

白色矮星の爆発の大規模並列シミュレーションで探る元素の起源

谷川 衝 (東京大学)

概要

白色矮星の爆発に関する2つの研究を行った。1つめは、Ia型超新星のモデルとして有力になりつつある Dynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonation (D6) モデルをシミュレーションで再現し、その特徴がIa型超新星の特徴と整合するかどうか調べた。その結果、大局的特徴は整合するが、低速度成分にヘリウム、炭素、酸素を含むことがわかった。これらはIa型超新星と整合的でなく、これらが観測に反映されるかどうか今後研究する必要があることがわかった。2つめは、中間質量ブラックホールに潮汐破壊される白色矮星の爆発の2次元計算である。この計算によってこの爆発が ^{56}Ni だけでなく、Fe、Cr、Ti、Caなどの軽元素も生成されることが明らかとなった。今後は、この爆発の疑似観測に向けて3次元計算を行う。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

- 東京大学大学院総合文化研究科
- 東京大学情報基盤センター
- 理化学研究所計算科学研究センター

1.2 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野

1.3 参加研究者の役割分担

- 谷川衝: Oak-forest PACS における計算の実行、解析
- 柿内健佑: Oak-forest PACS における計算の実行、解析
- 三木洋平: 計算コードのチューニング
- 岩澤全規: 計算コードのチューニング

2 研究の目的と意義

元素の起源の解明は人類の普遍的な夢である。白色矮星の典型的な爆発であるIa型超新星は、クロム (Cr)、マンガン (Mn)、鉄 (Fe)、ニッケル (Ni) のような鉄族元素の主要な起源であると期待されている。また、白色矮星はIa型超新星以外にも特異な爆発があると考えられており、その爆発の中にはチタン (Ti) を大量に生成する爆発もあると考えられている。本研究の目的は白色矮星の多様な爆発がどのような元素を生成するのかを大規模並列シミュレーションによって明らかにすることである。

我々は特に白色矮星の2種類の爆発について注目する。1つめはIa型超新星爆発である。Ia型超新星は宇宙で最も明るい天体の1つであり、数多く発生する。その明るさの均一性から宇宙の距離指標となっている重要な天体で

ある。従来、Ia 型超新星を起こす白色矮星は、チャンドラセカール限界質量 (1.4 太陽質量 (M_{sun})) 付近の質量を持つ白色矮星だと考えられてきた。しかし、近年の観測によると、このような白色矮星の爆発では、Mn を実際によりも生成し過ぎることがわかった。従って、Ia 型超新星爆発の起源として、Mn を少なめに生成するサブチャンドラセカール質量 (0.8 から $1.1M_{\text{sun}}$) の白色矮星の爆発が期待されている。しかし、このような白色矮星が Ia 型超新星として爆発した場合、どのような元素を生成するのかは明らかになっていない。また、Mn の生成量は最終的に白色矮星となる恒星が含む金属量に対して敏感であるため、この依存性も調べる必要がある。ここでの我々の目的は、サブチャンドラセカール質量の白色矮星の爆発で生成される元素組成と、その金属量依存性を明らかにすることである。

2 つめは中間質量ブラックホールで潮汐破壊された白色矮星の爆発である。このような白色矮星は中間質量ブラックホールの重力による圧縮で爆発するので、その質量は上のサブチャンドラセカール質量ほども必要ない。従って、ヘリウムを主成分とする白色矮星さえ爆発することができる。このような白色矮星が爆発すると、Ti が多く生成されることが期待できる。Ia 型超新星や II 型超新星で生成される Ti は観測される量よりも少ないことが知られている。ここでの我々の目的は、中間質量ブラックホールで潮汐破壊された白色矮星の爆発が十分な量の Ti を生成することができるかどうかを明らかにすることである。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

共同研究として必要なのは、本研究が大きな計算資源を必要とするからである。上のどちら

の研究も、白色矮星を表現するのに 1 億個程度の SPH 粒子が必要となる。この理由は以下の通りである。白色矮星の爆発は爆轟波という超音速の燃焼波によって起こる。超音速であるゆえに、この爆轟波は衝撃波を伴うが、この衝撃波をシャープに捉えるためには、高分解能 (すなわち大粒子数) の SPH シミュレーションが必要になるのである。また、白色矮星の質量には様々な可能性があり、またわずかな質量の違いが生成される元素組成の大きな違いを生むため、パラメータ空間を細かく掃く必要がある。まとめると、一つ一つの計算に大きな計算量が必要となり、また大きなパラメータサーベイを行う必要があるため、本研究は大きな計算資源を必要としている。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

1 つめの研究について述べる。前年度は近年 Ia 型超新星爆発のモデルとして有力となりつつある Dynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonation (D6) モデルをシミュレーションによって再現することに取り組んだ (Tanikawa et al. 2018, ApJ, 868, 90)。このモデルでは、炭素と酸素 (CO) を主成分とする白色矮星 (WD) に、別の WD からヘリウムが降着することによって Ia 型超新星が起こるとするものである。前者の WD を主星、後者の WD を伴星と呼ぶ。我々は主星の質量を $1.0M_{\odot}$ 、伴星の質量を $0.6M_{\odot}$ として原子核反応と組合せた SPH シミュレーションを行い、主星を爆発させた。この爆発の結果と Ia 型超新星の特徴を比較し、D6 モデルが Ia 型超新星のモデルとして妥当かどうか精査した。その結果、爆発によって生成された元素の主な組成である ^{56}Ni 、Si、O の量は Ia 型超新星として妥当であることが明らかとなった。一方で Ia 型

超新星とは異なる特徴を2つ発見した。1つめは、伴星が遮蔽物として働くため、超新星の形が非球対称となることである。これはIa型超新星の形とは不整合である。2つめは、伴星から引き剥がした炭素や酸素が低速度の超新星噴出物を作ることである。これもIa型超新星の形とは不整合である。結論として、D6モデルの特徴は大局的にはIa型超新星の特徴と矛盾しないが、細かい構造まで調べると矛盾がでてくるということである。この後の方向としては、様々な質量の組み合わせのWD、詳細な元素組成の精査、細かい特徴が観測に反映されるかどうかを調べることである。

2つめの研究について述べる。前年度は中間質量ブラックホールに潮汐破壊されたWDが爆発可能かどうかを確認することに注力した。過去の研究では、爆発すると結論づけられていたが、それは低い空間解像度がもたらす偽の爆発であることを我々は前々年度の研究により明らかにしていた (Tanikawa et al. 2017, ApJ, 839, 81)。そのため、前年度は高い空間解像度のシミュレーションを行って、偽の爆発を避けつつ、爆発可能かどうかを精査した。このとき、高い空間解像度を達成するため、1次元の流体シミュレーションを行った。ただし、現実的な密度分布を得るために低い空間解像度が問題にならない時点までは3次元の流体シミュレーションを行い、その結果を1次元にマッピングして1次元計算を行うという手法を採用した。その結果、WDは爆発可能であることを明らかにした。しかし、その爆発は過去の研究で示された爆発とは異なるものであった。まず爆発の開始地点はWDの中心ではなく、外側であった。これは最終的に生成される元素組成に影響する (Tanikawa 2018, ApJ, 858, 26; Tanikawa 2018, MNRAS, 475, L67)。この後の方向としては、爆発のシミュレーションもよ

り現実的な多次元シミュレーションを行うことである。

5 今年度の研究成果の詳細

1つめの研究について述べる。今年度は様々な組み合わせのWDの爆発のシミュレーションを行った (Tanikawa et al. 2019, ApJ, 885, 103)。これによってD6モデルにはどのような多様性があるのかを調べる。これらの組み合わせは以下の3つである。1つめは、主星 $1.0M_{\odot}$ 、伴星 $0.6M_{\odot}$ の組み合わせで、これは前年度と同じ質量であれば、伴星の外層に大量のヘリウムがあるようにした。2つめは、主星 $1.0M_{\odot}$ 、伴星 $0.45M_{\odot}$ の組み合わせである。このとき伴星はヘリウムのみからなるWDとした。3つめは、主星 $1.0M_{\odot}$ 、伴星 $0.9M_{\odot}$ からなる組み合わせである。伴星の外層には大量のヘリウムがあることとした。1つめの組み合わせは、前年度の結果と同様で大局的にはIa型超新星の特徴と整合的であった。また、前年度でIa型超新星とは不整合となるかもしれないと懸念した低速度の炭素酸素成分は減り、大部分がヘリウムになっていた。これは伴星の外層に大量のヘリウムを置いたからである。今後はヘリウムも考慮してIa型超新星との比較を行う必要があることがわかった。2つめと3つめのシミュレーションによって、D6モデルのもう一つの爆発モードがあることがわかった。この組み合わせでは主星の爆発が引き金となって、伴星も爆発する。この場合、Ia型超新星としては多すぎる ^{56}Ni が生成されることがわかった。この爆発はIa型超新星モデルとしては妥当でないが、他の爆発現象とつながりがあるかもしれない。そのため、観測データを精査し、このような爆発がないかどうか調べることとした。

これに加えて、今年度は2つのシミュレーションのための準備を行った。1つめは、爆発

噴出物の詳細な元素組成を導出し、爆発噴出物の放射輸送計算をするための初期条件とした。これによって爆発の擬似観測が可能となる。2つめは、爆発噴出物の詳細な空間速度分布を導出した。これによってこの爆発が数百年後にはどのような超新星残骸となるかを調べるシミュレーションの初期条件となった。

2つめの研究について述べる。前年度は爆発可能性のみに注目したため、1次元計算に終始した。今年度は爆発の広がりなどを調べるために2次元計算を行った。手法は以下の通りである。1次元計算の場合と同様に低解像度が問題にならない時点までは3次元計算を行う。そしてあるところで2次元計算に切り換える。2次元とは、WDの軌道の進行方向と、軌道面に対して垂直方向である。今回扱ったのはヘリウムを主成分とするWDである。まず、爆発の開始がWDの表面からであることを確認し、1次元計算と無矛盾であることがわかった。さらに爆発が軌道の進行方向およびその逆方向へ広がっていくことがわかった。これは元素の生成という点に関して重要な点である。爆発が開始した箇所は、密度が高いため、ほとんどが ^{56}Ni に変換される。一方、爆発が広がった先は密度が低いため、原子核反応があまり活発でなく、より軽い元素(Fe、Cr、Ti、Caなど)ができた。これらは分光観測で同定できる可能性があるため、このような元素ができることを示したことは重要である。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

1つめの研究について述べる。今年度はD6モデルの多様性について研究を行い、その結果を論文として報告した。また、次年度の研究で行うシミュレーションのための初期条件をこれらの結果から作成した。以上より、今年度の研究は計画通りに進んでいると考えている。次年

度は、D6モデルの疑似観測を行い、D6モデルの構造でIa型超新星の特徴と不整合な部分を実際に観測に反映されるのかどうかを調べる。また、爆発噴出物のそのあと数百年の進化を解き、D6モデルが超新星残骸のフェイズになったときにその形態がIa型超新星と矛盾ないかどうかを調べる。

2つめの研究について述べる。今年度は多次元計算を行い爆発の広がりがどのように進行するのかについて調べた。計算結果が出揃っているため、あとは論文を執筆するだけである。今年度中に論文を投稿するところまでもっていく予定だったため、計画よりも少々遅れていると考えている。次年度は、まず論文を完成させること、さらに3次元計算へ拡張し、疑似観測が可能などころまで計算をもっていくことを考えている。

7 研究業績一覧（発表予定も含む）

学術論文（査読あり）

- J. Kumamoto, M. S. Fujii, A. Tanikawa, “Gravitational-Wave Emission from Binary Black Holes Formed in Open Clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 3942, 2019
- T. Kirihara, A. Tanikawa, T. Ishiyama, “Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 5917, 2019
- A. Tanikawa, K. Nomoto, N. Nakasato, K. Maeda, “Double-Detonation Models for Type Ia Supernovae: Trigger of Detonation in Companion White Dwarfs and Signatures of Companions’ Stripped-off Materials”, *The Astrophysical Journal*,

885, 103, 2019

- K. Kawana, K. Maeda, N. Yoshida, [A. Tanikawa](#) “Rapid Transients Originating from Thermonuclear Explosions in Helium White Dwarf Tidal Disruption Events”, *The Astrophysical Journal Letters*, 890, 26, 2019
- M. W. Richmond, et al., [A. Tanikawa](#), et al., “An optical search for transients lasting a few seconds”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72, 3, 2020
- [A. Tanikawa](#), T. Kinugawa, J. Kumamoto, M. S. Fujii, “Formation rate of LB-1-like systems through dynamical interactions”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press, 2020
- M. Shikauchi, J. Kumamoto, [A. Tanikawa](#), M. S. Fujii, “Gaia’s Detectability of Black Hole-Main Sequence Star Binaries Formed in Open Clusters”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press, 2020

国際会議プロシーディングス (査読あり)

- J. Kumamoto, M. S. Fujii, [A. Tanikawa](#), “Unexpectedly high formation rate of merging binary black holes in open clusters”, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 351, 204, 2020

国際会議発表 (査読なし)

- [A. Tanikawa](#), “Three-dimensional simulations of double detonations in the double-degenerate models for type Ia supernovae”, *The Beginning and Ends of Double White Dwarfs*, Jul. 4 2019,

Copenhagen, Denmark

- [A. Tanikawa](#), “Three-dimensional simulations of double detonations in the double-degenerate models for SNe Ia”, *Progenitors of Type Ia Supernovae*, Aug. 8 2019, Lijiang, China
- [A. Tanikawa](#), “Progenitor and explosion models of type Ia supernovae”, *The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects V*, Sep. 6 2019, Palermo, Italy
- [A. Tanikawa](#), “Effects of companion white dwarfs in D6 explosions for modeling type Ia supernovae”, *Collaborative Meeting on Supernova Remnants between Japan and USA*, Nov. 7 2019, Wako, Japan
- [A. Tanikawa](#), “High-resolution numerical studies for tidal detonation of a white dwarf”, *Tidal Disruptions in Kyoto: Confronting Theory with Observations*, Jan. 16 2020, Kyoto, Japan
- [A. Tanikawa](#), “Formation rate of LB-1 like systems through dynamical interactions”, *Innovative Area Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis The Third Annual Area Symposium*, Feb. 11 2020, Kobe, Japan

国内会議発表 (査読なし)

- [谷川衝](#), “種族合成計算と星団進化計算用の超低金属量星の進化経路モデルの開発”, *日本天文学会秋季年会*, Sep. 13 2019, 熊本
- [谷川衝](#), “多次元計算で探る潮汐破壊された白色矮星の熱核爆発の開始と伝搬と元素合成”, *日本天文学会春季年会*, Mar. 19

2020, つくば

その他（特許，プレス発表，著書等）