynamical models”, M. Ono, T. Nozawa, S. Nagataki, A. Kozyreva, S. Orlando, M. Miceli, and K.-J. Chen, TPS2024, National Central University, Taiwan, January 26, 2024

“Three-dimensional simulations of core-collapse supernovae from the explosion to supernova remnant toward elucidating the explosion mechanism, neutron star, and chemical evolution”, M. Ono, High Energy Theory Group Seminar, Institute of Physics, Academia Sinica (ASIOP), Taiwan, December 1, 2023 (招待講演; 昨年度未報告分)

【ポスター発表】

“Molecular formation in the ejecta of SN 1987A based on three-dimensional hydrodynamical models”, M. Ono, T. Nozawa, S. Nagataki, A. Kozyreva, S. Orlando, M. Miceli, and K.-J. Chen, Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death III, Chania, Crete, Greece, June 9–15, 2024

【その他(著書、プレスリリースなど)】

“Unveiling the physics of molecular formation in supernova remnant of SN 1987A”, ASIAA Science Highlights, Academia Sinica, Institute of Astronomy & Astrophysics (ASIAA), Taiwan, February 1, 2024 (プレスリリース) (https://press.asiaa.sinica.edu.tw/ASIAA_TAIWAN_News/240201) (プレスリリースのフォーマットの都合上 HOKUSAI 利用の記載なし)