

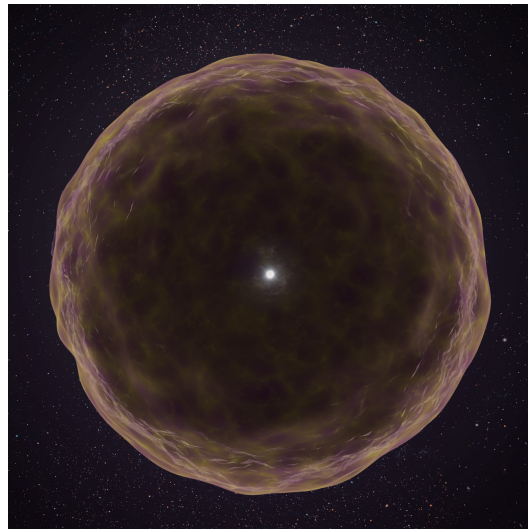
「骨」まで剥き出しになった超新星

—宇宙で稀に見る爆発、元素工場の直接的証拠—

概要

京都大学基礎物理学研究所 武井勇樹 特定研究員、京都大学院理学研究科 前田啓一 教授らの国際研究グループ（アメリカ・ノースウェスタン大学、スウェーデン・オスカークラインセンター、イスラエル・ワイツマン科学研究所ほか）は、外層をほとんど失い、最深部がむき出しになった大質量星が爆発したと考えられる超新星を世界で初めて発見しました。大質量星は水素やヘリウムから始まって、中心部でより重い元素を次々と生成することで玉ねぎのような層構造を形成し、最深部には鉄の核を取り囲むシリコン・硫黄を含んだ層ができることが理論的に予言されてきましたが、この構造を直接的にとらえた観測的証拠はこれまで発見されていませんでした。本研究では超新星 SN 2021yfj から届いた光を波長（色）に「分解」することで、超新星を起こす前の大質量星が爆発のはるか前に軽い元素で構成された外層を失い、爆発時にはシリコンや硫黄に富んだ最深部が露出していたことを発見しました。これは、長年にわたり恒星進化理論の基本とされてきた大質量星の層構造を観測的に明らかにするための、大変重要な一歩です。

本研究成果は、2025年8月20日にイギリスの国際学術誌「*Nature*」にオンライン掲載されました。尚、本論文は今回の号の表紙に選ばれた様です。



超新星 SN 2021yfj の爆発直前の大質量星の様子想像図。外層の大部分が放出されて、シリコンや硫黄を含む中心部がむき出しになっている。©W. M. Keck Observatory / Adam Makarenko

1. 背景

恒星の中心では高温・高密度環境下での核融合によりエネルギーが生成されることで恒星が放出する莫大な光のエネルギーを支えるとともに、より重い元素が合成されます。時間の経過とともに恒星は「進化」し、より

高温・高密になることで中心部ではさらに重い元素が合成され、その周囲を過去の原子核反応により生成された比較的軽い元素からなる層が取り囲むという、玉ねぎ状の層構造を形成します。太陽の10倍から100倍程度の質量を持つ大質量星は、この過程が進むことで最終的に中心部で鉄が合成され、その中心部が崩壊することで超新星爆発やブラックホールの形成が起きると考えられています。

恒星は外層の一部を恒星風と呼ばれる質量放出によって失うことが知られています。これは太陽でも見られる現象であり、時には地球の磁場や大気に影響を与え、通信障害など身近な諸問題にも関わっています。通常、大質量星においてはさらに激しい恒星風が発生し、超新星爆発の直前にヘリウムや炭素・酸素の層が露出していた例が知られていました。しかし、これよりも深い層は未知の領域で、観測により直接中心部を調査することに成功した例はありませんでした。

2. 研究手法・成果

この状況は、2021年9月7日にSN 2021y fjが発見されたことで大きく様変わりします。この超新星は、ツヴィッキートランジェント天体探査装置 (ZTF) により、約22億光年先にある銀河中に発見されました。ZTFはカリフォルニア州サンディエゴ近郊にあり、広視野カメラで夜空全体をスキャンしてトランジェント (突発天体) と呼ばれる電磁波の強度が急激に増大する天体を探知する装置であり、恒星が爆発して急激に明るくなる現象である超新星を効率的に発見しています。

より多くの情報を得るため、チームはSN 2021y fjから到来した光を波長 (色) ごとに分解する分光観測により、スペクトルを取得しました。スペクトルは、超新星に含まれる元素を「色」で特定するための「指紋」のようなものです。その結果、外層が剥がされた大質量星を起源とする超新星爆発で通常見られるヘリウムや酸素、炭素などとは異なり、シリコンや硫黄が放出する強い光が含まれていることが判明しました。これらの重い元素の発見は、星の最終段階に最深部で核融合によって生成されると予測した大質量星進化理論と一致しています。

また、爆発直後のスペクトルには、超新星からの強い光に照らされた「星周物質」 (恒星が爆発直前に放出した物質) の痕跡がみられることがあります。SN 2021y fjの爆発直後のスペクトルからは、やはりシリコンや硫黄に加え、アルゴンなどの重い元素が大量に存在することが明らかになりました。これは、SN 2021y fjを起こした大質量星がその生涯の最後に鉄の核を取り囲むシリコン・硫黄を含んだ層を形成しつつ、激しい質量放出によりその中心核がむき出しにされていたことを意味します。更に、研究グループは、武井勇樹 特定研究員らが開発したオープンソースコード CHIPS を用いたシミュレーションを行い、爆発前に剥がされた層により作られた星周物質と超新星爆発により放出された物質の衝突により、SN 2021y fjから放出される光の時間発展を再現しました。これは、大質量星が爆発の直前に外層のほぼ全てを失ったとするシナリオを追加で支持する結果です。

3. 波及効果、今後の予定

本研究による成果により、大質量星の進化に伴う玉ねぎ構造の形成という、恒星進化理論におけるもっとも基本的な理論の一つに挙げられる枠組みが正しいことが、観測的に証明されました。一方で、外層の大部分が剥がれて中心部がむき出しになるほどの激しい質量放出は予想外であり、これがどのような過程・機構で発生するか、大きな謎を残しました。一般的に考えられている恒星風では、せいぜいヘリウムの層までしか剥ぎ取ることができないため、より内部の層を剥がすための極端なメカニズムを考える必要があります。本研究成果は、今後の理論・観測研究の発展を促す重要な発見といえます。

今回のように中心部近くまで層が剥がされた大質量星が爆発した場合、超新星は短期間で暗くなってしまいうため、トランジェント探索で発見しにくいという課題がありました。幸いなことに、今後視野の広さと感度の良さを兼ね備えつつ、空の同じ領域を毎日のように頻繁に探索する探索計画が次々と開始され、今回発見された超新星に似たタイプの天体が数多く発見されることが期待されます。これにより、爆発前の星が「骨」まで剥き出しにされるような進化経路はどれくらい珍しいものなのか、どのような物理過程によりその激しい質量放出が起こっているのかなどに関し、統計的な視点から明らかにされるでしょう。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費「学術変革領域研究(A) (JP23H04900, JP24H01810)」及び「基盤研究(A) (JP20H00174)」の支援により実施されました。

<研究者のコメント>

「私はこれまで、爆発によって放出された物質が大質量星から剥がされた物質と衝突して明るくなる超新星の研究を楽しんできました。その中で、独自の計算コードを開発して広く研究者へ公開したものが CHIPS と呼ばれるコードであり、本研究でも活躍しました。元々は数値計算が嫌いだったのに、何か目的があってずっとプログラミングを頑張っていたらいつの間にかそれ自体が好きになっていました。不思議ですね。」(武井勇樹)

「ZTFをはじめとする最新の探査観測により、それまで知られていた枠組みに収まらない特徴を示す超新星が次々に発見されていますが、今回のものはその極めつけともいえるものです。超新星や突発天体の研究は急激に発展しており、ベラ・ルービン天文台の LSST 計画という、チリに建設された大口径望遠鏡を用いた大規模探査計画もちょうど動き出しました。今後さらにどのような天体が発見されるか楽しみにしています。」(前田啓一)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Extremely-stripped supernova reveals a silicon and sulphur formation site (極端に外層が剥がれた超新星が明らかにするシリコン・硫黄の形成現場)

著者： Steve Schulze (1, 2), Avishay Gal-Yam (3), Luc Dessart (4), Adam A. Miller (5, 1), Stan E. Woosley (6), Yi Yang (7), Mattia Bulla (8, 9, 10), Ofer Yaron (3), Jesper Sollerman (11), Alexei V. Filippenko (12), K-Ryan Hinds (13), Daniel A. Perley (13), Daichi Tsuna (14, 15), Ragnhild Lunnan (11), Nikhil Sarin (2, 16), Seán J. Brennan (11), Thomas G. Brink (12), Rachel J. Bruch (17), Ping Chen (3), Kaustav K. Das (18), Suhail Dhawan (19), Claes Fransson (11), Christoffer Fremling (20, 14), Anjasha Gangopadhyay (11), Ido Irani (3), Anders Jerkstrand (11), Nikola Knežević (21, 22), Doron Kushnir (3), Keiichi Maeda (23), Kate Maguire (24), Eran Ofek (3), Conor M. B. Omand (13), Yu-Jing Qin (14), Yashvi Sharma (14), Tawny Sit (25), Gokul P. Srinivasaragavan (26, 27, 28), Nora L. Strothjohann (3), Yuki Takei (29, 15, 30), Eli Waxman (3), Lin Yan (19), Yuhan Yao (31, 12), WeiKang Zheng (12), Erez A. Zimmerman (3), Eric C. Bellm (32), Michael W. Coughlin (33), Frank. J. Masci (34), Josiah Purdum (20), Mickaël Rigault (35), Avery Wold (34), Shrinivas R. Kulkarni (14)

(1) Center for Interdisciplinary Exploration and Research in Astrophysics (CIERA), Northwestern University, 1800

Sherman Ave, Evanston, IL 60201, USA

- (2) The Oskar Klein Centre, Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova University Center, Stockholm, 10691, Sweden
- (3) Department of Particle and Astrophysics, Weizmann Institute of Science, 234 Herzl St, Rehovot, 76100, Israel
- (4) Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS-Sorbonne Université, 98 bis boulevard Arago, Paris, 75014, France
- (5) Department of Physics and Astronomy, Northwestern University, 2145 Sheridan Rd, Evanston, IL 60208, USA
- (6) Department of Astronomy and Astrophysics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA
- (7) Physics Department, Tsinghua University, Beijing, 100084, People's Republic of China
- (8) Department of Physics and Earth Science, University of Ferrara, via Saragat 1, Ferrara, 44122, Italy
- (9) INFN, Sezione di Ferrara, via Saragat 1, Ferrara, 44122, Italy
- (10) INAF, Osservatorio Astronomico d'Abruzzo, via Mentore Maggini snc, Teramo, 64100, Italy
- (11) The Oskar Klein Centre, Department of Astronomy, Stockholm University, AlbaNova University Center, Stockholm, 106 91, Sweden
- (12) Department of Astronomy, University of California, 501 Campbell Hall, Berkeley, CA 94720-3411, USA
- (13) Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool Science Park IC2, 146 Brownlow Hill, Liverpool, L3 5RF, UK
- (14) Division of Physics, Mathematics and Astronomy, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA
- (15) Research Center for the Early Universe, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan
- (16) Nordita, Stockholm University and KTH Royal Institute of Technology, Hannes Alfvéns väg 12, 106 91, Stockholm, Sweden
- (17) School of Physics and Astronomy, Tel Aviv University, Tel Aviv, 69978, Israel
- (18) Cahill Center for Astrophysics, California Institute of Technology, MC 249-17, 1200 East California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA
- (19) Institute of Astronomy and Kavli Institute for Cosmology, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HA, UK
- (20) Caltech Optical Observatories, California Institute of Technology, 1200 E California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA
- (21) Astronomical Observatory, Volgina 7, 11060 Belgrade, Serbia
- (22) Department of Astronomy, Faculty of Mathematics, University of Belgrade, Studentski trg 16, 11000 Belgrade, Serbia
- (23) Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan
- (24) School of Physics, Trinity College Dublin, The University of Dublin, Dublin, 2, Ireland
- (25) Department of Astronomy, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA
- (26) Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
- (27) Joint Space-Science Institute, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
- (28) Astrophysics Science Division, NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Rd, Greenbelt, MD 20771, USA
- (29) Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan
- (30) Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

(31) Miller Institute for Basic Research in Science, 468 Donner Lab, Berkeley, CA 94720, USA

(32) DIRAC Institute, Department of Astronomy, University of Washington, 3910 15th Avenue NE, Seattle, WA 98195,
USA

(33) School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, 116 Church Street S.E., Minneapolis, MN 55455, USA

(34) IPAC, California Institute of Technology, 1200 E. California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA

(35) IP2I Lyon / IN2P3, IMR 5822, Universite Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Enrico Fermi, Villeurbanne, 69622, France

掲載誌: *Nature* DOI: 10.1038/s41586-025-09375-3