

プロジェクト名(タイトル): 親星から超新星爆発—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. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

概要 本プロジェクトは重力崩壊型超新星の爆発から超新星残骸へ至る進化と関わる物理過程を 3 次元流体数値実験に基づいて解明するための国際共同研究の一環である。本課題ではあまりよく分かっていない、超新星放出物質中で起こる分子形成、ダスト形成を現実的な 3 次元モデルに基づき解明することが目的である。

研究の背景 重力崩壊型超新星爆発のメカニズムは 50 年来の未解明問題であるが、これまでのところ原始中性子星からのニュートリノ放射による遅延加熱が標準的な爆発メカニズムと考えられており、上記メカニズムが働くには定在衝撃波不安定性や対流などの多次元効果が必要不可欠であると考えられている。また、頻度は稀と考えられているが、親星が速く回転しかつ重力崩壊時の磁場がある程度強い場合は磁気流体力学的効果により、ジェット状の爆発を起こすことが理論的に知られている。一方、比較的近傍の空間的に解像された超新星残骸、例えば近傍の超新星 1987A (SN 1987A) や Cassiopeia A の観測から、超新星残骸が著しい非球対称構造を持っていることが示されている。しかし、衝撃波が親星を伝播する間に起こりうる流体不安定性等に起因する物質混合などにより、どのように爆発が超新星残骸へと繋がるのか自明でない。そこで、流体数値実験による 3 次元の超新星爆発モデル、そしてそれを更なる 3 次元の流体数値実験で超新星残骸のフェーズまで繋ぎ、爆発から超新星残骸へ至る進化と関わる物理過程を解明することを目的として本プロジェクトが開始された。

報告者らは本プロジェクトの初期成果として、SN 1987A (本超新星からニュートリノが初めて検出されたことで有名) を対象とする研究報告を行った。SN 1987A の初期の鉄輝線 [Fe II] の観測などから、爆発的元素合成で作られた放射性元素 ^{56}Ni が何らかのメカニズムによる物質混合によって外層まで運ばれていたことが分かり、そのメカニズムが良く分かっていなかった。また、SN 1987A はその周りに特徴的な三重のリング構造が見つかっている。爆発前の親

星からの恒星風が起源と考えられていたが、その具体的な形成シナリオは未解明であった。報告者らは、上記の問題を解明するため、近年、SN 1987A の親星として提唱された伴星進化モデルを用いた bipolar 的な非球対称な超新星爆発の 3 次元の流体数値実験を行い、超新星残骸のフェーズまでの長期進化を追った。その結果、物質混合の根拠のひとつとなった [Fe II] 輝線や近年の X 線の光度曲線観測が、伴星進化した親星モデルを用いた爆発モデルで上手く説明出来ることが分かった (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111; Orlando et al. 2020, A&A, 636, A22)。伴星進化シナリオは、その進化過程で上記の三重リングの形成に有利であり、その他の特徴的な親星に関する観測とも矛盾せず、SN 1987A の親星の伴星進化シナリオを支持する結果となった。

近年の ALMA による SN 1987A の観測から、超新星放出物質中の CO および SiO 分子の 3 次元的空間分布が初めて明らかになり、著しく非球対称であることが分かった (Abellán et al. 2017)。非球対称な爆発や物質混合を反映していると考えられるが、超新星放出物質中の分子・ダスト形成への多次元効果は良く分かっていない。そこで、本課題では、SN 1987A に関して得られた 3 次元の超新星爆発モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111) に基づき、超新星放出物質中の分子形成について、物質混合が与える影響について調べた。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3 次元の bipolar 的超新星爆発モデルの結果 (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111; 図1に計算結果から得られた代表的元素の分布を示す。) 得られた、爆発から 1 日程度後の各物理量を角度方向に平均化することで、あるいはある特定の方向の動径方向プロファイルを抽出することで 1 次元球対称のプロファイルを得る。爆発から 1 日程度経過するまでには、超新星衝撃波が親星中を通過する過程で起こる物質混合は終了しており、角度平均することで実効的に物質混合の効果を初期条件として考慮することが出来

る。また、比較のため、球対称に爆発した場合（爆発自体は球対称であるがその後の進化は 3 次元）、完全に球対称に進化した場合の 1 次元プロファイルも準備する。次に 1 次元プロファイルを初期条件として、1 次元の流体数値実験を爆発から 1 万日程度まで行い、超新星放出物質の温度・密度の進化を追う。テスト粒子（Lagrange 粒子）を初期の 1 次元プロファイルの動径方向に分布させ、上記の流体計算の結果から、各粒子の温度・密度の時間発展を得る。これらを初期組成と共にインプットとして、分子形成反応に関する方程式を各粒子に対して行う。

本研究の分子反応計算のために新たに分子反応ネットワークを構築した。考慮した分子種等は CO および 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、分子や原子が一階電離したイオン、そして電子の計 75 種。考慮した分子反応および反応率は UMIST データベースおよび関連文献から上記 75 種が関わる反応について可能な限り採用した。上記の温度・密度進化と分子形成に関連し、以下の効果が重要であると考えられる。1. 放射性元素 ^{56}Ni の崩壊に伴うガスの加熱、崩壊によって生じた高エネルギー電子の衝突による原子・分子の電離、および分子の破壊。2. CO の回転振動遷移放射に伴うガスの冷却。以上の二点である。これら二点に関しては先行研究 (e.g., Liu & Dalgarno 1995; Cherchneff & Dwek 2009) の近似的手法を参考に、その効果を組み込む。後者に関しては CO の熱的電子による励起・脱励起を考慮した振動準位に関する方程式を同時に解く。尚、物質混合が分子形成に与える影響を 3 次元の流体モデルに基づいて調べた研究は先行研究になく、本研究が初めてである。

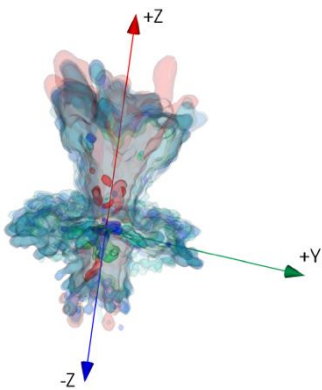


図 1: 3 次元の超新星爆発モデルから得られた超新星放出物質中の元素の空間分布。 ^{56}Ni (赤); ^{28}Si (緑); ^{16}O (青); ^{12}C (水色)。

3. 結果

本研究の結果は現在、雑誌に投稿中（査読を経て改訂版を再投稿中: arXiv: 2305.02550）であり、以下が主要な結果である。

物質混合による放射性元素 ^{56}Ni の分布が以下に挙げるいくつかの過程を通して分子形成に重要な役割を果たすことが分かった。1) ^{56}Ni の崩壊によるガスの加熱の影響を受けた粒子中では、分子形成が開始されるガス温度 (10^4 K) まで冷却されるまでに時間がかかり、分子形成が密度の低い状態で始まるために分子の総量にあまり寄与しない。2) ^{56}Ni の崩壊に起因して生じる高エネルギー電子（コンプトン電子）による電離や分子の破碎によって、生成された分子の一部が破壊され、爆発から数百日程度の間、特に CO, SiO 分子の総量が減少する場合がある。3) コンプトン電子による電離によって電子密度が上昇し、電子が関わる化学反応を起点とした一連の反応によって局所的に CO, SiO, H_2 , OH 分子の形成反応が上記の破碎反応より支配的になる場合がある。

計算結果の一例として図1の bipolar 的爆発の軸上である +Z 方向とそれと垂直方向である -Y 方向の分子の動径方向分布（爆発から約 10000 日後のスナップショット）を図 2 に示す。

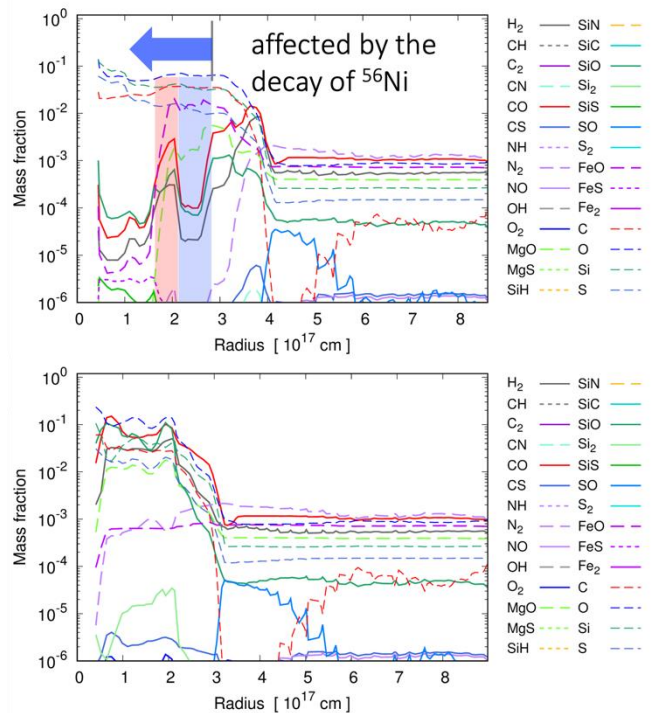


図 2: +Z 方向 (上図) および -Y 方向 (下図) の爆発から約 1000 日後の各分子の分布。

図から分かるように、+Z 方向の内側では粒子が ^{56}Ni による加熱の影響を受けて、あまり加熱の影響を受けていない -Y 方向と比べ CO, SiO 等分子形成がそれほど進んでいない。また、+Z 方向の半透明色で示した ^{56}Ni の影響を受けた領域において、青色の領域では上記の 2) の効

果による分子の破砕が支配的であり、赤色の領域では上記の 3) で記した一連の反応による分子形成が支配的である事が分かった。

ALMA による CO および SiO 分子の 3 次元的空间分布の観測から、CO 分子については、その分布にリング状の構造が確認されており、軸対称な現象が影響を与えた可能性がある。その点で、本研究で採用した bipolar 的爆発は定性的に合致しており、実際観測で確認された CO のリング状構造の軸と本研究で採用した bipolar 的爆発の軸は概ね合致する事が分かっていた (Orlando et al. 2020, A&A, 636, A22)。上記の分子形成計算の結果得られた +Z 方向と -Y 方向の特に CO および SiO 分子分布の違いは、観測された CO 分子のリング状の構造を定性的に説明するかも知れない。このことを更に確かめるには、3 次元の爆発モデルをより直接的に活用した (全方向に対する) 分子形成計算が今後必要である。

4. 今後の計画・展望

本研究では、分子形成計算を角度平均によって得られたあるいは特定の方向に対する 1 次元球対称のプロファイルを用いて分子形成計算を行なった。前項目で述べたように、今後は、これを既存の SN 1987A の 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデル (Orlando et al. 2020, A&A, 636, A22) により直接的に適用したい。また、本研究では CO の振動準位の時間発展を、冷却効果を取り入れる目的で計算したが、SN 1987A で観測された CO の振動遷移放射の光度曲線を上手く説明出来ない部分があることが分かった。今後、計算手法を改善し、観測された光度曲線やスペクトルが再現可能か調べたい。また、導入部分で述べたように、形成された分子を種として更にダスト形成が進行していると考えられる。実際、ALMA による SN 1987A の追観測 (Cigan et al. 2019) からダスト放射が確認されている。近い将来、ダスト形成理論とも繋げ、超新星放出物質中でのダスト形成についても 3 次元の流体モデルに基づき調べる予定である。

2023 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

“Three-dimensional hydrodynamical models of core-collapse supernovae to their supernova remnants toward understanding the explosion mechanisms, properties of neutron stars, and the chemical evolution”, M. Ono, Colloquium at Institute of Astronomy, National Tsing Hua University (NTHU), Taiwan, Nov. 10, 2023 (招待講演)

“Molecule formation in the ejecta of SN 1987A: the impact of effective matter mixing based on 3D hydrodynamical models”, M. Ono, T. Nozawa, S. Nagataki, A. Kozyreva, S. Orlando, M. Miceli, and K.-J. Chen, Nuclei in the Cosmos (NIC XVII), Institute of Basic Science (IBS), Deajeon, Korea, Sep. 22, 2023

“Molecule formation in core-collapse supernova ejecta: the impact of effective matter mixing based on 3D hydrodynamical models of SN 1987A”, M. Ono, T. Nozawa, S. Nagataki, A. Kozyreva, S. Orlando, M. Miceli, and K.-J. Chen, The 1st IReNA-Ukakuren joint Workshop, National Observatory of Japan (NAOJ), Aug. 30, 2023

“超新星爆発から超新星残骸までの 3 次元流体数値計算で探る爆発メカニズム、親星、中性子星の性質と分子形成”, M. Ono, 宇核連セミナー, オンライン開催, 2021 年 6 月 17 日 (招待講演)