

ブラックホール誕生の瞬間を超新星で見る

—周期的な明るさの変動を示す超新星の発見—

概要

前田啓一 理学研究科教授を中心とした国際研究グループは、京都大学せいめい望遠鏡・国立天文台すばる望遠鏡などによる超新星の観測を通して、ブラックホール形成の際に超新星爆発が起こり得ること、そのような超新星は特別な性質をもった”Ic-CSM 型”超新星になることを明らかにしました。

太陽の数十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ます。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ました。本研究グループは、せいめい望遠鏡・すばる望遠鏡による観測から、超新星 SN2022esa が特異なタイプの”Ic-CSM 型”超新星であると特定しました。また、その光度曲線の解析から、超新星において過去数例しか知られていない周期的な光度変動を発見しました。これらの結果から、ブラックホール形成に伴い Ic-CSM 型と呼ばれる特異なタイプの超新星爆発が発生することがあることを明らかにしました。本研究結果は、ブラックホール誕生の瞬間を光で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です。

本研究成果は、2025 年 12 月 30 日に、国際学術誌「Publications of the Astronomical Society of Japan Letters」に掲載されました。



超新星 SN2022esa の想像図。超新星爆発を起こした星は、もともとは太陽の数十倍の質量をもっていた星が、激しい恒星風により外層を失い、炭素・酸素からなる中心部がむき出しになったウォルフ・ライエ星であったと考えられる。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星周構造を作ったと考えられる。©前田啓一。

1. 背景

光さえも出てこれないほど重力の強い天体はあるのか？もともと理論的に考察されたブラックホールですが、現在では天文学・宇宙物理学の発展を受け、宇宙に大量に存在することが知られています。ブラックホールと通常の星からなる連星においては、通常の星からブラックホールにガスが流入する際に X 線などの電磁波（光）を出し、主に X 線における観測によりブラックホールの有力な候補天体が知られていました。2015 年以降は、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ました。

一方で、ブラックホールはどのように誕生するのか、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、多くの謎が残っています。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ます。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ました。大質量星が（超新星爆発を起こさずに）突然消えるという現象を探す試みなどが行われていますが、恒星の重力崩壊からブラックホールが誕生する瞬間を間違いなくとらえたとされる例はありません。

2. 研究手法・成果

ブラックホールができる際に、超新星爆発が付随するような例が確認できれば、ブラックホールが誕生した瞬間をとらえたことになり、さらに詳細な観測を行うことが可能です。これにより、どのような星がブラックホールになるのか、ブラックホール誕生の際に何が起こるのかなど、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ます。ブラックホール形成時にガンマ線バーストと呼ばれる高エネルギー現象が引き起こされる可能性などが議論されていますが、ガンマ線バーストは宇宙遠方で発生したものが観測され、可視光での詳細な観測により爆発前の星の詳細な情報を得ることは困難です。

ブラックホールを形成するような（太陽の約 30 倍以上の質量をもって生まれた）大質量星は、進化の過程で自身の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」と呼ばれる高温の星になると予想されています。炭素・酸素からなる星を起源とする超新星として、Ic 型超新星と呼ばれるタイプの超新星が知られていますが、これらはせいぜい太陽の 10-20 倍程度の質量をもつ恒星が、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、中性子星が残されると考えられています。つまり、通常の Ic 型超新星は、大質量ウォルフ・ライエ星の爆発ではないと考えられています。

前田啓一 理学研究科教授を中心とした国際研究グループ（*1）は、Ic 型超新星の中でも特徴的な観測的振る舞いを示す、「Ic-CSM 型」と呼ばれるタイプの超新星に注目しました。これは、初期には一般的な Ic 型超新星と同様の振る舞いを示しますが、時間とともに他の Ic 型とは異なる振る舞いを示す超新星です。研究グループは、2022 年にこのような超新星を発見・報告、その後も複数の例を報告し、Ic-CSM 型という分類を確立しました。Ic-CSM 型超新星は、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超新星であり、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す。つまり、Ic-CSM 型超新星は、大質量のウォルフ・ライエ星を起源とする超新星爆発である可能性が同研究グループらにより指摘されてきました。

本研究グループは、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ます。そのプロジェクトの中で、せいめい望遠鏡を用いて超新星 SN2022esa を分光観測し、これが Ic 型超新星であることを特定しました。しかし、超新星 SN2022esa は通常の Ic 型よりもずっと明るく、かつ長期間輝くという特異なふるまいを見せたため、その正体を探るため、研究グループはさらに時間がたった（爆発後 500 日）後に、すばる望遠鏡による

分光観測を行いました。その結果、SN2022esa が Ic-CSM 型超新星を特徴づけるスペクトル変化を示したことを明らかにし、これが Ic-CSM 型超新星であると特定しました。

研究グループはこの超新星の観測データの解析を進める過程で、SN2022esa の明るさが約 30 日の周期的な変動を示すことを発見しました (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す。その変動の原因は突き止められていませんでした。今回、研究グループは、周期性の詳細な解析、スペクトルの振る舞い、やはり研究グループが解析・報告した赤外線による観測データ、すでに報告のあった電波観測結果を合わせ、SN2022esa で視られた周期変動の原因、及び SN2022esa の起源を突き止めました。

その解釈は、以下のようなものです (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。」爆発前の星は大質量ウォルフ・ライエ星であったと考えられることから、超新星爆発の際にはブラックホールが誕生したと考えられます。また、今回、爆発前に連星をなしていたこと及びその連星軌道の情報も得られ、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ます。爆発前の連星軌道に起因すると考えられる周期変動がとらえられたことで、このような詳細な議論が可能となりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の結果から、少なくとも一部の Ic-CSM 型超新星は、ブラックホール形成に伴う超新星爆発であると結論づけられました。ブラックホール誕生の瞬間を光で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です。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が可能になりました。

銀河系内や近傍銀河にある、ウォルフ・レイエ星やその連星系が知られています。実際に、連星周囲に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よく似ています。今回、銀河系内の「星」と銀河系外で発生する「超新星」の対応が見つかったことにより、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ます。

近年、重力波で多数の連星ブラックホール合体が発見されていますが、そのような連星ブラックホールに至る恒星 (連星) 進化は明らかになっていません。今回発見された天体・同種の天体をさらに調べることで、その起源に迫ることができると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費「国際共同研究加速基金 (海外連携研究) (JP24KK0070)」、「学術変革領域研究(A) (JP24H01810)」、「基盤研究(A) (JP20H00174)」、「基盤研究(B) (JP24K00682)」、JSPS「二国間交流事業 (JPJSBP120229923)」、及びフィンランド研究評議会 (324504, 328898, 353019) の支援を受けて、実施されました。

(* 1) 本研究グループは、本学理学研究科の在籍者・卒業生を中心とした研究グループです。本学からは、長尾崇史（卒業生、研究当時フィンランド・トゥルク大学研究員、現国立天文台特任助教）、川端美穂（京都大学研究員）、田口健太（卒業生、京都大学研究員）、宇野孔起（卒業生、研究当時京都大学研究員、現コロンビア大学研究員）が参加しています。

<研究者のコメント>

「超新星の明るさの周期的変化は、これまでほとんど例がありません。今回、きれいな周期性があることを発見した際には驚きましたが、連星ブラックホール形成へとつながる進化過程という理論解釈を思いつき、むしろ周期性は見えて当然であったと今では思っています。今後も、せいめい望遠鏡による即時分光、すばる望遠鏡による高感度分光を組み合わせた手法により、様々な超新星や突発天体の起源に迫っていきたいと考えています。」（前田啓一）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Peculiar SN Ic 2022esa: An explosion of a massive Wolf-Rayet star in a binary as a precursor to a BH-BH binary? (特異な Ic 型超新星 SN2022esa: 連星ブラックホールの先駆天体としての、連星中での大質量ウォルフ・ライエ星の爆発)

著者：Keiichi Maeda (1), Hanindyo Kuncarayakti (2,3), Takashi Nagao (2,4,5), Miho Kawabata (6), Kenta Taguchi (1,6), Kohki Uno (1), Kishalay De (7,8)

(1) Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

(2) Tuorla Observatory, Department of Physics and Astronomy, University of Turku, FI-20014 Turku, Finland

(3) Finnish Centre for Astronomy with ESO (FINCA), University of Turku, FI-20014 Turku, Finland

(4) Aalto University Metsahovi Radio Observatory, Metsahovintie 114, 02540 Kylmala, Finland

(5) Aalto University Department of Electronics and Nanoengineering, P.O. BOX 15500, FI-00076 AALTO, Finland

(6) Okayama Observatory, Kyoto University, 3037-5 Honjo, Kamogatacho, Asakuchi, Okayama 719-0232, Japan

(7) Department of Astronomy, Columbia University, Mail Code 5246, 538 West 120th Street, New York, NY 10027, USA

(8) The Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, 162 5th Ave., New York, NY 10010, USA

掲載誌：Publications of the Astronomical Society of Japan Letters DOI : 10.1093/pasj/psaf140

< 参考図表 >

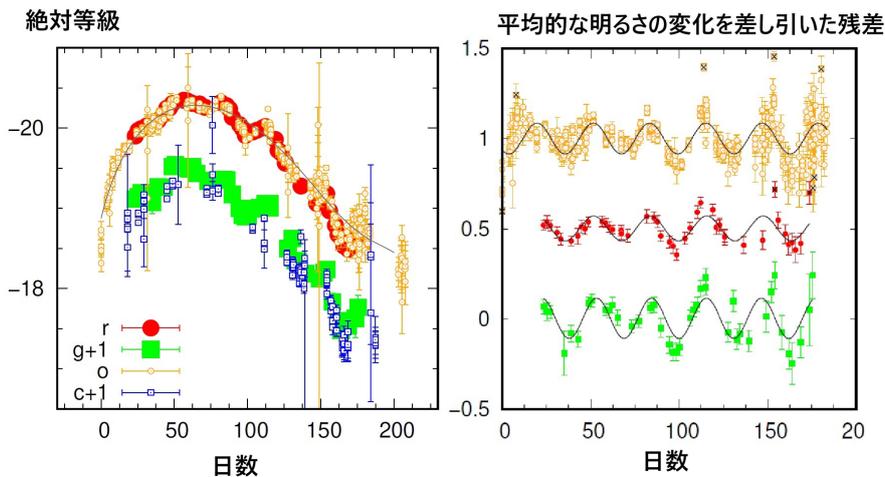


図1：左図は、超新星 SN2022esa の絶対等級の時間進化（光度曲線）を表し、異なる色は異なる観測バンド（波長）における明るさを表す。この解析には、ツヴィッキートランジェント天体探査装置（ZTF）、および小惑星地球衝突最終警報システム（ATLAS）のデータを用いた。右図は、各バンドの光度曲線のなめらかな成分を差し引いた残差の時間進化を表す、三角関数で表すことのできる、約 30 日周期の規則正しい周期性がすべての観測波長で確認できる。



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）。