

大質量ウォルフ・ライエ星を起源とする超新星 SN2022esa —恒星質量ブラックホール形成への示唆—

1. 研究背景

この宇宙には多数のブラックホールが存在する。2015 年以降には、連星ブラックホールを構成する二つのブラックホール同士が合体する際に放出する重力波が検出・観測されるようになり、どのような星がどのような進化を経てブラックホール及び連星ブラックホールを形成するのか、その理解が急激に進展してきた。

太陽の約 30 倍以上の質量をもつ大質量星は、生涯の最期に自分自身の重力によってつぶれてしまい、ブラックホールを形成すると考えられている。強い重力のため、星の外層の放出を伴う超新星爆発は起こらず、このような現象は明るく輝くことは無いと考えられてきた。一方で、宇宙に大量に存在する酸素の起源は、同様の大質量星の少なくとも一部が超新星爆発を起こさないと説明ができない。このように、大質量星の最終進化には多様性があると考えられる。その多様性の起源を探ることは、恒星物理学、突発天体天文学、重力波天文学、宇宙化学進化等、様々な分野にまたがるホットトピックと言える。

2. 目的

太陽の約 30 倍以上の質量をもつ大質量星を起源とした超新星を特定できれば、その観測的性質を詳細に調べることで、このような大質量星の進化や、爆発後に中性子星とブラックホールのどちらを残すのかなどの議論が可能となる。ブラックホール形成の可能性が濃厚であれば、ブラックホールが誕生した瞬間をとらえたことになり、ブラックホール形成に至る恒星進化やその後の進化についての多くの知見が得られると期待される。

太陽の約 30 倍以上の質量をもって生まれた大質量星は、進化の過程で強い恒星風により外層がはぎとられ、太陽の 10 倍程度の質量の炭素・酸素の中心部がむき出しになった「ウォルフ・ライエ星」になると予想されている。炭素・酸素星を起源とする超新星として Ic 型超新星が知られているが、これらはせいぜい太陽の 10-20 倍程度の質量をもって生まれた恒星が、連星相手により外層を引きはがされ、比較的軽い(太陽質量の数倍程度の)酸素・炭素星となって爆発したものだと考えられており、ウォルフ・ライエ星起源ではない。

我々は、「Ic-CSM 型」と呼ばれる Ic 型の亜種に注目している。これらは、初期に一般的な Ic 型超新星と同様のスペクトルを示すが、時間とともに特徴的な振る舞いを示す。大量の炭素や酸素からなる星周物質を持つと考えられるが、これらの星周物質は爆発前の親星がその外層を周囲に放出したものである。つまり、Ic-CSM 型超新星は、大質量ウォルフ・ライエ星を起源とする超新星爆発である可能性がある。

本研究の目的は、新たな Ic-CSM 型超新星候補を見つけ、特定すること。その詳細な解析を通し、親星がウォルフ・ライエ星である決定的な証拠を発見するとともに、その爆発に至る進化を明らかにすることである。

3. 観測・使用装置

我々は、比較的近傍の宇宙で発生した超新星の追観測を行っている。発見・爆発後の数か月程度、比較的明るいフェーズにおいては、せいめい望遠鏡・KOOLS-IFU を用いた分光観測により、超新星のタイプ特定、スペクトル進化の観測を遂行している。その中でも特に興味深い特徴を示したものに対しては、すばる望遠鏡・FOCAS を用いることで、爆発から 1~2 年たったフェーズにおける分光観測を行っている。

Ic-CSM 型超新星に関しては、特にこのような二段階の観測が必要である。まずせいめい望遠鏡で Ic 型超新星を特定することが起点となる。光度曲線の進化等を合わせ、通常の Ic 型と異なる兆候を示す Ic-CSM 型候補を洗い出し、これらが後期のすばる望遠鏡におけるターゲットとなる。以上を通し Ic-CSM 型超新星を特定できれば、これらの分光デー

タ、public に公開されているツヴィッキートランジェント天体探査装置(ZTF)、および小惑星地球衝突最終警報システム(ATLAS)の光度曲線データ、および独自に取得した測光データを合わせ、その超新星の性質や親星進化についての詳細な解析が可能となる。

4. 主要結果

2022年3月12日に発見された超新星 SN2022esa は、当初別グループにより”Ia-CSM”型超新星として報告されていた。我々は、まずせいめい望遠鏡による分光観測から、このタイプ分類が間違いであり、Ic 型と分類されることを示した。さらに、超新星 SN2022esa が通常の Ic 型よりもずっと明るく、長期間輝いたこと、せいめい望遠鏡により取得したスペクトル進化がゆっくりしていたことから、Ic-CSM 型候補としてすばる望遠鏡による観測ターゲットに選定した。これを受け爆発後約 500 日経過したスペクトルをすばる望遠鏡により取得し、二つの望遠鏡で得られたスペクトル進化から、これが Ic-CSM 型超新星であると特定した。

さらに、ZTF 及び ATLAS の光度曲線データの解析から、SN2022esa が約 30 日の周期的光度変動を示すことを発見した(図 1)。このような周期変動を示す超新星は、過去に数例発見されているだけであり、非常に珍しい現象である。その変動の原因にはいくつかの説が提唱されているが、決着はついていない。今回、我々は、周期性の詳細な解析、スペクトルの振る舞い、ワイズ望遠鏡による赤外線データ、VLA 望遠鏡による電波観測結果を合わせ、SN2022esa でみられた周期変動の原因として有力な過程を明らかにし、このことからこれがウォルフ・ライエ星の爆発であることを明らかにした。

主要結果は、以下のようにまとめられる(図 2)。「爆発前の星は大質量ウォルフ・ライエ星であり、もう一つのウォルフ・ライエ星あるいはブラックホールと連星をなしていた。この連星軌道はひしゃげた楕円軌道を持ち、その軌道周期が約 1 年であった。爆発前の連星は約 1 年ごとに周期的に近接し、そのたびに周囲に酸素・炭素からなる外層を放出した。これは爆発前の星の周囲に一定の間隔で並んだ星周物質のリング構造を作り、片方の星が超新星爆発を起こしたのち、超新星爆発により発生した衝撃波がこのリング状の星周物質と一定間隔で衝突することで、周期的に輝いた。」また、その最大光度、総放射エネルギー、スペクトルから測定した放出物質速度等を総合すると、中性子星形成に伴う通常の超新星爆発機構では説明できないエネルギーを伴い、ブラックホールが誕生したと考えられる。また、このような系は、爆発後に連星ブラックホールを作ったか、あるいは将来的に連星ブラックホールになると予想される。

5. 意義・今後の展望

Ic-CSM 型超新星は頻度が少なく、観測例も少ない。このような頻度の低い現象の研究においては、その候補天体の特定が重要であるが、そのためには近傍の超新星を多数、継続的に根気強く観測することが大切である。その点で、せいめい望遠鏡を用いたプログラムは非常に強力であり、今回の成果につながったと言える。

本研究の結果は、ブラックホール誕生の瞬間を光で特定・観測できる可能性を示したもので、ブラックホールの起源解明に向けた重要な成果と言える。今回と同様の観測・解析をさらに多数の Ic-CSM 型超新星に行うことで、ブラックホールを形成する大質量星やその連星系の性質を調べることは、今後の重要な方向性である。

銀河系内や近傍銀河にある、ウォルフ・ライエ星からなる連星には、等間隔のリング状星周構造を持つ例も知られており、SN2022esa を引き起こした連星系の性質と類似している。今回、銀河系内の「星」と銀河系外で発生する「超新星」の対応がついたことにより、今後はそれぞれの分野で蓄積された知見を共有することで、さらなる理解の進展が進むと期待される。

<図表>

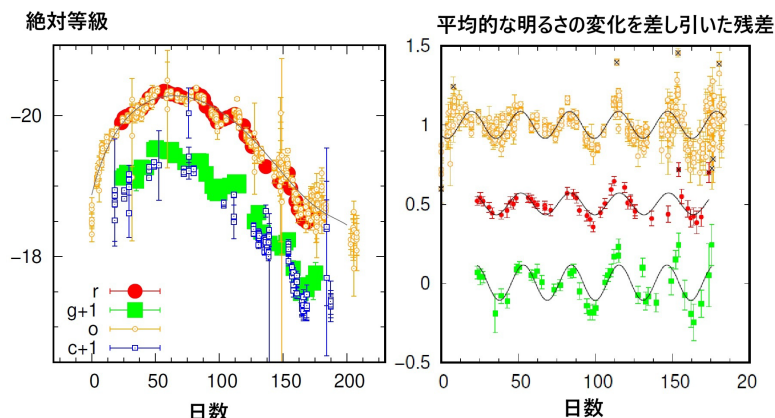


図1:左図は、超新星 SN2022esa の絶対等級の時間進化(光度曲線)を表し、異なる色は異なる観測バンド(波長)における明るさを表す。この解析には、ZTF と ATLAS のデータを用いた。右図は、各バンドの光度曲線のなめらかな成分を差し引いた残差の時間進化を表す、三角関数で表すことのできる、約 30 日周期の規則正しい周期性がすべての観測波長で確認できる。



図2:超新星 SN2022esa の想像図。太陽の 10 倍程度の質量の炭素・酸素からなるウォルフ・ライエ星が、もう一つのウォルフ・ライエ星またはブラックホールと連星をなし、連星の公転運動に伴い等間隔に連なるリング状の(炭素と酸素に富んだ)星周構造を形成したと考えられる(左)。片方のウォルフ・ライエ星が重力崩壊し、ブラックホールを形成するとともに、超新星爆発(SN2022esa)を起こした(中)。超新星爆発で発生した衝撃波は、周囲のリングと一定の時間間隔で衝突し輝くことで、周期的な時間変化を示すとともに、Ic-CSM 型超新星に特徴的な、炭素・酸素の強い輝線スペクトルを作ったと考えられる(右)。

参考文献

題目 Peculiar SN Ic 2022esa: An explosion of a massive Wolf-Rayet star in a binary as a precursor to a BH-BH binary?

著者 Keiichi Maeda , Hanindyo Kuncarayakti , Takashi Nagao , Miho Kawabata , Kenta Taguchi , Kohki Uno , Kishalay De

掲載誌 Publications of the Astronomical Society of Japan

<https://doi.org/10.1093/pasj/psaf140>

(前田啓一(京都大学 理学系研究科 宇宙物理学教室)記)