

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23461

研究課題名（和文）多バンド観測によるIa型超新星の親星及び星周環境の研究

研究課題名（英文）Observational study of the progenitor and circumstellar environment of Type Ia supernovae

研究代表者

川端 美穂（Kawabata, Miho）

京都大学・理学研究科・研究員

研究者番号：10847750

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：Ia型超新星の親星、爆発モデルに制限を与えることを目的として観測的研究を行った。特に爆発直後に注目して研究を行った。京都大学3.8mせいめい望遠鏡と広島大学1.5mかなた望遠鏡を用いて、近傍銀河に出現するIa型超新星について可視近赤外線観測を実施した。初期の光度変化についてモデルと比較を行うことによって親星の半径の制限を行った。また、分光データについても解析を行い、これらのデータに見られる吸収線の青方偏移量を調べた。観測的な特徴から各々のIa型超新星のサブクラスを推定した。これらの天体について爆発直後からの観測例は限られており、本研究によって良いデータサンプルを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、爆発直後のIa型超新星の多バンドでの良い観測例を得ることができた。これまで観測例が限られている様々なサブクラスに属するサンプルを増やすことで、Ia型超新星全体について未解決問題の解決の手がかりを得る。

研究成果の概要（英文）：I performed an observational study of Type Ia supernovae in the early phase to place restrictions on their progenitor star and the explosion mechanism. Optical and near-infrared observations of Type Ia supernovae appearing in nearby galaxies were carried out with the 3.8m Seimei telescope at Okayama Observatory of Kyoto University and the 1.5m Kanata telescope at Hiroshima University. I estimated the radius of the progenitor stars by comparing the initial luminosity variations with explosion models. I determined the subclasses of each Type Ia supernova from the observational features. Since there are only a few examples of observations of these objects immediately after the explosion, this study has provided a good data sample.

研究分野：超新星爆発

キーワード：超新星爆発 Ia型超新星 親星 光赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

Ia 型超新星は恒星が示す最も明るい爆発現象の一つである。連星進化の結果、白色矮星が自身の重力を電子の縮退圧で支えられなくなるチャンドラセカール限界質量(約 1.4 太陽質量)付近に達すると、中心付近で爆発的な核反応が起こる。その核燃焼波により白色矮星の大部分が瞬時に燃焼し、 10^{15} erg もの膨大なエネルギーで星全体を吹き飛ばす。爆発時の質量はどの Ia 型超新星もほぼ一定で、観測的な特徴も似通っている。特に、極大時の光度と光度変化のタイムスケールに良い相関関係があることが良く知られており(Phillips 1993)、光度が明るいものほど、光度変化はゆるやかである。この相関関係を用いることで、Ia 型超新星は宇宙における誤差約 10% の標準光源として扱うことができる。標準光源は超新星の母銀河までの距離の情報を与え、宇宙の加速膨張の発見という大成果に繋がっている(Perlmutter et al. 1999, Riess et al. 1998)。また、爆発の際に多くの鉄族元素を合成するなど、宇宙における重元素の重要な供給源にもなっている。つまり、超新星爆発はただの「星の最期」ではなく、現在の宇宙を理解する上での重要なツールとなっている。

ユニバーサルな性質を持つにも拘わらず、Ia 型超新星の親星について、提案された二つのシナリオのどちらがもっとももらしいか論争が続いている。伴星が主系列星もしくは赤色巨星からの質量降着で爆発を引き起こす Single Degenerate(SD)シナリオ、二つの白色矮星の合体による Double Degenerate(DD)シナリオの 2 つである。爆発メカニズムに関しても、核燃焼波の伝わり方(音速を超えているかどうかなど)はよくわからないままである。宇宙の元素組成の起源や高精度の宇宙論研究のさらなる発展のためには、長年、未解決問題として残されている Ia 型超新星の親星や爆発メカニズムについて理解することが重要となる。

2. 研究の目的

本課題では、Ia 型超新星の爆発直後(数日以内)から分光、多バンドでの測光観測により、親星や爆発メカニズムの未解決問題に迫る。超新星をその爆発直後の段階で観測した場合には、超新星の最も外層の部分を、親星が残した星周物質を通して見ることになる。この最外層には、親星の大気そのものが残されている可能性があり、熱核暴走反応時に燃焼波が白色矮星のどの程度の半径まで到達するのか、外層の最大膨張速度がどのように達するのか、などといった理論モデルによっては大きく異なる事象を観測的に検証できるようになる。また、爆発直後の時期には親星や星周物質との相互作用の兆候が見られる可能性があると考えられており、親星やその放出物質過程に対する制限から、親星の素性を推定することが可能である。

3. 研究の方法

海外の他グループによる超新星サーベイの多くは数日おきの頻度で超新星を探索している。しかし、親星や爆発メカニズムを制限することができるような爆発直後のデータを取得するためには、数時間のタイムスケールで超新星を発見、フォローアップ観測を実施しなければいけない。そこで、木曾 Tomo-e Gozen カメラでの超広視野突発天体の高頻度サーベイ観測によって本研究の対象となる超新星が見つかる期待される。爆発直後の段階では超新星は暗いため、これまでは分光観測などのフォローアップ観測は困難であった。京都大学 3.8m せいめい望遠鏡など突発天体の観測に柔軟に対応できる望遠鏡を用い、爆発直後から分光や多バンドでの測光データを取得する。

1. 最外層での組成

爆発直後の分光観測によって炭素などの親星起源の元素が見られるかどうか調べる。爆発時に白色矮星の内部の物質がどれくらいかき混ぜられるかによって、放射性元素質量の分布が異なり、爆発してから極大を向えるまでのタイムスケールが異なる予測もある。最外層での組成を調べることによって爆発メカニズムへの制限を行う。

2. 星周物質との相互作用

SD シナリオにおいて連星系を成す伴星の物質が白色矮星に降り積もるが、質量降着の過程で重力圏から抜け出した物質が連星系の周囲に存在すると考えられる。一方、DD シナリオにおいて、白色矮星 2 つが形成された後、合体衝突するまでに非常に長い時間がかかる。そのため、合体前に周囲に放出された物質はほとんどなくなり、超新星爆発の際には、周囲に物質がほぼ存在しない環境で発生すると考えられている。星周物質による放射や吸収線系が見られるかどうか調べる。親星の放出物質過程に対する制限から、親星の形態について推定することが可能である。

3. 伴星との相互作用

SD シナリオにおいて、爆発直後には伴星との相互作用による放射が見られると考えられている(e.g., Kasen 2010)。伴星との相互作用による放射は、衝突した領域を見込む角度にも依存するものの、放射の明るさや変化を捉えることで親星への制限をつけることができる。紫外域から近赤外域における多バンドの測光観測を行うことで、高精度の SED から外層の温度変化を調べる。これまで爆発直後からの観測サンプルは限られている。Ia 型超新星の中でも多様性がある

ことは知られているものの、爆発直後に見られる上記の観測的特徴との関係についてはよくわかっていない(e.g., Jiang et al. 2018)。本課題で新たに観測例を増やすことによって、Ia 型超新星の中でのサブクラスを含めて議論することが可能となる。系統的なサンプルを取得し、Ia 型超新星の多様性の原因へと迫ることができる。

4. 研究成果

(1) SN 2019ein は、世界時 2019 年 5 月 1.5 日に近傍銀河 NGC5352 の中に発見された。報告を受けて、京都大学 3.8m せいめい望遠鏡と広島大学 1.5m かなた望遠鏡でフォローアップ観測を開始した。発見から 2.2 日後にあたる 5 月 3.7 日にはせいめい望遠鏡での分光観測で明瞭なスペクトルを得ることに成功した。後の検証から、爆発後わずか 3.7 日のスペクトルであることが判明した。これほど初期に得られたスペクトルはたいへん希少であり、爆発メカニズムに強い制限を与えることができると期待された。5 月 3 日に得られたスペクトルは、 $20,000 \text{ km s}^{-1}$ を超えるケイ素の吸収線を示した。その後、極大を迎えるまでの速度進化は速く、極大時では $\sim 12,000 \text{ km s}^{-1}$ まで減衰した。SN 2019ein のケイ素の速度の減衰はこれまで観測されていた Ia 型超新星の中でも最も大きいものであった。さらに、これまで観測されていた膨張速度が速い Ia 型超新星と比べて光度変化のタイムスケールも短いことが明らかになった。

爆発直後の超新星を分光することにより、より外層の組成を知ることができ、どこまで燃焼波がどのように伝わっていったのかを特定する鍵となる。膨張速度が速いサブクラスにおいては爆発直後からの観測例が少なく、これまで最外層の組成については知られていなかった。膨張速度が速いサブクラスでこれほど初期に分光観測に成功した初めてのケースとなった。最外層の組成を調べるうえで、たいへん重要なデータとなった。今回、一次元の(球対称)スペクトル計算を行った。炭素と酸素からなる白色矮星の中心付近で核反応が点火した後、燃焼波が外に広がり、元素合成を進める。最も外側では、炭素がわずかに燃え残るとともに、ケイ素が合成される。これによって計算されたスペクトルの $6,000\text{\AA}$ 付近にはケイ素による吸収線が見られる。燃焼波面がどこまで進むかをパラメータとして計算したスペクトルから、せいめい望遠鏡で得られたスペクトルの再現を行った。この計算結果より、白色矮星の燃焼波は $\sim 30,000 \text{ km s}^{-1}$ で高速膨張する最外層まで広がっているという結果が得られた。これは遅い速度進化を示す Ia 型超新星で知られている最外層の組成とは異なっており、Ia 型超新星の爆発メカニズムの制限への手がかりになった。

(2) 最近になり、極大光度が光度変化から期待される値よりも 1 等以上暗い特異な Ia 型超新星の存在が知られるようになってきた。この特異な Ia 型超新星は Iax 型超新星と呼ばれている。Iax 型超新星は暗いだけでなく、放出物質の速度も遅いという特徴が知られている。一方で、極大付近のスペクトルはむしろ明るい Ia 型超新星と似ている。もし、宇宙論的パラメータへの制限に使われるデータとして混入されれば、誤った結果を導くものとなりかねない。観測的特徴を明らかにすることが求められる。Iax 型超新星は、まだ観測例が限られていることもあり、爆発メカニズムについてよく分かっていない。Ia 型超新星と類似しつつも極大光度は非常に暗いことから、Iax 型超新星を説明するモデルとして、通常の Ia 型超新星で検討されている標準的なモデルより規模の小さい「爆燃波」モデルが提唱されている。Iax 型超新星が暗いことや爆発エネルギーが小さいことをうまく説明できると考えられていたが、全ての Iax 型超新星の明るさを説明するには依然として不十分である。近年では、これに加えてさらに規模の小さい「失敗した爆燃波」モデルが提案されている。

SN 2019muj は世界時 2019 年 8 月 7.4 日に発見された。その後、8 月 7.8 日に Las Cumbres Observatory Global SN project によって分光観測がなされ、非常に初期の Iax 型超新星によく類似していることが示された。増光中での Iax 型超新星の発見は依然として希少であり、初期からの観測で多くの未解決問題にアプローチできると期待できる。8 月 8 日にせいめい望遠鏡での To0 観測を依頼した。このスペクトルはこれまで非常によく観測されている Iax 型超新星のプロトタイプと言える SN 2005hk によく類似していますが、吸収線の幅は比較的狭いことを確かめた。吸収線速度も遅く、Iax 型超新星の中でもやや暗いタイプであると推定された。一方で、絶対光度は明るく、これまで観測されている Iax 型超新星の中でも平均的な明るさであることが分かった。これまで観測されている Iax 型超新星の中で、最も明るいものは ~ -18 等(例えば SN 2005hk)、最も暗いものは ~ -14 等程度(例えば SN 2008ha)であったが、今回私たちが観測を実施した SN 2019muj は ~ -16 mag であった。暗い Iax 型超新星 SN 2008ha と同程度の遅い速度 ($\sim 4,000 \text{ km s}^{-1}$) を持つにも関わらず、中間的な明るさを持つ Iax 型超新星の増光期からの多バンドによる観測例はこれまで得られていなかった。この特異な Iax 型超新星の放出物質の質量や構造を調査すべく、さらなる解析に着手した。光赤外線大学間連携を通じて多バンドでの欠損がほぼない、連続的な光度変化を取得し、これらを用いて総輻射光度を推定した。Iax

型超新星の中でも減光は速かったものの、極大後 30 日には緩やかな光度変動を示すようになった。この緩やかな光度変化は内側に非常に高密度の領域があることを示唆している。このような特徴は、弱い爆燃波モデルで期待される特徴をよく再現している。弱い爆燃波モデルでは、核燃焼波が亜音速で白色矮星の中を伝播し爆発するが、爆発エネルギーが小さく、白色矮星の大部分（ ~ 1.0 太陽質量）は吹き飛ばずに残骸として残り、その残骸そのものあるいはその周辺が高密度領域としてふるまうと考えられる。このような特徴はこれまで明るい Iax 型超新星で調べられている。今回、中間的な性質を示す SN 2019mu j でも同じ傾向がみられることから、異なるサブクラスの Iax 型超新星でも共通した爆発機構が働いていることが考えられる。また近年、暗い Iax 型超新星において爆発後 4 年後に超新星で期待されるより優位に明るい天体が検出されている。これが白色矮星に質量を供給した伴星であるのか、吹き飛ばずに残された白色矮星の残骸であるのか決着はついていない。もし、これが残された残骸であるならば今回の観測結果と一致する。今後、SN 2019mu j においても残骸が存在するかどうか、長期の観測で明らかにされることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 川端美穂、前田啓一、山中雅之、中岡竜也、川端弘治	4. 巻 5
2. 論文標題 せいめい・かなたによる観測で見えてきた超新星の新たな側面	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 天文月報	6. 最初と最後の頁 332-340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11501/3304565	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kawabata, Miho et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Type Ia SN 2019ein: New Insights into the Similarities and diversities among High-Velocity SNe Ia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川端美穂
2. 発表標題 近傍に現れた特異なIa型超新星SN 2019mujの可視・近赤外線観測
3. 学会等名 第11回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川端美穂
2. 発表標題 せいめい望遠鏡における近傍銀河に現れたIa型超新星の分光観測
3. 学会等名 第26回天体スペクトル研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川端美穂
2. 発表標題 速い速度進化を示す Ia 型超新星 SN 2019ein の爆発初期からの観測
3. 学会等名 日本天文学会 2019 年秋季年会
4. 発表年 2019 年

1. 発表者名 川端美穂
2. 発表標題 近傍に現れた特異な Ia 型超新星 SN 2019muj の可視・近赤外線観測
3. 学会等名 日本天文学会 2020 年春季年会
4. 発表年 2020 年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	前田 啓一 (Maeda Keiichi)		
研究協力者	山中 雅之 (Yamanaka Masayuki)		
研究協力者	中岡 竜也 (Nakaoka Tatsuya)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川端 弘治 (Kawabata Koji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関