

令和元年6月16日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17656

研究課題名(和文) 高解像度流体シミュレーションによるIa型超新星の親星の解明

研究課題名(英文) High-resolution simulation study for type Ia supernova progenitors

研究代表者

谷川 衝 (Tanikawa, Ataru)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：20550742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：Ia型超新星の起源を探るために様々な白色矮星の熱核爆発について研究した。1つは、二重白色矮星系における白色矮星である。特にDynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonationモデルという有力モデルを調べた。このモデルは大雑把にはIa型超新星の特徴と一致したが、低速度の酸素が存在することと速度シフトがあることから、今後の検証が必要である。もう1つは潮汐破壊中の白色矮星である。潮汐破壊中の白色矮星における熱核爆発が起こることを超高解像度流体シミュレーションによって確実に示した。またヘリウム外層が存在する白色矮星はより熱核爆発しやすいことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Ia型超新星は宇宙で最も明るくかつ頻繁に起きる爆発現象の1つである。その正体については、古くから人々の関心の対象である。しかし、その正体はわかっていない。本研究では近年有力候補であるDynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonation(D6)モデルについて調べた。その結果、D6モデルは大雑把にIa型超新星の特徴と一致するが、細かな特徴が異なることが明らかになった。例えばIa型超新星は速度シフトや低速度の酸素を持たないが、D6モデルは持つということである。これらの結果は我々にとって身近である鉄元素の起源を解明するのに役立つと期待している。

研究成果の概要(英文)：We investigated various thermonuclear explosions of white dwarf stars in order to make clear the progenitors of type Ia supernovae. First, we have focused on a white dwarf in a double white dwarf system. We examined a promising model, so-called Dynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonation. We found that this model is roughly consistent with observations of type Ia supernovae. However, this model contains low-velocity oxygen and bulk velocity shift, which is inconsistent with type Ia supernovae. Future observations should search for these signals in type Ia supernovae. Second, we investigated tidally disrupted white dwarf stars. We confirmed such white dwarfs can explode similarly to type Ia supernovae. Moreover, we showed white dwarf stars explode more easily if they have outer helium shells.

研究分野：天文学

キーワード：Ia型超新星 白色矮星 中間質量ブラックホール 大規模並列流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

Ia型超新星は宇宙で最も明るく頻繁に起こる爆発現象の1つである。また、Ia型超新星の中にも光度と減光速度に相関のある「普通のIa型超新星」と相関のない「特異なIa型超新星」がある。これらの親星がどのような天体なのかについては未だ明らかになっていない。近年、Ia型超新星の親星候補として、二重白色矮星系でチャンドラセカール限界質量より小さい白色矮星が爆発（サブチャンドラセカール爆発）するというモデルが注目されている。これはいくつかのIa型超新星の直前の画像に明るい星がないことと、二重白色矮星系でチャンドラセカール限界質量の白色矮星の爆発（チャンドラセカール爆発）が理論的に困難であることによる。

2. 研究の目的

我々の目的は二重白色矮星系でのサブチャンドラセカール爆発がIa型超新星の観測と整合するかどうかを検証することである。特に近年注目されているDynamically-Driven Double-Degenerate Double-Detonationモデルについて検証する。ここではサブチャンドラセカール爆発によって生成される元素、その元素の空間速度分布などを比較することによって行う。

上の研究は「普通のIa型超新星」候補のモデルの検証であるが、同様の技術を使用して「特異なIa型超新星」の親星についても研究する。特に中間質量ブラックホールによって潮汐破壊されている最中に白色矮星がサブチャンドラセカール爆発するというモデルの検証を行う。このモデルが本当であるならば、「特異なIa型超新星」の親星候補となるだけでなく、巨大ブラックホール形成の謎を解く鍵である中間質量ブラックホールを探索する道が拓ける。そのためこのモデルを検証することは重要である。

3. 研究の方法

Ia型超新星の親星モデルを検証するにあたり、それらのモデルを再現する必要がある。この方法には、大規模並列流体シミュレーションを用いる。この流体シミュレーションにはSPH法といって、粒子の集合体で流体を表現する手法を用いた。また、白色矮星では電子の縮退圧を考慮する必要があるため、状態方程式にはヘルムホルツ状態方程式とよばれるものを用いた。白色矮星の爆発は核融合反応によって引き起こされるため、核融合反応を解くAprox13という核融合反応ネットワークを用いた。

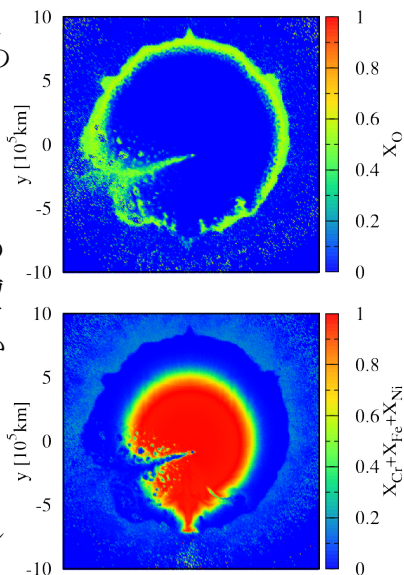
「普通のIa型超新星」に関するシミュレーションの初期条件は以下のようなものである。1.0太陽質量と0.6太陽質量の炭素酸素白色矮星を用意し、軽い方の白色矮星（伴星）から重い方の白色矮星（主星）へ質量輸送が起こる距離に置く。主星には最初から爆発が起こるような高温部を加えておき、主星の爆発と主星の爆風と伴星の相互作用を解く。

「特異なIa型超新星」に関するシミュレーションは以下のように行う。300太陽質量の中間質量ブラックホールと0.45太陽質量のヘリウム白色矮星を用意する。この白色矮星が中間質量ブラックホールに放物線軌道で近づくように設定する。このときの近点距離は白色矮星がぎりぎり潮汐破壊される距離よりも7倍近いようにする。ある程度白色矮星が中間質量ブラックホールに近づいたら、白色矮星の一部を抜き出してより高解像度な1次元シミュレーションにスイッチする。この1次元シミュレーションで爆発的な核融合反応が起こるかどうかを検証する。

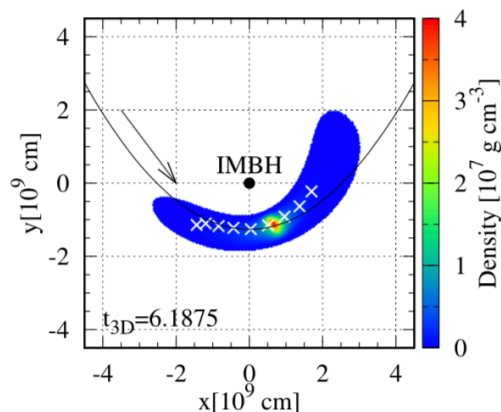
4. 研究成果

「普通のIa型超新星」に関するシミュレーションの結果について述べる。生成される元素組成や、その空間速度分布のほとんどはIa型超新星と整合するものであった。しかし、以下の2点でIa型超新星と矛盾する可能性があることがわかった。1点目は、主星の爆風が伴星から物質を剥ぎ取ることである(右図)。この剥ぎ取った物質は炭素と酸素から構成されている。これらは超新星エジェクタにおいて低速度の炭素や酸素を構成することになる。普通のIa型超新星はこのようなものを含まない。ただし、剥ぎ取った質量が0.001太陽質量程度であるため、これまでの観測にかかっていないだけの可能性もある。2点目は、主星自身が超高速で運動しているため、超新星エジェクタが速度シフトを持つということである。このような速度シフトもIa型超新星では観測されていない。ただし、これも1点目と同様に、見逃されていた特徴である可能性もある。なぜなら、この速度シフトは1000km/s程度で、Ia型超新星の爆風は典型的に10000km/s程度であるからである。今後のIa型超新星の観測はこれらのシグナルが存在するかどうかを調べる必要がある。

「特異なIa型超新星」に関するシミュレーションの結果に



ついて述べる。以下の図はこのシミュレーションの途中の白色矮星の密度分布を示している。このシミュレーションによって潮汐破壊中の白色矮星が爆発することは確実となった。過去の研究も同様の結果を示しているが、これらの研究は低解像度が起こす偽の爆発であった。そのため、過去の研究と以下の点が異なる。まず爆発の開始時刻と位置である。過去の研究では、爆発は白色矮星が最も圧縮されたときに軌道面から始まるということになっていた。しかし、我々の研究はそうではないことを示す。我々の高解像度シミュレーションは、白色矮星が圧縮されて跳ね返ったあとに、白色矮星の表面から、爆発が始まることを示した。これは白色矮星が爆発する際の密度が他の研究と異なることを意味する。密度は生成される元素に影響するため重要な要素である。また軌道面を挟んだ白色矮星の表面から爆発が始まるため、爆発を起こす2つの爆轟波が発生する。この爆轟波が軌道面付近で衝突するため、特異な元素が生成される可能性がある。このようなことを示したのは我々が初めてである。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計10件)

- ① “Property of young massive clusters in a galaxy-galaxy merger remnant”, Matsui H., Tanikawa A., Saitoh T. R. 2019, Publications of the Astrophysical Society of Japan, Vol. 71, pp. 19, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psy139
- ② “Three-dimensional Simulation of Double Detonations in the Double-degenerate Model for Type Ia Supernovae and Interaction of Ejecta with a Surviving White Dwarf Companion”, Tanikawa A., Nomoto K., Nakasato N. 2018, The Astrophysical Journal, Vol. 868, pp. 90, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aae9ee
- ③ “Metal pollution of low-mass Population III stars through accretion of interstellar objects like ‘Oumuamua”, Tanikawa A., Suzuki T. K., Doi Y. 2018, Publications of the Astrophysical Society of Japan, Vol. 70, pp. 80, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psy075
- ④ “Fortran interface layer of the framework for developing particle simulator FDPS”, Namekata D., Iwasawa M., Nitadori K., Tanikawa A., Muranushi T., Wang L., Hosono N., Nomura K., Makino J. 2018, Publications of the Astrophysical Society of Japan, Vol. 70, pp. 70, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psy062
- ⑤ “Tidal disruption of a white dwarf by a black hole: the diversity of nucleosynthesis, explosion energy, and the fate of debris streams”, Kawana K., Tanikawa A., Yoshida N. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 477, pp. 3449, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/sty842
- ⑥ “High-resolution Hydrodynamic Simulation of Tidal Detonation of a Helium White Dwarf by an Intermediate Mass Black Hole”, Tanikawa A. 2018, The Astrophysical Journal, Vol. 858, pp. 26, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aaba79
- ⑦ “Tidal double detonation: a new mechanism for the thermonuclear explosion of a white dwarf induced by a tidal disruption event”, Tanikawa A. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 475, pp. 67, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/sly006
- ⑧ “The detection rates of merging binary black holes originating from star clusters and their mass function”, Fujii M. S., Tanikawa A., Makino J. 2017, Publications of the Astrophysical Society of Japan, Vol. 69, pp. 94, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx108
- ⑨ “Unconvergence of very-large-scale giant impact simulations”, Hosono N., Iwasawa M., Tanikawa A., Nitadori K., Muranushi T., Makino J. 2017, Publications of the Astrophysical Society of Japan, Vol. 69, pp. 26, 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psw131
- ⑩ “Does Explosive Nuclear Burning Occur in Tidal Disruption Events of White Dwarfs by Intermediate-mass Black Hole?”, Tanikawa A., Sato Y., Nomoto K., Maeda K., Nakasato N., Hachisu I. 2017, The Astrophysical Journal, Vol. 839, pp. 81, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aa697d

〔学会発表〕 (計16件)

- ① 谷川衝, “連星白色矮星でのダブルデトネーションの3次元流体計算とIa型超新星”, 日本天文学会2019年春季年会, 東京, 2019
- ② Tanikawa A., “Three-dimensional simulations of double detonations in double-degenerate systems for type Ia supernovae”, 10th DTA symposium “Stellar deaths and their diversity”, Japan, 2019
- ③ Tanikawa A., “Metal pollution of low-mass Population III stars through accretion of interstellar

- objects”, Stellar Archaeology as a Time Machine to the First stars, Japan, 2018
- ④ Tanikawa A., “Numerical Study of White Dwarf Thermonuclear Explosions induced by Tidal Disruption Events”, The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Taiwan, 2018
 - ⑤ 谷川衝, “Oumuamuaを始めとする恒星間天体との衝突による初代星の金属汚染”, 日本天文学会2018年秋季年会, 兵庫, 2018
 - ⑥ Tanikawa A., “Metal Pollution of Low-Mass Population III Stars through Collision of Interstellar Objects”, The 11th meeting on Cosmic Dust, Japan, 2018
 - ⑦ Tanikawa A., "Tidal disruption events of white dwarfs: a clue to search for intermediate mass black holes", 21st European White Dwarf Workshop, USA, 2018
 - ⑧ Tanikawa A., "Numerical Study of Thermonuclear Explosion of White Dwarfs Induced by Tidal Disruption Events", 15th Marcel Grossmann Meeting, Italy, 2018
 - ⑨ Tanikawa A., "Tidal detonation of a WD by IMBH", Using Tidal Disruption Events to Study Super-Massive Black Holes, USA, 2018
 - ⑩ Tanikawa A., "Does Explosive Nuclear Burning occur in Tidal Disruption Events of White Dwarfs by Intermediate-mass Black Holes?", East-Asia AGN Workshop, Japan, 2017
 - ⑪ Tanikawa A., "Few-body modes of binary formation during core collapse", The BH Dynamics Workshop, USA, 2017
 - ⑫ Tanikawa A., “White dwarf merger by SPH simulation”, Stellar Evolution Supernova and Nucleosynthesis Across Cosmic Time, Japan, 2017
 - ⑬ 谷川衝, “白色矮星と中性子星の合体に伴う突発天体現象に関する研究”, 日本天文学会2017年秋季年会, 北海道, 2017
 - ⑭ 谷川衝, “中間質量ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊は爆発的元素合成を起こすのか?”, 日本天文学会2017年春季年会, 福岡, 2017
 - ⑮ 谷川衝, “星団の形成と力学進化および星団内での連星形成に関する研究”, 第29回理論懇シンポジウム「重力が織りなす宇宙の諸階層」, 宮城, 2016
 - ⑯ Tanikawa A., “Numerical studies of tidal disruptions of white dwarfs”, The 7th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, China, 2016

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。