

課題名(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

本研究課題は2017年から申請者らが共同研究者らと進めてきた3次元の大規模な流体数値計算に基づく重力崩壊型の超新星爆発から超新星残骸までの進化に関する理論的研究の国際共同研究プロジェクトの一環である。

研究の背景 重力崩壊型の超新星爆発のメカニズムは約50年に渡る未解明な問題である。現在、理論的には重力崩壊後に中心に形成される原始中性子星からのニュートリノによる加熱が有力とされているが、爆発の成功には流体不安定性などの多次元効果が重要だと考えられている。超新星爆発は電磁波観測としてはまず超新星として捉えられるが、遠方のため点光源としてしか観測されず、爆発の形状などの多次元性を確認出来る情報は非常に限られる。一方で、超新星爆発の衝撃波が星間空間を伝搬し、爆発から数百年後に広がって再び様々な波長で観測される超新星残骸と呼ばれる天体は空間的構造が解像できるものがある。特に、超新星 1987A (SN 1987A) の残骸や超新星残骸 Cassiopeia A (Cas A) の爆発の放出物質の分布は極めて非球対称であり、爆発そのもの、あるいはその後発達した流体不安定性や星間物質の非球対称性が反映されているものと考えられる。しかし、これまでの理論的研究では超新星爆発と超新星残骸は異なる分野であり、超新星爆発から超新星残骸までを一貫した多次元流体計算に基づいた理論的研究はなかった。そこで、報告者は2017年から Orlando 氏 (パレルモ天文台, 伊) らと本共同研究を開始した。

本研究の目的とこれまでの進捗 上記の背景を踏まえ、本研究では報告者が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がカミオカンデで初めて検出され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。SN 1987A は超新星放出物質の空間的構造が観測で捉えられ、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非球対称な恒星風によるものと考えられている)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り、その原因は親星の進化過程と深く関わると考えられる。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。

実際、これまでに SN 1987 について超新星爆発と超新星残骸フェーズ3次元の大規模計算を行い、観測と比較し議論を行った (Ono et al. 2020, The Astrophysical Journal, 888, 111; Orlando et al. 2020, Astronomy & Astrophysics, 636, A22: 前回報告書にて報告済み)。結果として、これまで説明が困難であった爆発初期の鉄輝線 [Fe II] の観測や、後期のX放射の光度曲線を良く説明可能なモデルが見つかった。そのモデルから、SN 1987A の親星が伴星進化の過程で合体して形成された青色超巨星であり、ジェットに近い非球対称な超新星爆発であった可能性が高いことが示された。

最近、ALMA(アルマ望遠鏡)のSN 1987Aの観測からCOおよびSiO分子の回転遷移線の3次元的な空間分布が初めて観測された (Abellán et al. 2017)。更に、ALMAによる追観測により、超新星放出物質中で形成されたと考えられるダスト(宇宙塵: 個体微粒子)からの放射が観測され、ダスト放射のホットスポットの存在から、これまで未発見であったSN 1987Aの中性子星の存在が間接的ではあるが初めて示唆された (Cigan et al. 2019)。これらは超新星放出物質の形状や超新星における分子・ダスト形成を理解する上で非常に重要な手がかりとなる。今年度は、これらの観測を検証する理論的研究の第一歩として超新星放出物質にお

ける分子形成計算を行うことを目標とする。これまでに3次元の超新星爆発-超新星残骸モデルに基づいた分子・ダスト形成の理論研究は皆無である。他方、共同研究者である Greco 氏, Miceli 氏 (パレルモ大学, 伊) らは、これまでの我々の研究で得られた SN 1987A の3次元の超新星爆発-超新星残骸モデルに基づき、放出物質の中心付近に存在すると考えられている中性子星からのX放射を仮定し、そのX線放射の周辺物質による吸収量を見積もる。その吸収量と観測との比較により未発見である中性子星の性質に制限をつけることを計画している。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3次元の超新星爆発および超新星残骸の流体数値計算については前回までに報告済みであるため、前半で簡単に紹介し、後半で分子形成計算について詳細を述べる。

超新星爆発から超新星残骸までの3次元の流体数値計算 報告者は Ono et al. 2020 (ApJ, 888, 111) において SN 1987A を念頭に超新星爆発の3次元流体計算を行った。計算コードは流体計算の公開コード FLASH¹ に基づいている。現実的な親星モデル (伴星進化モデル: Urushibata et al. 2018 など) を初期条件として、中心付近に人工的にエネルギーを非球対称に注入することで様々な非球対称爆発計算を行い、流体不安定性等による物質混合や観測された鉄輝線 [Fe II] のラインプロファイルとの比較について調べた。Orlando 氏は報告者の3次元の超新星爆発の結果 (爆発から約1日後) を初期条件として、更に星周物質として観測されている三重リングの一番内側のリングの密度分布や星周物質の磁場分布などを仮定した上で爆発から50年程度までの3次元の磁気流体計算を行なった。計算コードは公開の流体計算コード PLUTO² である。計算した3次元磁気流体計算の結果に基づき、自身の先行研究 (Orlando et al. 2019) と同様の手法でX線放射を評価し、観測されているX線の光度曲線やイメージと比較し議論を行なった。

分子形成計算 (本申請課題で今年度報告者が行うこと) SN 1987A における分子の最近の観測報告 (Abellán et al. 2017) を受け、報告者はダストの形成の専門家である野沢氏 (国立天文台) の協力のもと、超新星放出物質中

の分子形成からダスト形成計算までを行うプロジェクトを開始した。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 (爆発から約1日後) を用いて、超新星放出物質中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し、各テスト粒子に対して小規模な分子反応ネットワーク (C₂, CO, O₂, SiC, SiO, CS, SO, Si₂, SiS, S₂, He, C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar を考慮) 計算を昨年度までに行なった (Ono et al. 2020, JSP conf. Proc., 30, 011029: 国際会議収録)。解くべき方程式は連立一階線形微分方程式であり、報告者が過去の元素合成に関する先行研究 (e.g. Ono et al. 2012) での核反応ネットワークを用いた計算と本質的には同じである。分子形成の反応率 (反応係数) としては、最も寄与が大きいと考えられる radiative association による反応率 (e.g. Andreazza & Marinho 2005) を採用した。一方、破壊に寄与する反応として、相手粒子の運動エネルギーが着目する分子の結合エネルギーよりも高ければ幾何学的な断面積に比例して破壊が起こると仮定して反応係数を求めた。

上記収録の計算時点ではテスト粒子の温度と密度の時間発展として単純なべき則を仮定したのみであった。そこで、3次元の超新星爆発-超新星残骸モデルに基づいた温度と密度の時間進化を用いるため、元素合成の分野でいわゆるテスト粒子法と呼ばれる手法を採用する。すなわち、流体計算の計算領域にテスト粒子を分布させ、その粒子の位置を粒子の位置の速度場に沿って逐次的に移動させ、移動した先でその都度その場所の温度と密度を (流体計算の結果得られる隣接セルの物理量の補間により) 取得し、粒子の温度・密度と読み替える。3次元流体計算の結果データは膨大となるため、全てのタイムステップの結果を保存することは不可能である。そのため、限られたアウトプットから粒子の位置を見積もるが、見積もられた結果が元の流体計算の結果と矛盾しない時間発展手法 (e.g. オイラー法、予測子修正子法、ルンゲクッタ法など) を選択する。

加えて、分子形成にはこれまでの報告者の計算で考慮していない物理過程が重大な影響を及ぼす可能性がある。例えば、超新星爆発の際の元素合成でつくられた長寿命放射性元素 ⁵⁶Ni (⁵⁶Ni → ⁵⁶Co → ⁵⁶Fe) の崩壊によって放出されるガンマ線による放出物質の加熱や二次高エネルギー電子による分子の破壊、形成された CO 分子の

¹ <http://flash.uchicago.edu/site/>

² <http://plutocode.ph.unito.it/index.html>

回転振動遷移による冷却である。これらの効果を分子形成計算への導入を試みる。

3. 結果

SN 1987A の 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデルについては前年度までに報告済みなので省略する。今年度は主として超新星放出物質中での分子形成計算を行うためのコード開発とそれを 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデルへ適用するためのテスト粒子法のコード開発に取り組んだ（結果的にコード開発が遅れたため、HOKUSA を用いた大規模計算は行わなかった）。分子形成計算結果の一例として国際会議の収録で報告した計算結果を紹介する（図 1）。

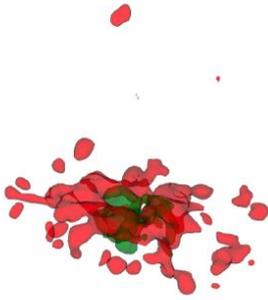


図 1. 超新星放出物質中の CO 分子 (赤) と SiO 分子 (緑) の分布。爆発からおよそ 30 年後。それぞれ数密度の等値面 (最大数密度の 30% の値に対応する面) を表す。Ono et al. 2020, JSP conf. Proc., 30, 011029 より。

図 1 の分布は 3 次元の超新星爆発モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111) に基づいてはいるが、テスト粒子の温度・密度の時間発展として単純なべき則を仮定している。しかし、それでも ALMA の観測で分かったある定性的な性質 (SiO 分子の周辺に CO 分子が分布する: Abellán et al. 2017) とは矛盾しない結果となった。

上述のように、分子形成計算のためのテスト粒子の温度・密度の時間発展を 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデルから求めるため、まずテスト粒子法コードの開発を行なった。そのため、まず 3 次元の超新星爆発モデルの結果を角度方向に平均化した 1 次元プロファイルに基づいて球対称の 1 次元計算を行い、それにテスト粒子法を適用することで最適な時間発展法を導き出した。結果として予測子修正子法が本研究課題に最適であることが分かった。その結果を受け、予測子修正子法を用いたテスト粒子法コードを 3 次元の流体モデルに適用するための拡張を行なった。

次に、これまで考慮してしなかった物理過程が分子形成へ影響する可能性を事前に調べるため、上記の 1 次元流体モデルのテスト粒子に対してそれらの効果を取り入れた計算を行うことにした。上述のように、放射性元素である $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ の崩壊による加熱はテスト粒子の温度進化に変更を加え、また崩壊によって二次的に生じた高エネルギー電子による分子の破壊は直接的に分子形成量に影響を与える。3 次元の超新星爆発-超新星残骸の流体モデルには $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ の崩壊による加熱の効果が入っていないため、ポストプロセスではあるがその影響を調べる必要があった。本申請課題とは直接関係はないが、共同研究者である Kozyreva 氏 (Max Planck Institute, 独) が報告者の 3 次元超新星爆発モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111) を角度平均化した 1 次元プロファイルを初期条件として、1 次元の輻射流体計算 (これには $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ の崩壊による加熱の効果が含まれる) を行なっていた。その結果を参考に、テスト粒子法で求めた各テスト粒子の温度進化を修正する手法を開発した (実質的な計算のため、加熱効率をパラメータとして残してある)。

更に、 $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ の崩壊による二次電子による破壊の効果調べた。手法としては超新星放出物質中の分子形成を調べた先行研究 (Cherchneff & Dwek 2009) に従った。結果的に、破壊の影響が極めて大きいことが分かったと同時に、それにより過去の SN 1987A の観測から見積もられていた CO 分子量の時間発展 (Liu & Dalgarno 1995) を説明するのが非常に困難であることが分かった。そこで、分子形成に大きな影響を与え得る CO 分子の回転振動遷移による冷却の効果の導入を試みた。手法は先行研究 (e.g. Liu & Dalgarno 1995) に従ったが、必要な遷移レベルのエネルギーや Einstein 係数、電子衝突による励起/脱励起の反応係数には最新のもの (e.g., Li et al. 2015, Poparić et al. 2008) を採用した。現在、この冷却効果を取り入れるためのコード開発を完了してその影響を調べている。本申請課題を含む研究の成果は口頭発表、ポスター発表、およびプレスリリース (成果リストの [3-6, 8, 9]) で報告した。

本申請課題として関連して (大枠としての本共同研究プロジェクトの一環)、報告者の 3 次元超新星爆発モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111) の結果を角度方向に平均化した 1 次元プロファイルを初期条件として利用した、一般的な超新星残骸の長時間進化 (爆発から 5000 年程度まで) に関する研究成果が報告された ([2])。[2] で

は爆発初期（爆発から 1 日後程度）に密度と速度の高いクランプを仮定し、それが超新星残骸の長時間進化に与える影響が調べられた。

また、現在、共同研究者である Greco 氏、Miceli 氏らが 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデル (Ono et al. 2020, ApJ, 888, 111; Orlando et al. 2020, A&A, 636, A22) に基づき、未発見である中性子星からの X 線放射の吸収量を見積もり、これまでの X 線観測において中性子星が未検出である事実と比較し、中性子星からの X 線放射に対して（ひいては中性子星の性質そのものに）制限をつけるプロジェクトを遂行している。SN 1987A の Chandra X 線衛星と NuSTAR X 線衛星の観測との比較から非常に興味深い事が分かり最近報告がなされた ([1, 7])。観測と中性子星からの X 放射の理論との比較の結果、観測を上手く説明するには中性子星からの高エネルギー X 線成分（非熱的成分）が必要であり、またそのことから 中性子星の存在 や、中性子星のパルサー的活動 (Pulsar Wind Nebula) が示唆されることが SN 1987A に対して初めて分かった。

4. 今後の計画・展望

分子形成計算に関するコード開発についてはほぼ今年度完了することが出来た。来年度は実際にその計算手法を 3 次元の超新星爆発-超新星残骸モデルに適用 する。3 次元計算への適用には、考慮すべき粒子数が非常に膨大 (10^7 個程度) となるため、MPI によって並列化された分子形成計算およびその関連コードを用いて（関連コードはすでに並列化済み）HOKUSAI での並列計算を行う。分子形成計算結果をダスト理論の専門家である野沢氏が引き継ぎ、超新星放出物質中のダスト形成 についても SN 1987A のダスト観測 (e.g. Cigan et al. 2019) と比較し議論する。中性子星からの X 線の吸収量の見積もりに関しては、現在、中性子星からの X 線放射として、中性子星の熱的進化の理論計算 (土肥氏, 理研) との比較を遂行しており、その結果が得られる予定である。

5. 利用がなかった場合の理由

本年度は分子形成計算に関連して、分子形成に重要な役割を果たすと考えられる効果（放射性元素 $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ 崩壊による高エネルギー電子による分子の破壊、CO 分子のライン放射による冷却等：テスト計算の結果、後から重要と分かった効果）の計算コードへの組み込みや、分子形成

計算を 3 次元の流体モデルに適用するためのテスト粒子法コードの開発に遅れが生じたため、HOKUSAI を用いた大規模計算を結果的に行わなかった。

2020 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- [1] “Indication of a Pulsar Wind Nebula in the hard X-ray emission from SN 1987A”, E. Greco, M. Miceli, S. Orlando, B. Olmi, F. Bocchino, S. Nagataki, M. Ono, A. Dohi, and G. Perres, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 908 (2021) article id. L45 (記載なし: レター記事によるページ数制限と優先順位を考慮した結果、記載しなかった。ただし、謝辞に HOKUSAI の記述がある Ono et al. 2020, *ApJ*, 888, 111 の引用はあり。)
- [2] “3D modeling from the onset of the SN to the full-fledged SNR: Role of an initial ejecta anisotropy on matter mixing”, A. Tutone, S. Orlando, M. Miceli, S. Ustamujic, M. Ono, S. Nagataki, G. Ferrand, E. Greco, G. Peres, D. C. Warren, and F. Bocchino, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 642 (2020) article id. A67 (15 pp.) (謝辞への記載あり)

【口頭発表】 (記載なし: 時間制限のため発表スライドには謝辞を含めていなかった)

- [3] “重力崩壊型超新星爆発と超新星爆発-超新星残骸進化における元素合成から分子形成まで”, 小野勝臣, 第3回 理研-九大ワークショップ ～数理で繋ぐミクロとマクロ: 素粒子・原子核・宇宙～, オンライン開催, 2020 年 12 月 21 日
- [4] “3D simulations of SN 1987A from the explosion to the supernova remnant: the impact of progenitor models including a binary merger model, the molecule formation in the ejecta”, M. Ono, 早稲田大学理論宇宙物理学研究室セミナー, 早稲田大学, 2020 年 11 月 6 日

【ポスター発表】

- [5] “3次元流体計算に基づく超新星 1987A の超新星爆発から超新星残骸までの進化と分子形成”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, G. Ferrand, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, and G. Peres, 第 33 回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」, オンライン開催, 2020 年 12 月 23 日-25 日 (謝辞への記載あり)
- [6] “3次元流体計算に基づく超新星 1987A の超新星爆発から超新星残骸までの進化”, M. Ono, S. Orlando, M. Miceli, S. Nagataki, G. Ferrand, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, T. Nozawa, O. Petruk, F. Bocchino, and G. Peres, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2020, オンライン開催, 2020 年 12 月 14 日, 17 日 (謝辞への記載あり)

【その他(著書、プレスリリースなど)】 (記載なし: 発表形式上、謝辞を含まないため)

- [7] Chandra Press release, February 23, 2021

“Reclusive Neutron Star May Have Been Found in Famous Supernova”

https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/images/reclusive-neutron-star-may-have-been-found-in-famous-supernova.html

- [8] RIKEN Research Fall 2020, Briefs

“Star merger leads to supernova”

https://www.riken.jp/medialibrary/riken/pr/publications/riken_research/2020/rr202009.pdf

- [9] RIEN Research News, March 19, 2020

“Merger between two stars led to iconic supernova”

https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20200319_2/index.html