

超新星爆発で探る大質量星の終末期



守屋 堯

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈School of Physics and Astronomy, Faculty of Science, Monash University, Clayton, Victoria 3800, Australia〉

e-mail: takashi.moriya@nao.ac.jp

大質量星は超新星爆発を起こすことが知られています。爆発は大質量星の中心部が崩壊することで引き起こされます。このため、中心部からかけ離れた場所にある星の表面では、爆発の前触れは現れないと考えられていました。ところが、近年の超新星爆発の研究から、爆発直前の赤色超巨星では表面からの質量放出率が急上昇している可能性が明らかになってきました。この記事では、超新星爆発を通じて大質量星の終末期の様子に迫ってきた私のこれまでの研究の一部を紹介します。

1. 超新星爆発

超新星爆発は、星が起こす大爆発です。超新星爆発を起こす星として、主に大質量星と白色矮星が知られています。大質量星とは、約8太陽質量以上の質量を持って生まれた星のことです。星は生まれてしばらくは中心部で核反応を起こすことで得られるエネルギーで自重を支え続けます。約8太陽質量よりも小さな質量を持った星は、やがて核反応でエネルギーを得なくても縮退圧で自重を支えることができるようになり、白色矮星となります。特殊な環境下にある白色矮星は超新星爆発を起こすことが知られていますが、この記事では大質量星の起こす超新星爆発に着目します。

約8太陽質量以上の質量を持って生まれた星は縮退圧が十分に大きくなることなく、核反応を続けます。生まれたての星はほぼ水素とヘリウムできていますが、核融合により炭素や酸素といった重い元素を合成していき、やがて星の中心部は鉄で満たされます。鉄は最も安定した元素です。このため、鉄は核反応を起こすことでエネルギーを放出せず、逆に吸収してしまいます。鉄で満たされた星の中心が十分高温になると、吸熱を伴う核反応が起こり、星は自重を支えていたエネル

ギーを突然失い、崩壊をはじめます。この中心部の崩壊の結果、超新星爆発が起こると考えられています。ただ、中心部の崩壊がどのように爆発に至るのかは未だ解明されていない謎の1つです [1]。

大質量星の中心部は徐々に潰れていく一方で、表面は膨張することが知られています。大質量星は太陽の数倍から数十倍の半径を持って生まれます。やがて中心部の水素が核反応によってすべてヘリウムに変換されると、星の外層が膨張し、太陽の数倍から数千倍の半径を持つ赤色超巨星となります。赤色超巨星になった後、数百万年程度経過すると超新星爆発が起こります。大質量星由来の超新星爆発のうち、7割近くが赤色超巨星の状態で爆発していることが知られています [2]。最も有名な赤色超巨星の例はオリオン座に位置するペテルギウスです。私はこれまで赤色超巨星の起こす超新星爆発に着目して、爆発直前の赤色超巨星の様子を探ってきました。この記事では、私のこれまで行ってきた赤色超巨星の起こす超新星爆発の研究と、そこから明らかになってきた爆発直前の大質量星の全く予測されていなかった振る舞いを紹介します。

2. 星周物質と超新星爆発

大質量星は非常に明るく、表面から多くの光が

放出されています。この光によって大質量星の表面の物質は押されるため、大質量星は表面から徐々に質量を失っています。この質量放出は大質量星が誕生してから爆発するまでずっと続きます。標準的な恒星進化の理論計算を行うと、16太陽質量で誕生した大質量星は爆発時に約13太陽質量となり、誕生から爆発までの数千万年の間に約3太陽質量を失うと予測されています [3]。放出された物質は星周物質として大質量星の周りに存在することになります。赤色超巨星の場合、表面から放出された物質は毎秒約10 kmの速さで星から遠ざかっていきます。このため、星のすぐ近くには星から放出されて間もない物質が存在し、より遠くに行くにつれてより昔に放出した物質が星周物質として存在していることとなります。

赤色超巨星の典型的な質量放出率は年間 10^{-5} 太陽質量以下です [4]。このため、例えば爆発の直前100年間に赤色超巨星が放出する物質の量は0.001太陽質量以下であると計算できます。超新星爆発によって爆発する質量は10太陽質量前後ですので、爆発直後に超新星爆発による爆発噴出物が衝突する星周物質の質量は無視できるほど小さく、星周物質が超新星爆発の観測量に与える影響はほとんどないと考えられていました。

しかし、超新星爆発の中には明らかに高密度の星周物質に超新星爆発噴出物が衝突し、長い間その兆候が現れているものも存在します。超新星爆発噴出物が高密度星周物質に衝突すると強い衝撃波が現れ、超新星爆発噴出物の持つ運動エネルギーが熱エネルギーに変換されます (図1)。このため、高密度星周物質を持つ超新星爆発は通常の超新星爆発よりも明るく観測されるようになります。このような超新星爆発は特殊な観測的性質を持ち、大質量星の起こす爆発のうち1割弱しか存在しません [2]。継続的に質量放出率の高いことで知られる高輝度青色激変星といったかなり特殊な大質量星が爆発することで、高密度

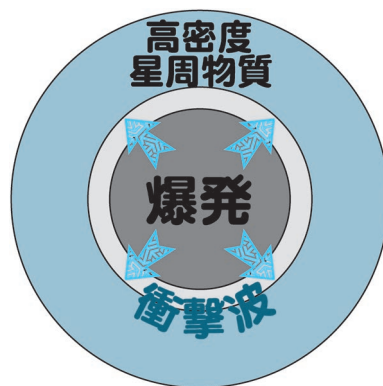


図1 超新星爆発と高密度星周物質の衝突のイメージ図 [5]。強い衝撃波が発生し、超新星爆発を光らせる熱源となります。

星周物質の影響を受けた特殊な超新星爆発が現れると考えられていました [5]。

3. 紫外線超過が見られた超新星 2009kf

私が大学院に入学した2009年頃、超新星爆発の爆発噴出物と高密度星周物質の衝突が超新星爆発の明るさや明るさの変化にどのような影響を与えるかに関する研究はあまりありませんでした。そこで、このような衝突の数値シミュレーションを行い、超新星爆発の観測量への影響を調べる課題を与えられました。当時観測史上最も明るい超新星として知られていた超新星2006gy [6]の観測量を再現することが最終目標でした。今振り返ってみると、初めのうちはあまりよく考えずに様々な赤色超巨星と星周物質の組み合わせで数値シミュレーションを行っていて、目標だったはずの超新星2006gyとはかけ離れたような数値シミュレーションも意図せず多く行っていました。そのおかげで、衝突が超新星爆発の観測量にどのような影響を与えるかが感覚的にわかるようになってきました。

そのような中で、超新星2009kfと名付けられた超新星爆発の観測を報告する論文が発表されました [7]。超新星2009kfはPan-STARRS (パンス

ターズ) というサーベイによって見つけれ、可視光域では平均よりは明るいものの、超高輝度超新星には至らない程度の明るさを持っていました。当時パンスターズは、紫外線宇宙望遠鏡 GALEX (ギャレックス) との協調観測を行っていて、パンスターズで見つかる超新星爆発の紫外線域での明るさを戦略的に調査していました。超新星 2009kf は観測的性質から赤色超巨星の爆発であるのは明らかでしたが、爆発後数十日間にわたって明らかに他の赤色超巨星由来の超新星爆発と比べて紫外線ですっと明るい状態が続いていることが報告されました。

それまでいたずらに多くの衝突の数値シミュレーションを行っていた私は、この論文を見た瞬間に超新星 2009kf で観測された紫外線超過は超新星爆発と高密度星周物質の衝突で説明できると考えました。超新星爆発噴出物と高密度星周物質が衝突する際に発生する強い衝撃波の影響で、衝突の影響を受けた超新星爆発は他の超新星爆発よりも高温の状態になります。その結果、通常の超新星爆発よりも紫外線でより明るくなります。早速いくつか数値シミュレーションを行い、超新星 2009kf をよく再現する結果を得ることに成功しました (図 2)。また、超新星 2009kf を再現するには、

- 1) 爆発直前の赤色超巨星の質量放出率が年間 10^{-2} 太陽質量程度になっていること、
- 2) 高密度星周物質は約 2×10^{15} cm 以内にあること、

が必要であることがわかりました。1つ目の条件は、紫外線の明るさを再現するのに必要な密度からの要請です。2つ目の条件は、爆発後約 60 日後に取られたスペクトルに衝突の兆候が見えていなかったことに由来しました。あまりに長い間衝突が続くとこのスペクトルにも衝突の兆候が見えるはずですが、爆発後 20-30 日間衝突によって紫外線で明るくし、約 60 日後には衝突の影響がないようにするためには、星周物質のうち高密度の部分

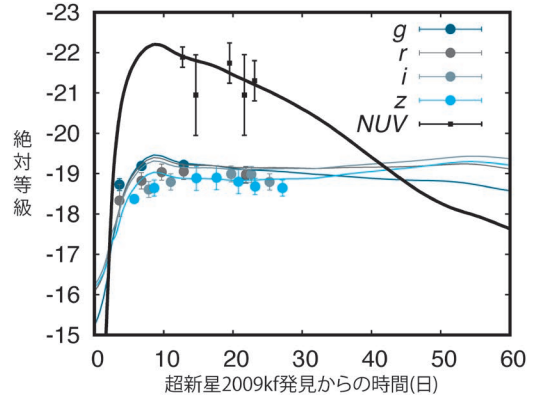


図 2 超新星 2009kf の明るさの変化。点が観測された値で、線が高密度星周物質に超新星爆発噴出物が衝突した場合の数値シミュレーション結果。「NUV」(波長 230 nm 付近) で示された紫外線の明るさをよく再現できています。「g」(波長 500 nm 付近)、「r」(波長 600 nm 付近)、「i」(波長 750 nm 付近)、「z」(波長 900 nm 付近) は可視光での明るさの変化を示しています。

を赤色超巨星のごく近くにのみ留めておく必要がありました。

赤色超巨星は一時的に質量放出率を上昇させることが知られており [8], そのメカニズムも提唱されていました [9]. このため、赤色超巨星の質量放出率が年間 10^{-2} 太陽質量程度になることは不可能ではないだろうという印象でした。しかし、高密度星周物質を 2×10^{15} cm 以内に止めるというのはかなり恣意的な仮定のように感じました。前述の通り、赤色超巨星から放出される物質の速さは毎秒 10 km ほどです。超新星爆発を起こす赤色超巨星 (半径は 10^{13} - 10^{14} cm 程度) の表面から 2×10^{15} cm まで達するのに 70 年ほどかかります。これは、爆発直前約 70 年前から赤色超巨星の質量放出率が非常に高くなる必要があることを意味しています。大質量星が赤色超巨星として過ごす時間は数百万年もあります。超新星爆発の引き金となるのは赤色超巨星の中心部 (10^8 cm 以内) の崩壊である一方で、質量放出は赤色超巨星の表面 (10^{13} - 10^{14} cm) で起こる現象です。赤

色超巨星の中心部での変化が100年以内の時間スケールで表面まで伝わって表面からの質量放出と関係するなどとは当時ほとんど考えられていませんでした。数百万年の間に時々起こるかもしれない赤色超巨星の一時的な質量放出率の上昇が、爆発直前の70年間に偶然起こる確率はほとんどありません。それでも当時はほかに考えられなかったので、赤色超巨星の一時的な質量放出率の上昇が、ものすごい偶然で超新星爆発直前に起こったのだらうという苦しい議論をして、結果を論文にまとめました [10].

4. ショックブレイクアウトを求めて

2011年に超新星2009kfに関連した論文を出版後、赤色超巨星の起こす超新星爆発における超新星爆発噴出物と高密度星周物質の衝突の数値シミュレーションからはしばらく離れていました。一方、この頃から爆発直後の超新星爆発を発見する観測が世界中で精力的に行われるようになりました。これは、超新星爆発の直後に観測されると理論的に予測されていた「ショックブレイクアウト」と呼ばれる現象を捉えることが目的でした。可視光などの電磁波では大質量星の表面を観測することはできません。つまり、外から電磁波で大質量星を観測していても、その星が崩壊したことを知ることができません。中心部で発生した衝撃波が徐々に星の外側に向かっていき、衝撃波が星の表面に達して初めて電磁波観測でも超新星爆発が起こったことがわかるようになります。中心から伝わってきた衝撃波が高密度の星の中から抜け出し、電磁波が衝撃波から解放されて観測可能になる瞬間に一瞬非常に明るくなる現象が起こることが理論的に予測されていました (図3) [11]. この超新星爆発の初めの増光がショックブレイクアウトと呼ばれています。赤色超巨星の起こす超新星爆発の場合、ショックブレイクアウトで明るくなる時間は数時間程度だと予測されています [12].

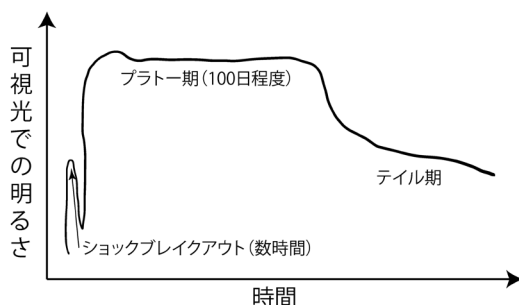


図3 赤色超巨星の起こす超新星爆発で予測されている可視光での明るさの変化の概念図。爆発直後に数時間明るくなる「ショックブレイクアウト」がまず起こります。その後徐々に明るくなり、100日程度明るさがほとんど変わらない「プラトー期」に入ります。プラトー期が終わると一気に暗くなり、その後はテイル期と呼ばれます。

ショックブレイクアウトの継続時間や明るさは爆発する星の半径や爆発エネルギーに依存するため、ショックブレイクアウトの観測によって爆発する星やその爆発の性質を強く制限することができますと考えられています。発生後数時間しか続かないショックブレイクアウトを捉えるべく、一晩に何度も同じ天域を観測する超新星爆発サーベイが行われるようになりました。その結果、爆発直後の超新星爆発が多く発見されるようになりました。しかし、はっきりショックブレイクアウトだといえる一時的な増光現象はほとんど発見されませんでした [13].

一方で、高頻度で同じ天域を観測する超新星爆発サーベイが行われた結果、多くの超新星爆発が爆発後数日以内に発見されるようになりました。その結果、赤色超巨星からの超新星爆発が可視光域で最大の明るさに達するまでの時間が、一般的に理論予測よりもずっと速いことがわかり始めてきました (図4) [14]. これは予想外の結果で、様々な原因が議論されましたが、明確な答えは得られていませんでした。

そのような中で衝撃を与えたのが、2017年に報告された超新星2013fsの観測結果でした [15].

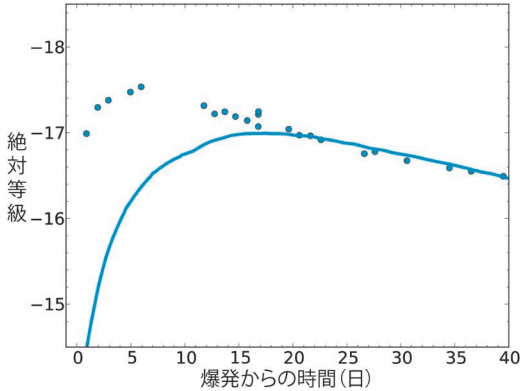


図4 赤色超巨星の爆発である超新星2013fsの可視光 (g バンドと呼ばれる波長500 nm付近)での明るさの変化. 点が観測された明るさで、線が星周物質が存在しないと仮定した場合の数値シミュレーション結果. 観測点は10日以内に最大の明るさに達しますが、数値シミュレーションでは18日程度かかっています. 20日以降の観測は数値シミュレーションでもよく再現されています. スペクトルから判明したように約5日まで高密度星周物質が存在する場合は、約5日まで星周物質との衝突による熱が発生し、その後徐々に冷えていくため、約15日までの明るさの超過が説明できます.

超新星2013fsは爆発の約3時間後に発見されました. 発見した観測グループがその時偶然Keck望遠鏡で観測しており、発見から約3時間後(爆発から約6時間後)という異例の速さでスペクトルが取られました. この爆発直後のスペクトルには、星周物質が高密度である場合に現れると予測されている細い輝線が多く現れていました. この輝線は時間とともに弱くなっていき、爆発後5日程度で消滅しました. また、その後スペクトルは典型的な赤色超巨星由来の超新星爆発のものとなり、爆発直後に発見されていなければよく見つかるごく一般的なつまらない超新星爆発とみなされていたと考えられます.

爆発から約6時間後のスペクトルをもとに爆発した赤色超巨星の爆発直前の質量放出率を推定すると、年間 10^{-4} 太陽質量程度であったことが判明しました. これは、通常の赤色超巨星の質量放

出率よりもずっと高い値です. また、高密度星周物質の兆候である輝線が爆発後5日程度で消滅しました. 超新星爆発噴出物の外縁部の速度が大まかに毎秒10,000 kmですので、超新星爆発噴出物は5日間で大体 5×10^{14} cmまで達します. この半径よりも外側の星周物質は低密度でなければ観測された特徴を説明できません. 赤色超巨星から放出される物質の典型的な速度が毎秒10 kmほどですので、放出された物質が 5×10^{14} cmまで達するには20年程度の時間がかかります. つまり、爆発した赤色超巨星が爆発約20年前から質量放出率を急激に上昇させていれば、超新星2009kfの爆発直後に捉えられたスペクトルの性質を説明できます. 赤色超巨星が爆発数十年前から急激な質量放出率を上昇させるという描像は、前節で私が超新星2009kfに対して主張したものと同じでした.

5. 爆発直後の超新星爆発の観測から明らかになった赤色超巨星の終末期

超新星2013fsのスペクトル解析から判明したほど高密度な星周物質が存在する場合、スペクトルだけでなく超新星爆発の明るさの変化にも大きな影響が現れることが、超新星2009kfの研究から予測されました. 超新星2009kfの論文では爆発直後の明るさの変化には注目していませんでした. そこで、いくつかの赤色超巨星の超新星親星の直近にさまざまな形状や密度の星周物質を置き、それぞれの状態で超新星爆発直後の明るさの変化を定量化することにしました [16, 17]. その結果を図5に示しました. 図5には可視光の波長500 nm付近 (g バンド)で、超新星爆発が爆発後最大の明るさに達するまでの時間と、最大の明るさを示しています. 爆発直前の数十年前から赤色超巨星の質量放出率が年間 10^{-3} 太陽質量程度となったと仮定して得られた数値シミュレーション結果が超新星2013fsの観測を説明できること

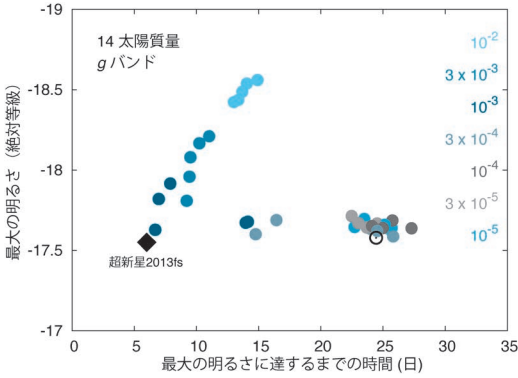


図5 数値シミュレーションから予測される可視光(波長500 nm付近のgバンド)での超新星爆発から最大の明るさに達するまでの時間と最大の明るさの関係。誕生時14太陽質量の赤色超巨星の爆発の場合を示しています。それぞれの点の色は爆発直前の赤色超巨星の質量放出率を示していて、それぞれの色が対応する質量放出率は図中の右上に年間太陽質量の単位で示しています。超新星爆発が 1.5×10^{51} エルグのエネルギーを持つ場合の結果を示しています。色で塗りつぶされていない点は星周物質のない場合の結果です。また、超新星2013fsの観測から得られた値をダイヤモンドで示しています。

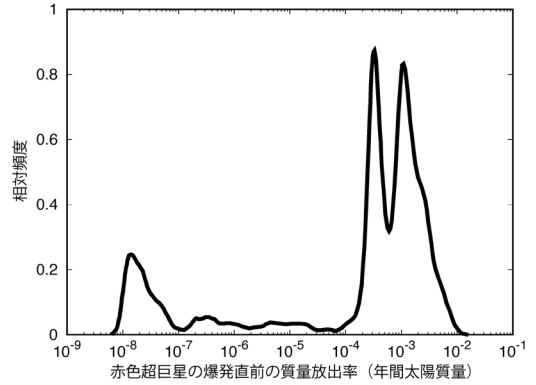


図6 観測された超新星爆発の爆発直後の明るさの変化と数値シミュレーションの比較から得られた赤色超巨星の爆発前数十年間の質量放出率分布。8割以上の赤色超巨星が爆発直前に年間 10^{-4} 太陽質量以上の質量放出率を持っていることがわかります。

がわかります。また、超新星2009kfの場合と同様に紫外線域においても明るかったことが判明しています。赤色超巨星が爆発の数十年前から質量放出率を大幅に上昇させていれば、爆発直後の明るさの変化を再現できるのです。

超新星2013fsの結果は、赤色超巨星由来の超新星爆発が可視光域で最大の明るさに達するまでの時間が一般的に理論予測よりも早い問題の解決策を示すものにもなりました。赤色超巨星の爆発直前の質量放出率の上昇が一般的に起こっていればよいのです。そこで、なるべく多くの爆発直後に発見された赤色超巨星由来の超新星爆発を集め、その明るさの変化から爆発直前の赤色超巨星の典型的な質量放出率を求めることにしました。爆発直後の超新星爆発を発見するサーベイを行っていたチリ大学のグループと協力し、このグ

ループが爆発直後に発見した26個の赤色超巨星からの超新星爆発の観測と、私の数値シミュレーション結果を詳細に比較しました[18]。その結果得られた、爆発直前数十年間の赤色超巨星の質量放出率分布を図6に示しました。8割以上の赤色超巨星が爆発直前に年間 10^{-4} 太陽質量以上の質量放出率を持っており、爆発直前の赤色超巨星のほとんどが劇的な質量放出率の上昇を経験していることが明らかになったのです。

一般的に赤色超巨星が爆発直前に質量放出率を上昇させている場合、ショックブレイクアウトが全然観測できないという点も納得ができます。星の表面でショックブレイクアウトが起きても、その周りに高密度の星周物質があるためです。ショックブレイクアウトの閃光が高密度の星周物質による吸収や散乱を受け、はっきりと見えなくなってしまいます。

また、ここまで紹介した研究結果が正しいとすると、赤色超巨星であるベテルギウスは爆発の数十年前ほど前から質量放出率が年間 10^{-4} 太陽質量以上になるはずですが、ところが現在のベテルギウスの質量放出率は年間 10^{-6} 太陽質量程度です[19]。このため、ベテルギウスの爆発は少なくとも

もこれから数十年は起こらないだろうと考えられます。ちなみに、ベテルギウスを囲む星周物質の形状から、ベテルギウスは赤色超巨星になったばかりだと推定した研究も存在します [20]。これが正しいとすると、ベテルギウスの爆発まではまだ百万年以上かかることになります。

6. まとめとこれからの課題

これまでの研究により、赤色超巨星は爆発数十年前まで年間 10^{-5} 太陽質量以下の質量放出率を持ち、何らかの理由で爆発直前数十年前から質量放出率が年間 10^{-4} 太陽質量以上に急上昇することが一般的に起こっていることがわかりました。しかし、赤色超巨星の爆発は中心部の崩壊によって引き起こされますが、質量放出は赤色超巨星の表面で起こる現象です。最初にも述べた通り、数十年の時間スケールで星の中心部での変化が星の表面での現象に影響を与えるとはこれまでの恒星進化理論の枠組みでは全く考えられていませんでした。どのようにして崩壊に向かう星の中心部の進化が星の表面の質量放出を誘発しているのか。この物理機構を明らかにすることが今後の大きな課題の1つとなっています。現在例えば星の終末期に中心部で非常に強くなる対流運動がきっかけとなり、星の外層に伝わるような波が発生し、そのエネルギーが星の表面で開放されて質量放出が起きるといった理論が提唱されています [21]。しかし、まだ理論の不定性も大きく、観測的な証拠にも乏しい状態です。

この質量放出機構を知るうえで、まだまだ超新星爆発の観測から得られる情報や、明らかにすべきことも残っています。まず赤色超巨星からの超新星爆発に関して、明るさの変化から推定される星周物質の密度と、スペクトルから推定される星周物質の密度に大きな違いがあることが判明しています [16]。前述の超新星 2013fs の場合、スペクトルから見積もられた質量放出率が年間 10^{-4} 太陽質量程度であったのに対し、明るさの

変化から見積もられた質量放出率は年間 10^{-3} 太陽質量程度程度であり、1桁の違いがあります。この違いは赤色超巨星直近の高密度星周物質の構造がまだはっきりとわかっていないことに由来すると考えられます。星周物質の構造をはっきりさせることで、質量放出を起こす物理機構に強い制限が与えられることが期待されます。

また、ここまでは赤色超巨星の起こす超新星爆発の話をしてきました。爆発を起こす大質量星として、水素を含まないウォルフ・ライエ星と呼ばれる星も存在します。赤色超巨星の終末期に起こっている急激な質量放出率の増加がウォルフ・ライエ星でも起こっているかを知り、大質量星終末期の質量放出機構を知るうえで重要になってくると考えられます。ウォルフ・ライエ星は表面から放出される物質の速度が秒速 1000 km 程度と赤色超巨星の場合（秒速 10 km 程度）と比べると2桁ほど大きくなっています。このため、ウォルフ・ライエ星の表面から赤色超巨星と同じ質量放出率で物質が放出されても、星周物質の密度は2桁ほど低くなってしまいます。星周物質の密度が低いため、超新星爆発の観測量に与える影響も比較的小さく、ウォルフ・ライエ星の終末期の様子を探ることは赤色超巨星の場合と比べて難しくなります。しかし、アルマ望遠鏡を使うことで、ウォルフ・ライエ星の場合にも赤色超巨星と同じような終末期の質量放出率の上昇が起こっている可能性が少しずつ明らかになってきています [22]。

謝辞

草稿に有益なコメントをいただいた天文月報編集委員の勝田哲氏に感謝いたします。私のこれまでの研究を支えてくださった多くの皆様に感謝いたします。特に大学院生時代から様々な議論に付き合っていたいただいた前田啓一氏、富永望氏、田中雅臣氏、Sergei Blinnikov氏に感謝いたします。今後ともよろしく願っています。

参考文献

- [1] 滝脇知也, 2017, 天文月報, 110, 710
- [2] Shivvers, I., et al., 2017, PASP, 129, 054201
- [3] Sukhbold, T., et al., 2016, ApJ, 821, 38
- [4] Mauron, N., & Josselin, E., 2011, A&A, 526, A156
- [5] 守屋堯, 2014, 天文月報, 107, 107
- [6] Ofek, E. O., et al., 2007, ApJ, 659, L13
- [7] Botticella, M. T., et al., 2010, ApJ, 717, L52
- [8] Smith, N., et al., 2009, AJ, 137, 3558
- [9] Heger, A., et al., 1997, A&A, 327, 224
- [10] Moriya, T., et al., 2011, MNRAS, 415, 199
- [11] Colgate, S. A., 1968, Can. J. Phys. Supplement, 46, 476
- [12] Tominaga, N., et al., 2011, ApJS, 193, 20
- [13] Förster, F., et al., 2016, ApJ, 832, 155
- [14] González-Gaitán, S., et al., 2015, MNRAS, 451, 2212
- [15] Yaron, O., et al., 2017, Nature Physics, 13, 510
- [16] Moriya, T. J., et al., 2017, MNRAS, 469, L108
- [17] Moriya, T. J., et al., 2018, MNRAS, 476, 2840
- [18] Förster, F., et al., 2018, Nature Astron., 2, 808
- [19] Huggins, P. J., et al., 1994, ApJ, 424, L127
- [20] Mohamed, S., et al., 2012, A&A, 541, A1
- [21] Quataert, E., & Shiode, J., 2012, MNRAS, 423, L92
- [22] Maeda, K., et al., 2021, ApJ, 918, 34

Death Throes of Massive Stars Revealed by Supernovae**Takashi J. MORIYA**

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan & School of Physics and Astronomy, Faculty of Science, Monash University, Clayton, Victoria 3800, Australia

Abstract: Massive stars eventually explode as supernovae. The explosions are triggered by stellar core collapse. It has been believed that nothing occurs at the surface of exploding stars, because the surface is very far from the collapsing stellar core. Recent supernova studies are revealing that mass-loss rates of red supergiants suddenly increase just before their explosions. In this article, I will introduce my research that revealed the death throes of massive stars through supernovae.