

ついに観測された理論上の超新星 —明らかになった恒星の終焉の境目—

概要

質量の小さな恒星は白色矮星となり静かにその生涯を終えるのに対し、質量の大きな恒星は超新星として爆発することでその終焉の時を迎えます。しかし、この境目の質量を持つ恒星の運命はよくわかっていませんでした。この境目の恒星は「電子捕獲型超新星」と呼ばれる特殊な超新星として爆発することが約 40 年前に理論的に予測されました。明月記に記録の残る 1054 年の超新星が電子捕獲型超新星であった可能性が指摘されていましたが、電子捕獲型超新星とはっきり分かる超新星は発見されていませんでした。今回、カリフォルニア大学サンタバーバラ校博士課程学生 平松大地氏、京都大学大学院理学研究科 前田啓一准教授、国立天文台科学研究部 守屋堯助教、同 富永望教授、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 野本憲一上級科学研究員らの国際研究グループは、日本のアマチュア天文家によって発見された超新星 2018zd の詳細な観測により、この超新星が電子捕獲型超新星であると結論付けました。この発見は、これまでよくわかっていなかった白色矮星と超新星の運命の境目を明らかにするものです。

本成果は、2021 年 6 月 28 日（現地時刻、日本時間：29 日午前 0 時）に英国の国際学術誌「Nature Astronomy」にオンライン掲載されました。

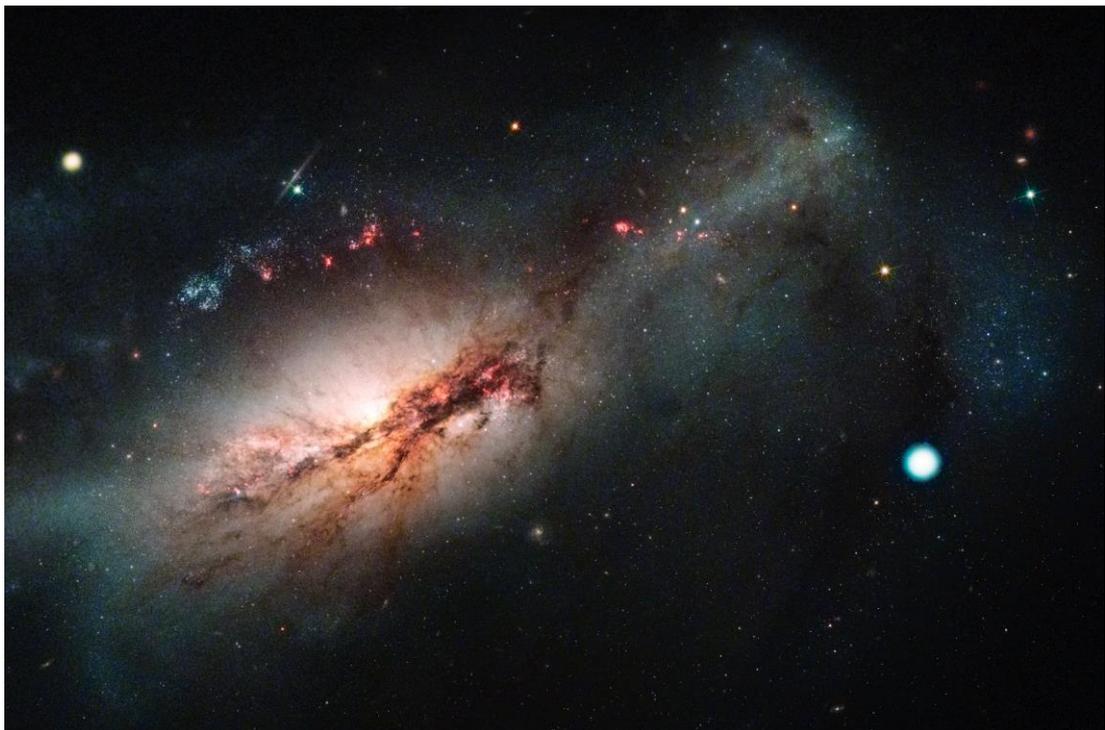


図 1：電子捕獲型超新星 2018zd（右の明るい点）。左には超新星の発生した銀河 NGC 2146 が写っている。
ラスコムプレス天文台（LCO）により取得された超新星 2018zd の画像とハッブル宇宙望遠鏡画像の合成画像
(LCO/NASA/STScI/J. DePasquale)

1. 背景

恒星は内部で核反応を起こすことで長時間自重を支え続けます。質量の小さい恒星は、やがて核反応を続けなくても自重を支えられる白色矮星となって終焉の時を迎えます。質量の大きい恒星は、核反応により中心部で鉄ができると自重を支えきれなくなり、潰れた後に超新星として爆発することが知られています。この境目となる質量は太陽の8倍程度であると考えられています。しかし、この境目付近の質量を持つ恒星がどのような運命を辿るのかは、長い間謎に包まれていました。

この境界付近の質量を持つ恒星は「電子捕獲型超新星」と呼ばれる特殊な超新星を起こすという理論的な予測が、東京大学の野本憲一教授らによって約40年前になされました。境界付近の質量の恒星は核反応進行に伴う鉄コアの生成に至らずに、酸素・マグネシウム・ネオンからなる中心コアを形成し、電子の力により自重を支えるようになります。やがて電子がマグネシウムやネオンに捕獲される電子捕獲反応が起こり、恒星を支える電子が失われることで潰れてしまうと予測されました(参考図2)。その結果、超新星として爆発すると考えたのです。

電子捕獲型超新星の最有力候補としてこれまで考えられていたのは、藤原定家が明月記に記録を残した1054年の超新星でした。記録に残る超新星の位置には現在「かに星雲」が存在します。このため、かに星雲は1054年の超新星の結果できた超新星残骸だと考えられています。かに星雲の質量やエネルギー、そこに存在する元素の量は電子捕獲型超新星の理論から予測される特徴とよく合うことから、1054年の超新星は電子捕獲型超新星であったのではないかと指摘されてきました。しかし、現在多くの超新星探査が世界中の望遠鏡で行われているのにも関わらず、電子捕獲型超新星の特徴を併せ持つ超新星は観測されておらず、本当に電子捕獲型超新星が存在するのかははっきりしていませんでした。

2. 研究手法・成果

2018年3月2日、山形県のアマチュア超新星ハンターである板垣公一氏により、きりん座の方向で爆発直後の超新星2018zdが発見されました。また、千葉県のアマチュア超新星ハンターの野口敏秀氏の観測により、爆発直後の詳細な明るさの変化が記録されました。これを受け、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の博士課程学生である平松大地氏を中心とする観測チームが結成され、世界中の地上望遠鏡と宇宙望遠でこの超新星の詳細な観測が行われました。以上の観測の結果、この超新星は通常とは異なる特徴を多く持っていることが明らかになりました。観測から推定された超新星に含まれる元素の量や爆発エネルギー、星周環境は、電子捕獲型超新星の理論予測と一致するものでした。さらに、偶然にもハッブル宇宙望遠鏡が超新星の現れる前に超新星の場所を観測しており、超新星となった恒星の爆発前の姿を捕らえていたことも判明しました。爆発前のデータから、爆発した恒星は太陽の約8倍の質量を持っていたことも明らかになりました。この結果、超新星2018zdは電子捕獲型超新星が持つと予測された全ての特徴を持った初めての超新星であることが明らかになりました。ついに電子捕獲型超新星が発見されたのです。

白色矮星と超新星の境目は、恒星の理論、核反応の理論、超新星爆発の理論など、様々な理論が交差する部分です。そのため理論予測の不定性も大きく、これまで本当に電子捕獲型超新星が存在しているのかもはっきりしていませんでした。どの質量の恒星が白色矮星となり、どの質量の恒星が超新星となるのか。これは宇宙の元素の起源などを知る上で必要不可欠な情報です。また、超新星は中性子星やブラックホールを残すため、その起源を知るためにもこの境目で何が起こるのかを知ることが必要になります。今回の研究で電子捕獲型超新星が存在することが観測的に示されたことで、恒星進化の全体像の理解に重要なピースが埋まることとなり、これは様々な元素や中性子星の起源に迫るうえでの大きな一歩になると考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

電子捕獲型超新星が初めて捕らえられ、その存在が確かめられました。しかし、電子捕獲型超新星がどのくらいの頻度で発生しているのかはまだはっきりとわかっていません。電子捕獲型超新星の発生頻度は、白色矮星となる恒星と超新星となる恒星の境目をより正確に決めるために必要な情報です。また、電子捕獲型超新星の宇宙の元素合成への寄与を知る上にも重要となります。今回電子捕獲型超新星が発見され、その観測的特徴がはっきりしたことにより、類似の超新星の発見が容易となりました。今回の発見をきっかけに、今後多くの電子捕獲型超新星が同定され、その頻度といった詳細な情報が得られるようになると考えられます。

また、今回の研究では、爆発直後に超新星 2018zd が発見されたことがその正体を明らかにする上で重要な役割を果たしました。これはアマチュア超新星ハンターの板垣氏と野口氏による爆発直後の発見と観測によって初めて可能となりました。世界中の大望遠鏡で超新星探しが行われている現代においても、アマチュア天文家による発見が天文学に大きなインパクトを与えていることが示された重要な結果となりました。

4. 研究プロジェクトについて

関連科研費：JP20H00174, JP20H04737, JP20K04024, JP18H04585, JP18H05223, JP17H02864, JP17K05382

関連研究機関：カリフォルニア大学サンタバーバラ校、ラスクンプレス天文台、京都大学、国立天文台、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

<研究者のコメント（前田啓一）>

野本憲一さん（東京大学）の理論研究が発表されたのが1984年、私がまだ小学生低学年の時です。明月記にも記録されている1054年の超新星の起源として最有力候補ですが、なぜか現在は年間一万個程度発見される（遠くの）超新星の中に対応するものが見つからないという不思議をはらんでいました。このタイプの超新星は非常に暗く見づらく、かつ通常の超新星と区別するためには様々な観測データが必要になります。アメリカで活躍する新進気鋭の天文学者である平松大地さんは、超新星 2018zd が他と異なる振る舞いを見せることにいち早く気が付き、発見後すぐに大規模な観測キャンペーンを開始しました。このことが今回の成果につながる鍵となりました。

同時に、そもそもこの超新星が爆発直後に発見・観測されたことで初めてこのような大規模キャンペーンが可能となりました。これは、日本が世界に誇る超新星ハンターである板垣公一さんと野口敏秀さんのお二人によるものです。また、超新星理論の検証は、超新星がどのように光るかを理解することで初めて可能になり、このような研究が2000年以降非常に発展したことで、今回のような理論の観測的検証が可能になりました。守屋堯さんと富永望さん（ともに国立天文台）は、このような研究で世界の第一線を走る研究者であり、今回、平松さんや私と一緒に観測データを確認して、理論から予測される特徴と突き合わせました。超新星 2018zd の正体として電子捕獲型超新星しかあり得なそうだという結論に近づく過程は、まさに研究のだいご味といった感じで大変エキサイティングでした。

今回は間に合いませんでしたが、2019年からせいめい望遠鏡でも精力的な超新星観測が開始されました。本研究のように既存の例とは異なる特徴の超新星の発見が相次いでおり、せいめい望遠鏡もその進展に大きく寄与しつつあります。

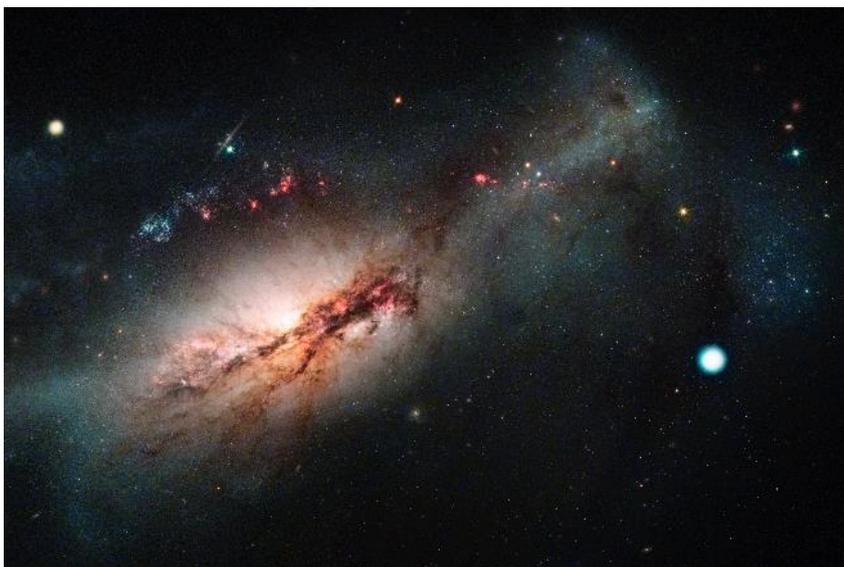
<論文タイトルと著者>

タイトル：The electron-capture origin of supernova 2018zd（電子捕獲による超新星 2018zd）

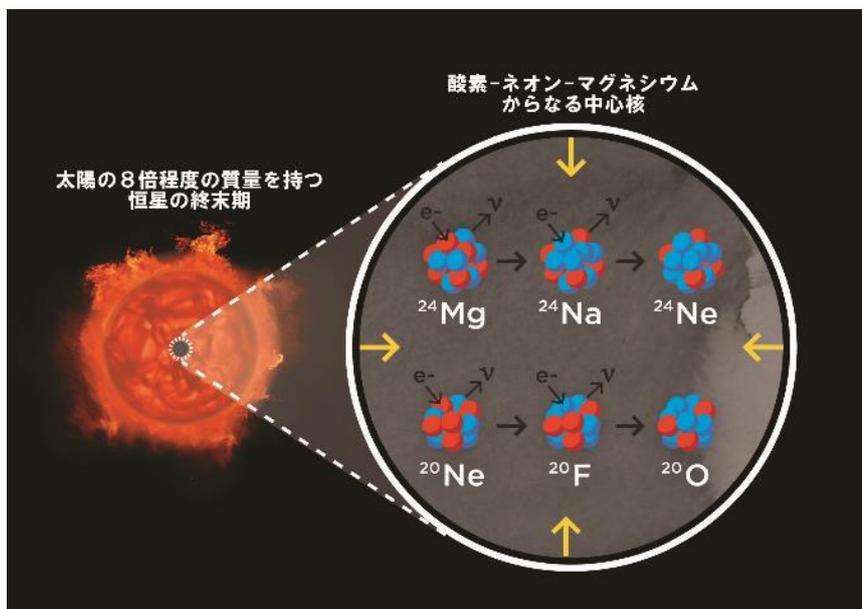
著者：Daichi Hiramatsu, D. Andrew Howell, Schuyler D. Van Dyk, Jared A. Goldberg, Keiichi Maeda, Takashi J. Moriya, Nozomu Tominaga, Ken'ichi Nomoto, Griffin Hosseinzadeh, Iair Arcavi, Curtis McCully, Jamison Burke, K. Azalee Bostroem, Stefano Valenti, Yize Dong, Peter J. Brown, Jennifer E. Andrews, Christopher Bilinski, G. Grant Williams, Paul S. Smith, Nathan Smith, David J. Sand, Gagandeep S. Anand, Chengyuan Xu, Alexei V. Filippenko, Melina C. Bersten, Gastón Folatelli, Patrick L. Kelly, Toshihide Noguchi, Koichi Itagaki

掲載誌：Nature Astronomy DOI：10.1038/s41550-021-01384-2

<参考図表>



図：電子捕獲型超新星 2018zd（右の明るい点）。左には超新星の発生した銀河 NGC 2146 が写っている。ラスクンブレス天文台（Las Cumbres Observatory）により取得された超新星 2018zd の画像とハッブル宇宙望遠鏡画像の合成画像（NASA/STScI/J. DePasquale, Las Cumbres Observatory）。



図：電子捕獲型超新星の元となる星の内部で起こると考えられる電子捕獲反応の模式図（S. Wilkinson; LCO）