

## 学位論文要旨

### Study on the Progenitors of Type II Supernovae based on Extensive Observations

#### 長期観測に基づいた II 型超新星の親星に関する研究

中岡 竜也

重力崩壊型超新星は、超新星の爆発形式の 1 つであり、8–10 太陽質量以上の星の進化の最期に起こると考えられている。超新星は一般に、爆発初期のスペクトルに水素の吸収線を示さない I 型超新星と、水素の吸収線を示す II 型超新星に大別される。爆発初期は超新星の密度が十分に高いため、超新星爆発によって吹き飛んだ物質 (イジェクタ) は光学的に厚い。この頃の超新星では、イジェクタの比較的外側の部分に光球が形成されると考えられるため、爆発初期のスペクトルは、爆発の元となった星 (親星) が爆発する際の外層の様子を示していると考えられる。II 型超新星の中で、爆発後数日–100 日程度にかけて、可視光の光度曲線 (ライトカーブ) に光度が一定の期間 (プラトー) を持つ超新星を、IIP 型超新星と呼ぶ。また、初期のスペクトル中に水素とヘリウムの両方の吸収線を示すものを IIb 型超新星と呼ぶ。

近年の観測で、これらの超新星が爆発する前の画像が取得されている例が増えてきた。その親星の色や明るさから、恒星進化を仮定することにより、親星の特性が徐々に分かってきた。IIP 型超新星の親星は赤色超巨星であり、これはスペクトルに水素の吸収線を示すことと矛盾していない。また IIb 型超新星の親星が捉えられた例は極めて少ないものの、伴星を伴った黄色超巨星であるとの報告例がある。これらの II 型超新星の親星の質量は 8–20 太陽質量と見積もられている。赤色超巨星は単独星の進化において、8–25 太陽質量の恒星が経ると考えられている。20–25 太陽質量の赤色超巨星の観測例は未だなく、II 型超新星の未解決問題の 1 つとなっている。20–25 太陽質量の親星は、これまでの研究で親星の素性が分かっていない、特異な II 型超新星となる可能性がある。

特異な II 型超新星の候補天体として、爆発後すぐに減光する天体が近年見つかってきている。これらの天体は “Rapidly-Evolving Transients (RETs)” と呼ばれ、爆発後数日で極大光度に達し、その後数日–十数日で光度が半分になる天体が多い。これらの天体の爆発メカニズムはよく分かっておらず、早い減光の原因は不明である。また、すぐに減光するためスペクトルの情報が詳しく得られておらず、型分類もまだなされていない。これらのことから、RETs の親星についての情報は未だほとんど得られていない。RETs の観測例は少ないため観測例を増やすことが重要だが、減光スケールが速いため、爆発後すぐに観測する必要がある。

また、いくつかの II 型超新星で、イジェクタと星周物質の相互作用の兆候を示す天体が見つかっている。この星周物質は、親星の星風によって爆発前に星周空間へ放出されたと考えられている。この星周物質の量を、星風の速度等を仮定して見積ると、超新星爆発直前に大量の質量放出があったことが示唆される。親星が爆発前に外層を大量に吹き飛ばすメカニズムは分かっておらず、星周物質を探ることが親星の進化を理解する上で重要である。しかし、この相互作用が見られる期間は爆発後～数日以内に限られており、現象を捉えるためには爆発後の素早いフォローアップ観測が要求される。

これらの爆発直後に特異な現象を起こす天体を観測し、爆発メカニズムや大質量星である親星の情報を得るため、我々は広島大学所有かなた望遠鏡を用いて、II 型超新星を発見後なるべく速やかに観測した。かなた望遠鏡は大学所有の望遠鏡のため、観測可能時間が豊富にあることから、多数の超新星を観測することができる。またそのフレキシブルな観測体制により、発見報告を受けてから速やかに観測を開始することが可能である。我々は 23 個の II 型超新星を、測光と分光の観測手法を用いて、爆発直後からプラトー終了後まで観測を行った。この結果、SN 2016bkv と SN 2017czd について、特異なふるまいを示すことが分かった。この 2 天体を詳しく解析し、爆発パラメータや親星の情報を導出することで、II 型超新星の親星に関し、未だ不明となっている問題を探ることを目指した。

我々はまず、低光度 IIP 型超新星 SN 2016bkv について、初期からプラトー終了時 (~150 日) まで観測を行った。低光度 IIP 型超新星とは、典型的な IIP 型超新星より ~2 等程度暗く、爆発エネルギーや膨張速度が半分程度の超新星である。低光度 IIP 型超新星の親星の質量については、軽い親星 (~8-13 太陽質量) が爆発したシナリオと、重い親星 (~15-25 太陽質量) が爆発したシナリオの 2 つが代表的であるが、低光度 IIP 型超新星の観測例が少ないこともあり、詳しいことは分かっていない。我々の観測の結果から、SN 2016bkv のイジェクタ質量は、これまでによく観測された低光度 IIP 型超新星 SN 2003Z よりも ~2 倍程度大きいことが分かった。このことから、SN 2016bkv は重い親星が爆発した可能性が高いと考えられる。また、SN 2016bkv は、爆発初期に山なりの光度変化を示し、同時期の可視光スペクトルには II 型超新星特有の水素の吸収線が見られず、代わりに幅の狭い水素の輝線が見られた。これらの特徴は、イジェクタと星周物質の相互作用が起こった場合に見られる特徴に合致している。このシナリオに基づいて親星が爆発前に放出した物質を推定すると、毎年  $1.7 \times 10^{-2}$  太陽質量もの物質を星周空間へ放出していたという結果が得られた。この質量放出率は、我々の銀河にある典型的な赤色超巨星よりも 1000 倍以上大きいものであり、SN 2016bkv は爆発直前に活発な質量放出を行ったと考えられる。

次に、我々は光度進化の速い超新星 SN 2017czd 観測を行った。SN 2017czd はスペクトルに水素の吸収線を示すため II 型超新星に分類されたものの、爆発 ~20 日後に急減光を示した。その後 ~20 日間における減光量は 4.5 等で、他の典型的な超新星よりも圧倒的に速い。V バンド (波長 550 nm) の絶対等級は -16.8 等で、他の RETs と同程度か少し暗い。SN 2017czd のスペクトルは爆発直後は水素の吸収線を示し、IIP 型超新星のスペクトルに似ていたが、爆発 ~15 日後のスペクトルは IIb 型超新星のスペクトルに似ている。これらの特徴から、我々は IIP 型超新星及び IIb 型超新星の親星モデルを用いることで、SN 2017czd の観測特性の説明を試みた。IIP 型超新星の親星を仮定した場合、その早い進化のため、親星は極めて少ない水素外層を持ち、小さい親星半径となる必要がある。これは通常の恒星進化では考えられないことから、連星系で質量交換を伴って進化したと考えるほうが自然に説明できる。我々は IIb 型超新星の親星モデルを用いることで、SN 2017czd のライトカーブが十分に説明可能であると結論づけた。このモデルでは、親星は 16 太陽質量であるが、爆発エネルギーや生成された  $^{56}\text{Ni}$  質量が他の IIb 型超新星と比べて非常に小さく、SN 2017czd が IIb 型超新星の親星の弱い爆発例であると考えられる。他の RETs についても、その一部のライトカーブ進化は同じモデルで説明できる可能性があることが示唆される。

低光度 IIP 型超新星 SN 2016bkv で見つかった爆発直前に大量の星周物質を放出した兆候は、典型的な II 型超新星の親星においても起こり得る可能性を示唆している。典型的な II 型超新星は、超新星本体が明るいため、相互作用の際の光度が相対的に暗くなっており、見えづらい可能性が高い。SN 2016bkv は超新星本体が暗かったため、相互作用の光度が相対的に明るく、際立って捉えられたと考えられる。典型的な II 型超新星の親星における星周物質について、今後の詳細な観測例の蓄積が待たれる。また、SN 2016bkv と SN 2017czd はどちらも放出されたエネルギーや生成された  $^{56}\text{Ni}$  質量は小さかった。一般に、親星の質量が多ければ、爆発エネルギーや生成される  $^{56}\text{Ni}$  質量は大きくなると考えられることから、この 2 つの超新星では、爆発の際に爆発エネルギーや  $^{56}\text{Ni}$  が何らかの機構で失われる必要がある。この現象は爆発の規模が小さかったため、爆発中心付近にある多量のイジェクタが重力を脱することができず、フォールバックして放出されなかったと考えられる。フォールバックする超新星は理論的に予想されてはいるものの、実際にそう同定された観測例は極めて少ない。今回の 2 例はフォールバックによってうまく説明できる可能性がある。より確からしい証拠を得るには、爆発直後の観測に加えて、爆発中心部を直接見透かすことが可能となる、爆発後期 (減光後) の分光観測例が多数求められる。