

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540227

研究課題名(和文) a型超新星の新しい進化経路の発見

研究課題名(英文) Search for New Paths to Type Ia Supernovae

研究代表者

蜂巢 泉 (HACHISU, Izumi)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号：90135533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Ia型超新星は、いろいろな超新星の中では最も明るく、遠方まで見える。そのため遠方の銀河までの距離を測る距離指標として使われ、宇宙膨張の加速の発見につながった。しかし、どのような天体が爆発し、Ia型超新星になるのかは今だ判明していない。このような状況下で、本研究の成果は、Ia型の超新星の最新の観測結果を統一的に説明する、新たな連星進化モデルを構築し、Ia型超新星の起源を理論面から明らかにすることができたことにある。

研究成果の概要(英文)：Recent observations of Type Ia supernovae suggest that some of the progenitor white dwarfs had masses up to 2.4-2.8 solar masses, highly exceeding the Chandrasekhar mass limit. We present a new single degenerate model for Type Ia supernova progenitors, in which the white dwarf mass possibly reaches 2.3-2.7 solar masses. Three binary evolution processes are incorporated; optically thick winds from mass-accreting white dwarfs, mass stripping from the binary companion star by the white dwarf winds, and white dwarfs being supported by differential rotation. The white dwarf mass can increase by accretion up to 2.3 solar masses from the initial value of 1.1 solar masses, being consistent with high-luminosity Type Ia supernovae, such as SN 2003fg, SN 2006gz, SN 2007if, and SN 2009dc. We also suggest that the very bright super-Chandrasekhar mass Type Ia supernovae are born in a low-metallicity environment.

研究分野：天体物理学

キーワード：Ia型超新星 連星系の進化 恒星風 白色矮星 距離指標 光度曲線 質量降着 チャンドラセカール限界質量

### 1. 研究開始当初の背景

Ia 型超新星は、唯一遠方まで達する標準光源として、宇宙膨張則の決定に使われているだけでなく、銀河の化学進化においても鉄族元素の重要な供給源としての役割を果たしている。しかし、どのような星("親星")が Ia 型超新星として爆発するのかに関しては、未だ決定的な結論が出ていない。

近年の Ia 型超新星の観測から

- (1) 非常に明るい Ia 型超新星が数個見つかリ、これらはチャンドラセカール限界質量(1.4 倍太陽質量)を大きく超える(>2.0 倍太陽質量)白色矮星の爆発であると考えられる。
  - (2) このようなスーパー・チャンドラセカール質量の Ia 型超新星は、比較的年齢が若く、また金属量の少ない環境(銀河)で生まれる。
  - (3) 多くの Ia 型超新星では、水素の痕跡はなく、少数の Ia 型超新星でのみ水素を含む星周物質が見つかっている。また、爆発時の衝撃波が伴星にぶつかることによる光度の上昇が発見されていないなど、爆発時にロッシュ・ローブを満たすような伴星の存在が疑われている。
- など、新しい事実が指摘されている。したがって、今、求められているのは、これらの観測結果をも統一的に説明できる親星の進化経路を新たに発見することである。しかし、星周物質のある特異な Ia 型超新星と普通のものとの進化の違いについては未だ良く分かっていない。また、質量降着する白色矮星は降着物質から角運動量をもらい、スピニングアップするが、Ia 型超新星爆発を起こさせるためには、その後角運動量を抜く必要がある。角運動量損失のタイムスケールは Ia 型超新星がいつ爆発するのかを決める重要な要因となるが、スピニングアップ/スピニングダウン進化を理論面から解明することで、あっと驚くような新展開があるのではないかと予想した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、Ia 型超新星の最新の観測結果を統一的に説明する、新たな連星進化モデルを構築し、Ia 型超新星の起源を理論面から明らかにすることである。特に、最近注目される次の 2 点：

- (1) チャンドラセカール限界質量を大きく超える白色矮星が爆発したとしか考えられない、非常に明るい Ia 型超新星の起源、および
- (2) 質量降着によりスピニングアップし、チャンドラセカール限界質量を超えた白色矮星がどこまで超新星爆発を引き延ばせるか、に焦点をあてる。これらは重元素が少ない環境と関係があるともされており、銀河の化学進化と Ia 型超新星の関係の新展開が予想される。

### 3. 研究の方法

われわれはこれまで Ia 型超新星爆発に到る連星進化の道すじ(いわゆる single degenerate (SD) モデル)を構築・発展させてきた。この SD モデルは観測を良く説明し、現在スタンダードモデルのひとつになっている。もうひとつの有力なモデルが、二つの炭素酸素(C+O)白色矮星が合体し、Ia 型超新星爆発を起こすという、"二重白色矮星合体モデル"(double degenerate (DD) モデル)である。ただし、DD モデルは、合体時に炭素核燃焼がはじまり、C+O 白色矮星が O+Ne+Mg 白色矮星に転化してしまうことが指摘され、そうなる Ia 型超新星としては爆発できないことが理論的に示された。これ以外にも第 3 の道すじがあることを示す天体(ヘリウム新星として有名な V445 Pup など)があるが、その進化の道すじは良く分かっていない。

本研究の目的は、最近の Ia 型超新星の新しい観測事実、および第 3 の進化の道すじの発見、など Ia 型超新星を統一的に説明する理論を構築することであるが、申請者らが提案して来た SD モデルは、質量降着白色矮星と普通の星の連星系である。ただし、この新しい進化経路を見つけるには、1990 年代に出て来た OPAL 吸収係数が決定的に重要であった。C+O 白色矮星へ伴星からガスが降って来る場合、OPAL 吸収係数以前には、質量降着率がある値より大きいと、白色矮星の外層が赤色巨星サイズまで膨らみ、伴星と共通外層を形成し、軌道角運動量を失うので、伴星が主系列星なら合体し、赤色巨星なら二重白色矮星系になるとされた。OPAL 吸収係数導入後は、膨らむ代わりに白色矮星から恒星風が吹き、共通外層はできないことを私たちが明らかにした。

今回の進化計算に新しく取り入れる内容は、(1) 白色矮星の回転、(2) 金属量による進化の違い(銀河の環境とスーパー・チャンドラセカール質量白色矮星の関係)、(3) 伴星からの mass-stripping の効果と質量移動率を正確に計算、(4) 質量降着新星風の金属量依存性を正確に計算、の 4 点である。

特に新しい点は、(1)の白色矮星のスピニングアップ/スピニングダウンの効果である。これにより、チャンドラセカール限界質量を大きく超える白色矮星を進化計算の中で実現する。遠心力により、中心密度を低く保てるので、たとえチャンドラセカール限界質量を大きく超えても白色矮星中心の炭素には着火せず、爆発は延期される。その後、白色矮星が角運動量を失って、スピニングダウンしてから、中心密度が上昇し爆発する。その間、伴星はヘリウム白色矮星へと進化する可能性があるため、爆発時には爆発殻中に水素を含まない、また断面積が小さくなることで、衝撃波が伴星にあたることによる光度上昇が無い、

などの冒頭に掲げた最近の観測結果を統一的に説明することができると予想した。さらに、白色矮星からの恒星風および連星進化の金属量依存性を調べることで、宇宙の化学進化において、Ia型超新星の果たす役割を明らかにする。

#### 4. 研究成果

白色矮星の回転と白色矮星からの質量降着新星風が伴星にあたり、伴星表面からガスが剥がされる効果と質量移動率を正確に計算した。この計算に基づき、白色矮星の質量増加を正確に計算することができ、太陽質量の1.4倍を超える、スーパー・チャンドラセカール質量の白色矮星を連星進化計算の中で実現することができた。この白色矮星は、微分回転により支えられている。遠心力により、中心密度を低く保てるので、たとえチャンドラセカール限界質量を超えても、白色矮星中心の炭素の核融合反応には着火せず、爆発は延期される。その後、質量降着率が減少するにつれて、白色矮星は各運動量を失いつつ、スピンドウンし、中心の密度を上げていき、炭素に着火し、爆発する。これらの道筋を明らかにし、スーパー・チャンドラセカール質量の白色矮星の爆発が確かに実現することを示すことができた。主な結果をまとめると、

- (1) Ia型超新星として爆発に至る系は2種類あり、ひとつは白色矮星+主系列星(WD+MS)であり、もう一つは白色矮星+赤色巨星(WD+RG)の連星系である。
- (2) 白色矮星+主系列星の連星系は、伴星の質量が比較的大きく、2-6倍太陽質量であり、連星系ができてから、Ia型超新星爆発に至るまでの時間が比較的短い。
- (3) これに対して、白色矮星+赤色巨星の連星系は、伴星の質量が比較的小さく、0.9-3.0倍太陽質量程度である。このため、連星系が形成されてから、Ia型超新星爆発までに長い時間(100億年に近いものまで)かかるものもある。
- (4) スーパー・チャンドラセカール質量の白色矮星は、どちらかという白色矮星+主系列星の連星系から形成されやすい。
- (5) 連星系の形成後、どのくらい時間が経過すると、Ia型超新星として爆発するかを表したものを遅延時間分布(delay time distribution)と呼ぶが、白色矮星+主系列星が遅延時間の比較的短い分布をうまく説明し、白色矮星+赤色巨星の連星系が遅延

時間の比較的長い分布を説明する。この両者を足すことにより、全体の遅延時間分布の観測値を再現できた。

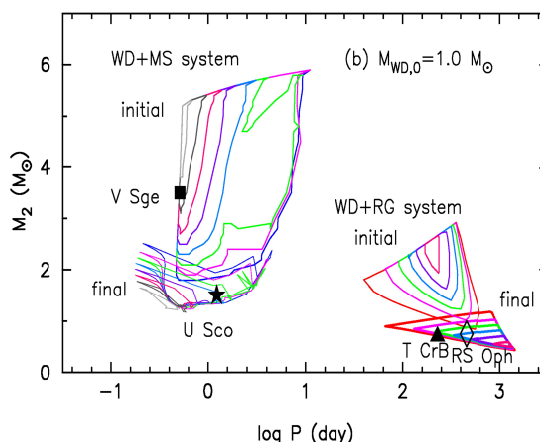


図1. Ia型超新星爆発にいたる連星系のパラメータ範囲。縦軸が伴星質量を太陽質量を単位として表したのもの。横軸が軌道周期の対数值(単位は日)。図中のU Sco(印)などは、実際の対応天体を示す。

さらに、白色矮星が角運動量を失う時間がある程度長いと、その間に伴星は外層質量を白色矮星へ移動させ、最終的にヘリウム白色矮星へと進化する。スーパー・チャンドラセカール質量の白色矮星がスピンドウンし、爆発するときには、その伴星はすでにヘリウム白色矮星になっているので、爆発殻中には、水素を含まない。さらに、爆発時に爆発殻が伴星のヘリウム白色矮星に衝突するが、その断面積が小さいので、衝撃波加熱による紫外域の光度が明るくなる現象も、ほとんど観測されないと考えられる。これらは、Ia型超新星の大部分の観測とつじつまが合うことを示すことができた。これらの結果を踏まえ、われわれのモデルで、Ia型超新星の統一な描像を確立することができたと思われる。これで、当初の目的の大部分を達成することができた。この部分をまとめると、

- (1) 白色矮星は伴星からの質量降着により、質量を増加させると同時に、降着物質から角運動量をもらい、スピンドアップする。
- (2) 高速回転の効果により、チャンドラセカール限界質量を超えても、中心の密度が低いので、炭素の核燃焼には着火しない。
- (3) 質量降着率が下がると、角運動量の内部での再分配、および磁場などの効果により、角運動量が外部へと持ち去られると、中心部の密度が上昇し、炭素に着火、Ia型超新星としてばくはつする。
- (4) この角運動量損失の時間スケールが

- 長いと、伴星が進化し、最終的には、ヘリウム白色矮星になる。
- (5) 伴星がヘリウム白色矮星になった時点で、質量降着し、チャンドラセカール限界質量を超えていた主星が爆発する。
- (6) この場合、水素のラインが見えない、爆発殻が伴星にぶつかる時の衝撃波加熱の兆候が見えない、連星系のまわりの星周物質がほとんどみられない、などの観測的要請をすべて満たすことができる。

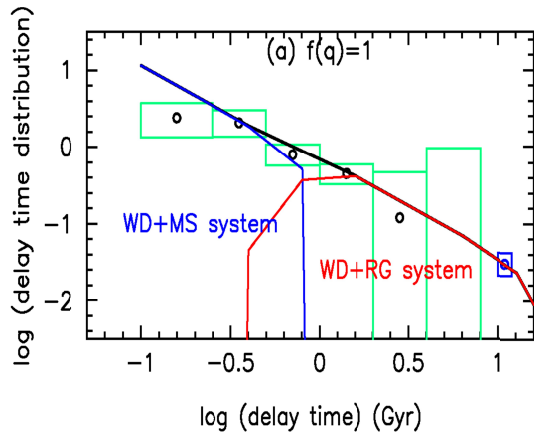


図2 . 遅延時間分布。実線はモデル。緑四角と中心の○点は観測値。点は中心値を示し、四角は誤差範囲を示す。

爆発直前の対応天体を同定するうえで、非常に重要な天体が、本研究期間の2年目に発見された。近傍銀河のアンドロメダ銀河(M31)に出現した回歸周期1年の新星(M31 Nova 2008 12a と呼ばれるが、略して、12a と呼ぶことにする)である。回歸新星は、連星系中の白色矮星に相手の星(伴星)から、水素に富むガスが降り積もることにより、水素が不安定核融合反応を起こして、爆発する現象である。何度も爆発を繰り返すが、この爆発周期は、白色矮星の質量が大きいほど、また質量が降り積もる率が大きいほど、短くなる。今までに天の川銀河で発見された回歸新星のうちで、もっとも短いものは8-12年ほどで繰り返し爆発を起こすさそり座のU星(U Sco)であった。アンドロメダ銀河の12aは1年ごとなので、今までにない新記録である。このような短い周期で新星爆発を起こすには、白色矮星が非常に重い必要がある。しかし、回歸新星の爆発周期がどこまで短くなるのかの正確な計算は行われていなかった。われわれは、その限界を調べて、約2ヶ月であることを明らかにした。また、この12aの詳細な光度曲線を可視光、X線の両方において再現するモデルを構築し、白色矮星質量が1.38倍の太陽質量という、回転していな

い(あるいは回転が遅い)白色矮星がIa型超新星として爆発する直前の状態に対応するものであることを示すことができた。逆にみると、この12aの存在は、われわれの連星進化モデルの具体例を与えるものであるといえる。

以上の結果は、合計20本の学術論文としてすでに発表されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

Hachisu Izumi, Kato Mariko, The UVB color evolution of classical novae. II. Color-magnitude diagram, The Astrophysical Journal Supplement Series, 査読あり, **223**, 21(62pp), 2016, DOI: 10.3847/0067-0049/223/2/21

Sato Yushi, Nakasato Naohito, Tanikawa Ataru, Nomoto Ken'ichi, Maeda Keiichi, Hachisu Izumi, The critical mass ratio of double white dwarf binaries for violent merger-induced Type Ia supernova explosions, The Astrophysical Journal, 査読あり, **821**, 67(9pp), 2016, DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/67

Hachisu Izumi, Kato Mariko, Light-curve analysis of neon novae, The Astrophysical Journal, 査読あり, **816**, 26(69pp), 2016, DOI: 10.3847/0004-637X/816/1/26

Benvenuto Omar, Panel Jorge A., Nomoto Ken'ichi, Kitamura Hikaru, Hachisu Izumi, Final evolution and delayed explosions of spinning white dwarfs in single degenerate models for Type Ia supernovae, The Astrophysical Journal, 査読あり, **809**, L6(5pp), 2015, DOI: 10.1088/2041-8205/809/1/L6

Henze M., Ness J.-U., Darnley M. J., Bode M. F., Williams S. C., Shafter A. W., Hachisu I., Hernanz M., et al., A remarkable recurrent nova in M31: The predicted 2014 outburst in X-rays with Swift, Astronomy and Astrophysics, 査読あり, **580**, A46(12pp), 2015, DOI: 10.1051/0004-6361/201526028

Darnley M.J., Henze M., Steele I. A., Bode M. F., Ribeiro V. A. R. M., Rodriguez-Gil P., Shafter A. W., Williams S. C., Baer D., Hachisu I., Hernanz M., Hornoch K., Hounsell R., Kato M., et al., A remarkable recurrent nova in M31: Discovery and optical/UV observations of the predicted 2014 eruption, Astronomy and Astrophysics, 査読あり, **580**, A45(23pp), 2015, DOI:

10.1051/0004-6361/201526027  
Kato Mariko, Saio Hideyuki, Hachisu Izumi, Multi-wavelength light curve model of the one-year recurrence period nova M31N 2008-12a, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **808**, 52(4pp), 2015, DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/52  
Sato Yushi, Nakasato Naohito, Tanikawa Ataru, Nomoto Ken'ichi, Maeda Keiichi, Hachisu Izumi, A systematic study of carbon-oxygen white dwarf mergers: Mass combinations for Type Ia supernovae, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **807**, 105(12pp), 2015, DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/105  
Tanikawa Ataru, Nakasato Naohiro, Sato Yushi, Nomoto Ken'ichi, Maeda Keiichi, Hachisu Izumi, Hydrodynamical evolution of merging carbon-oxygen white dwarfs: Their pre-supernova structure and observational counterparts, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **807**, 40(22pp), 2015, DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/40  
Kobayashi Chiaki, Nomoto Ken'ichi, Hachisu Izumi, Subclasses of Type Ia supernovae as the origin of [alpha/Fe] ratios in dwarf spheroidal galaxies, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **804**, L24(6pp), 2015, DOI: 10.1088/2041-8205/804/1/L24  
Hachisu Izumi, Kato Mariko, A light curve analysis of classical novae: Free-free emission versus photospheric emission, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **798**, 76(29pp), 2015, DOI: 10.1088/0004-637X/798/2/76  
Kato Mariko, Saio Hideyuki, Hachisu Izumi, Nomoto Ken'ichi, Shortest recurrence periods of novae, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **793**, 136(8pp), 2014, DOI: 10.1088/0004-637X/793/2/136  
Hachisu Izumi, Kato Mariko, The UBV color evolution of classical novae. I. Nova-giant sequence in the color-color diagram, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **785**, 97(44pp), 2014, DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/97  
Henze M., Ness J.-U., Darnley M. J., Bode M. F., Williams S. C., Shafter A. W., Kato M., Hachisu I., A remarkable recurrent nova in M31: The X-ray observation, *Astronomy and Astrophysics*, 査読あり, **563**, L8(5pp), 2014, DOI: 10.1051/0004-6361/201423410

Kato Mariko, Hachisu Izumi, Henze Martin, Novae in globular clusters, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **779**, 19(14pp), 2013, DOI: 10.1088/0004-637X/779/1/19  
Kato Mariko, Hachisu Izumi, Mikolajewska Joanna, An X-ray and optical light curve model of the eclipsing symbiotic binary SMC3, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **763**, 5(13pp), 2013, DOI: 10.1088/0004-637X/763/1/5  
Kato Mariko, Hachisu Izumi, Recurrent novae as progenitors of Type Ia supernovae, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 査読あり, **40**, 393-417, 2012, DOI: なし  
Hachisu Izumi, Kato Mariko, Nomoto Ken'ichi, Final fates of rotating white dwarfs and their companions in the single degenerate model of Type Ia supernovae, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **756**, L4(5pp), 2012, DOI: 10.1088/2041-8205/756/1/L4  
Kato Mariko, Mikolajewska Joanna, Hachisu Izumi, Evolution of the symbiotic nova PU Vul --- Outbursting white dwarf, nebulae, and pulsational red giant companion, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **750**, 5(15pp), 2012, DOI: 10.1088/0004-637X/750/1/5  
Hachisu Izumi, Kato Mariko, Saio Hideyuki, Nomoto Ken'ichi, A single degenerate progenitor model for Type Ia supernovae highly exceeding the Chandrasekhar mass limit, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, **744**, 69(15pp), 2012, DOI: 10.1088/0004-637X/744/1/69

[学会発表](計7件)

Hachisu Izumi, The color-magnitude diagram of classical novae, *Barcelona Nova Meeting*, 招待講演(国際学会), 2016年3月3日, Barcelona, Spain  
Hachisu Izumi, A light curve analysis of slow novae: Free-free emission vs. photospheric emission, *The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects-III*, 招待講演(国際学会), 2015年9月7日~9月12日, Palermo, Italy  
蜂巢 泉, 遅い古典新星の光度曲線とその絶対等級, 日本天文学会秋季年会, 2014年9月11日, 山形大学, 山形市, 山形県  
蜂巢 泉, 古典新星の絶対等級を求める新しい方法, 日本天文学会春季年会, 2

014年3月22日、国際基督教大学、  
三鷹市、東京都  
Hachisu Izumi, The UBV color  
evolution of classical and symbiotic  
novae, Workshop on symbiotic stars,  
binary post-AGB and related object,  
2013年9月19日, The Polish  
Academy of Science, Wierzba, Poland  
Hachisu Izumi, The UBV color  
evolution of classical and symbiotic  
novae, The Golden Age of Cataclysmic  
Variables and Related Objects-II, 2013  
年9月13日, Splended Hotel, Palermo,  
Italy  
蜂巢 泉、新星の2色図 爆発時の一般  
的な進化経路、日本天文学会秋季年会、  
2013年3月22日、埼玉大学、さい  
たま市、埼玉県

〔その他〕

ホームページ等

<http://lyman.c.u-tokyo.ac.jp/~hachisu/index.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蜂巢 泉 (HACHISU, Izumi)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号：90135533