

学位論文要旨

Multi-band Observational Study on Two Nearby Type Ia Supernovae

多バンド観測による2つの近傍のIa型超新星に関する研究

川端 美穂

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、白色矮星の質量がチャンドラセカール限界質量(太陽の約1.38倍)に達すると、中心付近で爆発的な核反応が起きる。その核燃焼波が外側に伝わることにより白色矮星の大部分が瞬時に燃焼し、 10^{51} ergもの膨大なエネルギーで星全体を吹き飛ばす。このように白色矮星は特定の初期条件を持つため、爆発時の性質は似通っており、Ia型超新星の性質も同様となる。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知られており(Phillips 1993など)、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て、遠方宇宙で出現したIa型超新星の光度変化から、真の光度を見積もり、超新星や親銀河までの距離を推定することができる。このことは、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など)。それにも拘らずIa型超新星の親星について、伴星(主系列星か赤色巨星)からの質量降着で爆発を引き起こすのか(Single Degenerate; SDシナリオ)、二つの白色矮星の合体によるもの(Double Degenerate; DDシナリオ)なのかという問題の決着はついていない。爆発メカニズムに関しても、核燃焼波の伝わり方はよく判らないままである。これらの未解決問題の手がかりを得るため、近傍銀河に現れた2つのIa型超新星についてそれぞれ別の手法を用い、研究を実施した。

一つ目は、特異なIa型超新星の長期観測に基づいた爆発モデルの研究である。最近になり、Ia型超新星と分類される超新星の中でも極大時の光度が期待される値よりも1等以上暗い特異なIa型超新星が見つかってきた。この特異なIa型超新星は“Iax型超新星”と呼ばれている(Foley et al. 2013など)。Iax型超新星は暗いだけでなく、放出物質の速度が遅い、初期は明るめのIa型超新星に似た高温のスペクトルを示す、といった特徴が知られている。このようなIax型超新星はIa型超新星の極端なケースである可能性も指摘され、精力的に研究が進められつつあるものの、その爆発モデルは依然、未解決なままである。また、本質的に暗いため、早期の発見や長期に亘る観測が困難であり、観測データは不足したままの段階にある。我々は2014年10月末に近傍銀河に現れたIax型超新星SN 2014dtに対し、広島大学1.5mかなた望遠鏡、大阪教育大学51cm望遠鏡を用いた早期の密な観測と、すばる8.2m望遠鏡を用いた後期の詳細な観測を組み合わせることで、発見3日後から約410日に亘る長期観測を行うことができた。Iax型超新星において多バンドでこれだけの長期に亘るデータ・サンプルが得られた例は初である。私はその観測からデータ解析の全般を主導して行った。この超新星は爆発後~100日頃から光度がゆるやかに変化し、今まで観測されてきたIax型超新星の中でも、最も遅い光度変化を示すことが判った。可視・近赤外線データを取得したことにより、広波長帯域でのスペクトルエネルギー分布の時間変化を得ることができたが、その結果、40日ごろの光球温度は5000Kで、徐々に温度は下がっていったものの、~100日以降は3700Kとほぼ一定を保った。また、後期のゆるやかな光度変化は超新星からの放出物質の密度が高いことを示しており、温度がほぼ一定であったことを加味すると、殆ど膨張することなく中心付近に密度が高い状態を保つような領域、つまり白色矮星の残骸が残っていることが示唆された。得られた総輻射光度変化と、解析的な光度変化モデルを組み合わせることで、爆発時に生成した放射性元素 ^{56}Ni の質量、運動エネルギー、放出物質の質量の3つの物理パラメータを推定した。この光度変化モデルは、 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ の放射性崩壊に伴うガンマ線及び陽電子が持つエネルギーの一部を放出物質が吸収し、熱化することに

よって、総輻射エネルギーが発生することを仮定している。極大頃の光度曲線のピークの幅が、ガンマ線が放出物質内に行き届くのにかかる時間に対応し、放出物質の不透明度、質量、運動エネルギーで表される (Arnett 1996)。今回得られた ^{56}Ni の質量、運動エネルギー、放出物質はそれぞれ 0.04–0.10 太陽質量、 $(0.07\text{--}0.42)\times 10^{50}\text{erg}$ 、0.08–0.35 太陽質量であった。これらは典型的な Ia 型超新星よりも小さく、爆発エネルギーが小さいため白色矮星全体を吹き飛ばすことができず、放出物質の質量が小さく留まったと考えられる。白色矮星の一部かつ吹き飛ばされずに残骸として残っていると考えると、得られた観測的特徴を説明することが可能である。中心付近に残骸が残っていること、爆発エネルギーや放出物質が少ないことは、Iax 型超新星の爆発モデルの中で“残骸を残すような弱い爆然波モデル”で予想されている描像と一致する。この残骸を残すような弱い爆然波モデルでは、核燃焼波が亜音速で白色矮星の中を伝搬し爆発するが、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) は吹き飛ばされずに残るというモデルである。本研究によって、残骸を残すような弱い爆然波モデルで予想される特徴を観測的に初めて捉えることができた。このモデルは伴星から主星への質量輸送を前提とする SD シナリオに基づいている。

二つ目として、典型的な Ia 型超新星の爆発のごく初期の観測に基づいた親星の研究である。Ia 型超新星の 2 つの親星シナリオにおいて SD シナリオでは、連星系を成す伴星の物質が白色矮星に降り積もるが、降着の過程で重力圏から抜けだした物質 (星周物質) が連星系の周囲に存在すると考えられる。一方、DD シナリオでは、白色矮星が 2 つ形成された後、衝突合体するまでに非常に長い時間がかかる。そのため、合体時には星周空間の物質はほとんどなくなり、超新星爆発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る。そのため、DD シナリオでは、SD シナリオで予想されるような星周物質による兆候は見られないと予想される。本研究では Ia 型超新星の親星シナリオを見分ける手法として、爆発直後の観測に注目し、伴星及び星周物質による兆候が見られるかどうか検証を行った。爆発直後の時期に、爆発時に生成された ^{56}Ni をエネルギー源とする放射以外にも、伴星との相互作用による放射が見られる可能性が指摘されている (Kasen 2010 など)。超新星からの放出物質が伴星に衝突し、その衝突によって伴星が温められ、その後、膨張することによって伴星は冷えていく。時間が経つにつれてこの放射は次第に暗くなっていくと予想される。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、伴星との距離や伴星の半径の推定が可能となる。濃い星周物質がある場合にも、時間変化スケールが異なるものの同様の放射が見えると予想されている (Piro & Morozova 2016 など)。Ia 型超新星において、爆発直後の観測例は増えつつあるものの、多バンド観測が行われた例は数少なく、親星シナリオへの制限するためにさらなる観測例の増加が望まれている。我々は 2017 年 6 月に近傍銀河に現れた典型的な Ia 型超新星 SN 2017erp について、かなた望遠鏡によるごく初期からの可視光観測を行った。また、紫外域でのデータが重要となるため、Swift 衛星で取得された紫外域でのデータ解析を行うことで、爆発 4 日以内から多バンドでの光度変化を得ることができた。SN 2017erp は、極大光度付近では典型的な Ia 型超新星と似た光度やスペクトルを示したものの、爆発からの増光時間は典型的な Ia 型超新星よりも長いことが判った。これは、ごく初期に ^{56}Ni 以外の放射成分を伴っていることが考えられ、また得られた色変化からは超新星と伴星及び星周物質との相互作用で説明できることが判った。すなわち、SD シナリオで予想される兆候を捉えることができたと考えている。

本研究によって、近傍に現れた 2 つの Ia 型超新星に対する多バンド観測を重点的に行うことで弱い爆然波モデルが予想する残骸を残す爆発の特徴を初めて捉えることができ、また、典型的な Ia 型超新星のごく初期に伴星ないし星周物質との相互作用の兆候を捉えることができた。これらは DD シナリオを完全に棄却するものではないものの、SD シナリオを支持するような観測的特徴であると捉えることができる。