

# 星周物質と相互作用する超新星

守屋 堯

〈ボン大学 アルゲランダー天文学研究所 Auf den Hügel 71, D-53121 Bonn, Germany〉

e-mail: moriyatk@astro.uni-bonn.de



爆発を起こす大質量星の正確な理解は、宇宙の見識を得るためには必要不可欠である。近年、高密度星周物質と相互作用している超新星（II型超新星、超高輝度超新星）が大質量星進化の観点から注目を集めている。このような超新星の光度曲線を理論的に求め、観測された光度曲線と比較することでその親星の質量放出率を見積もってみると、現在の標準的な恒星進化理論で爆発すると考えられているどの星の描像にも合わないことがわかった。このため、理論的には爆発しないと思われる星（高輝度青色激変星）が爆発しているか、爆発直前の星に未知の大規模質量放出のメカニズムが働いていると考えられる。爆発する高輝度青色激変星の理論も現れ始めているが、まだこれらの超新星の性質を説明できるには至っていない。また、高密度星周物質の存在は超新星残骸にも影響を与え、高密度星周物質をもつ超新星は再結合プラズマをもつような超新星残骸になると考えられる。高密度星周物質をもつ状態で爆発する星は、現在の恒星進化理論に欠けているピースを握っており、その正体を知ることは恒星進化理論の重要な課題である。

## 1. 大質量星の進化と質量放出

恒星は宇宙空間に電磁波を放出している最も基本的な天体である。夜空に望遠鏡を向けて捉える光のほとんどは、恒星から出た光であるといっても過言ではない。例えば、銀河を全体として輝かせているのは銀河を構成している星々である。さらに、恒星の中でも大質量のものは爆発をして超新星となるため、星の中で合成される主に原子番号が炭素より大きい元素を宇宙空間に供給する源となっている。このため、大質量星の進化と、最終的に引き起こされる超新星爆発の理解は、宇宙の現在の姿を正確に理解することにはもちろん、宇宙の歴史を知るうえで必要不可欠である。ここでは、近年の超新星研究から明らかになってきた、爆発を起こす大質量星の謎の一つと、それに迫っているわれわれの研究を簡単に紹介したい。

初期質量が約8太陽質量以上の大質量星はその

進化の最後に中心が自重でつぶれ（重力崩壊）、それが引き金となって超新星として爆発すると考えられている。しかし、このような大質量星は、生まれたときにもっていた質量を保持したまま爆発するわけではない。特に大質量星は、質量が大きい分、明確にいために輻射圧が強く、自らの質量を失いながら重力崩壊の時に近づいていく。そのため、重力崩壊を起こし爆発する大質量星は、スカスカの星間空間の中で爆発を起こすわけではなく、爆発に至る過程で自ら放出した物質中で爆発を起こすのである。

では、具体的にはどのくらいの質量を失った状態で星は爆発するのであろうか？ これは例えば超新星を電波で観測することによって推定することができる。爆発の際に生じ、星周物質中を進んでいく衝撃波面で加速された電子のシンクロトロン放射によって、超新星は電波領域で光っている。この放射をモデル化することにより、典型的

な重力崩壊型超新星親星は爆発直前に年間約 $10^{-6}$ から $10^{-5}$ 太陽質量の割合で質量放出をしていることが明らかになっている<sup>1)-3)</sup>。また、恒星進化理論から予想される爆発直前の親星の質量放出率も同程度であり、最大でも年間約 $10^{-4}$ 太陽質量程度の質量放出率であると考えられている<sup>4),5)</sup>。

## 2. 高すぎる質量放出率—II型超新星

ところが、このような標準的な大質量星の質量放出の枠組みから大きく外れていると考えられている超新星が存在する。II型超新星と呼ばれる超新星である。数ある超新星の型分類の中でも、「II型」は1990年に初めて提唱された、比較的新しいものである<sup>6)</sup>。超新星で「II型」と呼ばれるものは、観測されるスペクトルに水素を含んでおり、大質量星が水素層をもったまま爆発したものであると考えられている。その中でも「II型」は、非常に細い(narrow)水素輝線が存在する超新星のことを指す(図1)。この細い輝線はいくつかの成分からなっており、その放射機構にはよくわかっていない部分が多い。しかし、スペクトルを高い分解能で観測すると、約 $100 \text{ km s}^{-1}$ という、超新星の爆発噴出物由来にしてはあまり

に遅すぎるP Cygniプロファイル<sup>\*1</sup>が観測されるため、超新星を取り巻く星周物質の存在が細い輝線と関連づけられている。さらに輝線が強いことから、II型超新星は密度の高い星周物質中で大質量星が爆発することで現れる超新星であると考えられている<sup>9)</sup>。

では、II型超新星の星周物質はどのくらいの密度なのであろうか？ 星周物質の密度は親星の質量放出率と質量放出の速度で決まる。先ほど紹介したP Cygniプロファイルから質量放出の速度は大体わかっているため、星周物質の密度は主に質量放出率によって決まると考えて良い。単純に質量放出率が高ければ高いほど、星周物質の密度も高くなるというわけである。つまり、星周物質の密度がどのくらいなのかという問いは、その親星の質量放出率がどのくらいなのかという問いになる。前節では、衝撃波面からのシンクロトロン放射で親星の質量放出率が見積もられることを紹介した。しかし、質量放出率が非常に高く、星周物質の密度があまりに高いと、シンクロトロン自己吸収やまだ衝撃波が達していない星周物質中の制動吸収の効果が強くなり、放射された電波が観測者まで届きにくくなる。このため、II型超新星は特に爆発直後にほとんど電波では光っておらず、ほかの方法を用いる必要がある。

超新星の爆発噴出物は、星周物質に衝突することで減速されながら広がっていく。通常の超新星親星の質量放出率では、爆発後数百年間は減速の影響は少なく、減速による超新星の観測への影響はほとんどない。しかし、II型超新星のように高密度な星周物質中で超新星爆発が起こると、この影響が無視できなくなり、爆発噴出物が爆発直後から効率的に減速を受ける。この高密度星周物質による減速によって、爆発噴出物のもつ運動エネルギーが効率的に熱エネルギーに変換され、輻射エネルギーとして放出される(図2)。その

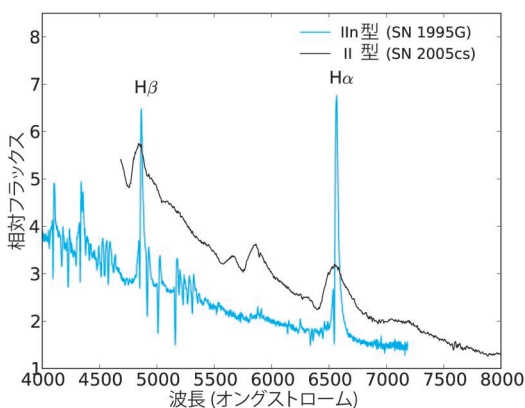


図1 II型超新星1995G<sup>7)</sup>とII型超新星2005cs<sup>8)</sup>のスペクトル。

\*1 膨張している物質を外から観測したときに得られる特徴的なスペクトルの形。



図2 IIn型超新星のイメージ

ため、IIn型超新星を光らせている主な熱源は、他の超新星のように爆発時の余熱や<sup>56</sup>Niの放射性崩壊熱ではなく、超新星爆発噴出物の運動エネルギーであると考えられている。その結果、IIn型超新星は他の超新星と比べて光度曲線が多種多様で、平均的には他の重力崩壊型超新星より明るくなりうる<sup>10),11)</sup>。われわれは、この高密度星周物質と超新星爆発噴出物の相互作用によって光る超新星の光度曲線の解析的な計算手法を定式化し、その手法をIIn型超新星の観測された光度曲線に適用することでIIn型超新星を形作る星周物質の様子、つまり、その親星の爆発直前の質量放出の様子を推定することに成功した<sup>12),13)</sup>。

図3に、われわれの得たIIn型超新星親星の質量放出率を示した。これは、爆発後約1年以内に観測された光度曲線を解析解と比較することで得られたものであり、親星の爆発前約100年以内の質量放出に対応している。星周物質の典型的な速度が約100 km s<sup>-1</sup>であるのに対して、爆発噴出物の典型的な速度がその100倍の約10,000 km s<sup>-1</sup>であるためである。横軸には星周物質の密度勾配を取っている（星の中心からの半径を $r$ として、星周物質密度 $\rho$ が $\rho \propto r^{-s}$ と表されるとき $s$ ）。質量放出に変化がないとき、つまり、定常的な質量放出をしているときには、質量保存則から $s$ は2となる。星周物質の速度がほとんど変わ

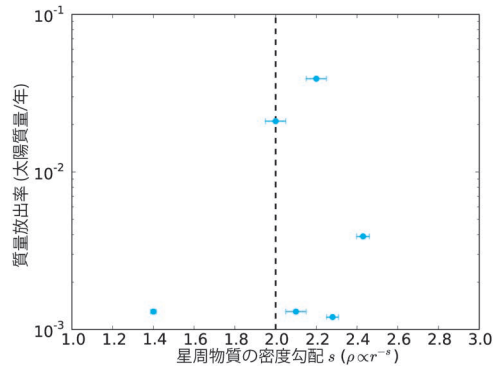


図3 星周物質の密度勾配と質量放出率. 横軸は星周物質密度構造を $\rho \propto r^{-s}$ としたときの $s$ .

らないと思うと、 $s$ が2より大きいというのは星の爆発のときに近づくにつれて質量放出率が大きくなっていることを意味し、逆に2より小さいのは質量放出率がしだいに小さくなっていることを意味する。

まず一目でわかることは、親星の爆発直前の質量放出率が年間 $10^{-3}$ 太陽質量以上と、非常に高いことである。このような非常に高い質量放出率をもつ大質量星として唯一知られているのは高輝度青色激変星 (luminous blue variable; 以下LBV) と呼ばれる星である。実際、爆発前の超新星親星の直接観測からIIn型超新星の親星のいくつかはLBVであることがわかっており、われわれの得た結果を支持している<sup>14),15)</sup>。しかし、LBVは標準的な恒星進化理論の枠組みでは、大質量星がウォルフ・ライエ星になる直前に質量を失う段階であり、それ自体は爆発しないと考えられている<sup>16)</sup>。つまり、理論的には爆発しないはずの星が現実には爆発していることになり、なぜLBV段階の星が爆発しているかはわかっていない。

もしくは、ある種の超新星親星はLBVではないにもかかわらず、LBVのような質量放出を何らかの方法で爆発直前に行っている可能性もある。実際、星周物質の影響を受けた超新星の親星が爆発直前に増光したことが報告されており、そのときに質量放出率が上がったと考えられてい

る<sup>15), 17), 18)</sup>. 図3をもう一度見ていただくと、ほとんどの点は $s=2$ の付近にあり、爆発直前に親星がほぼ定常的な質量放出を行っていることを示唆しているが、 $s$ が2より大きい、つまり質量放出率が親星の爆発の瞬間に向かって大きくなっていくように少し偏っているようにも見える。質量放出は星の表層で起こることであり、重力崩壊は星の中心で起こることであるため、この二つの事象は通常は関係しない。しかし、星中心の爆発直前の変化がうまく表面に伝わることで、超新星親星が爆発直前に非常に大きな質量放出率をもちうるという主張もあり<sup>19)</sup>、われわれの得た結果はそれを支持する可能性もある。しかし、現在我々のモデルを当てはめられるIIn型超新星の観測例は少なく、まだ何も言えない状況である。いずれにせよ、これまで、IIn型超新星の親星の質量放出率は水素輝線の強さなどを基にじっくりと見積もられているだけであったが<sup>20), 21)</sup>、われわれは光度曲線を用いることで、超新星親星の質量放出率とその時間変化を見積もることに成功したのである。

### 3. さらに上をいく超新星—超高輝度超新星

ここまで、IIn型超新星の親星が標準的な超新星親星の理論では考えられないほどの質量放出率を爆発直前にもっていることを紹介した。しかし、前節で紹介したIIn型超新星の親星の質量放出率よりもさらに高い質量放出率を必要とする超新星が存在する。超高輝度超新星 (superluminous supernova; 以下SLSN) と呼ばれている超新星である。SLSNとは、その名のとおりに超新星の中でも特に明るいもので、現在は観測的に可視光領域で絶対等級が $-21$ 等級を超える超新星のことをそのように呼んでいる<sup>22)</sup>。宇宙論で使われてきたIa型超新星の最大の絶対等級は $-19$ か

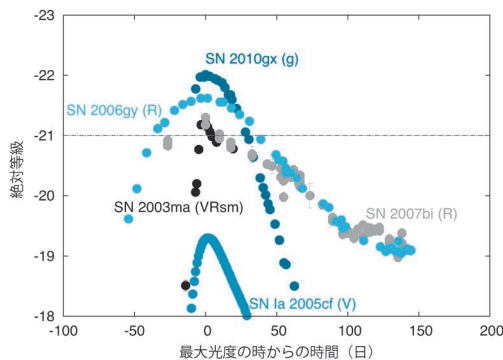


図4 SLSNの光度曲線。括弧内に観測バンドを示している。出典は文献22を参照のこと。比較のためにIa型超新星2005cf<sup>23)</sup>の光度曲線も示した。

ら $-19.5$ 等級付近なので、SLSNはそれよりも少なくとも5倍以上も明るいことになる(図4)。SLSNは明るいですが、非常に珍しい(重力崩壊型超新星の約0.1-1%<sup>24)</sup>)ため、その存在はごく最近認識された<sup>25)</sup>。SLSNは非常に明るいというに長い間光り続けるため、通常の超新星が約 $10^{49}$ エルグ\*2のエネルギーを電磁波として爆発後数年間に放出するのに対し、SLSNは約 $10^{51}$ エルグものエネルギーを電磁波だけで放出する。つまり、通常の超新星の爆発噴出物が運動エネルギーとして持っているエネルギー(約 $10^{51}$ エルグ)を、数年の間に電磁波だけで放出していることになる。

超新星はどうすればこんなに明るくなれるのであろうか? SLSNが放射している電磁波のエネルギーと、通常の超新星の運動エネルギーが同じくらいであることから、単純に考えれば超新星の運動エネルギーを非常に効率よく電磁波のエネルギーに変換できれば良い。つまり、前節に述べたIIn型超新星の場合と同じように、高密度星周物質に超新星爆発噴出物がぶつかれば良い。実際、SLSNにはいくつかの種類があることが知られているが<sup>22)</sup>、そのほとんどはIIn型超新星であることがわかっている<sup>24)</sup>。ただし、SLSNの場合は運動エネルギーのほとんどを短時間に電磁波のエネルギー

\*2 天文学でよく使われる、cgs単位系でのエネルギーの単位。SI単位系でのエネルギーの単位であるジュールとは、1エルグ $=10^{-7}$ ジュールの関係にある。例えば太陽は1秒間に $4 \times 10^{33}$ エルグの光エネルギーを放出している。

に変える必要があるため、前節で述べた IIn 型超新星の場合よりもより高密度な星周物質中で親星が爆発する必要がある。筆者のグループを含む、いくつかのグループが勢力的に SLSN の光度曲線のモデルに取り組んでいるが<sup>26)-28)</sup>、いずれも SLSN の光度曲線を説明するためには親星の爆発前約 100 年以内に、年間約 0.1 太陽質量以上の割合で質量放出をする必要があるという結論に至っている。さらに、定常的な質量放出からなる星周物質では観測を再現するのが困難であり、前節で示したより暗い IIn 型超新星の場合と違い、定常的な質量放出とは大きく離れた爆発的な質量放出が必要があることもわかっている。実は、実際にこのような爆発的な質量放出をした星は知られている。LBV の代表格、イータ・カリーナ（りゅうこつ座イータ星）である。この星は 1837 年から 20 年間大きく増光し、現在その時に放出されたと思われる物質が星の周りに存在する<sup>29)</sup>。この星周物質の観測から、増光していた時期に年間約数太陽質量の割合で質量放出していたと主張されている<sup>30)</sup>。しかし、先に述べたように、LBV は超新星親星とは考えられていない。星から放出された物質は広がっていくにつれて密度が下がっていきってしまうため、大規模な質量放出は爆発直前に起こらなければならない。例えば今イータ・カリーナが爆発をしたとしても SLSN にはなれない。イータ・カリーナの経験したような質量放出を爆発直前に起こすような星が SLSN になりうるのだが、どうすればそのような状況を作り出せるかはわかっていない。

いずれにせよ、大質量星が何らかの形で非常に明るくなりうるということが SLSN の存在から明らかになった。SLSN は非常に明るいいため、非常に遠くに現れても観測することができる。つまり、

SLSN は遠方宇宙、言い換えれば初期宇宙の大質量星の情報をもたらしてくれる。特に、宇宙の初代星形成の理論から初期宇宙では大質量星が現在よりも多く作られうると主張されている<sup>31)</sup>（諸説あり）。本当に初期宇宙で大質量星が現在よりも多く存在すれば、初期宇宙でのほうが SLSN が多く存在したと考えられる。われわれはこれを観測的に確かめるべく、すばる望遠鏡に新しく取り付けられた観測装置、Hyper Suprime-Cam での SLSN 探査を計画している。Hyper Suprime-Cam では赤方偏移 4 程度までの SLSN を捕らえ、その発生割合を知ることができると考えている<sup>32)</sup>。さらに遠くの宇宙の一番星の起こした超新星を捕らえるためには、WISH 衛星<sup>\*3</sup>などを用いた近赤外線でのサーベイが必要である<sup>33)</sup>。

#### 4. 爆発し始めた高輝度青色激変星

ここまで、LBV は理論的には爆発しないと思われている星であると述べてきた。しかし、実は 2013 年に初めて LBV の状態で爆発する大質量星の理論計算結果が報告された<sup>34)</sup>。太陽金属量をもつ、初期質量が 20 太陽質量と 25 太陽質量の回転星の重力崩壊を起こす直前の星のモデルに基づき星のスペクトルを計算したところ、これらの星が LBV に分類されることがわかったのである。しかし、ここで理論的に得られた LBV の明るさは、実際に爆発したことが確認されている<sup>14), 15)</sup>ような典型的な LBV の明るさの約 10 分の 1 程度であり、非常に暗い。さらに爆発直前の質量放出率も年間  $10^{-5}$  太陽質量程度であり、IIn 型超新星の親星の質量放出率からはほど遠い。星表面の化学組成から、この星は爆発すると I Ib 型超新星<sup>\*4</sup>になると考えられる。このため、前節までで紹介

\*3 <http://wishmission.org/jp/index.html>

\*4 I Ib 型超新星とは、はじめ II 型超新星として観測され、しだいに水素のスペクトル線が消えて Ib 型超新星に変化していく超新星である。Ib 型超新星はスペクトルに水素がなく、ヘリウムが存在する超新星であり、星の水素層が失われ、外側がヘリウム層になった状態で爆発したものである。I Ib 型超新星の親星は、水素層が完全に失われず、若干残った状態で星が爆発した際に観測されると考えられている。

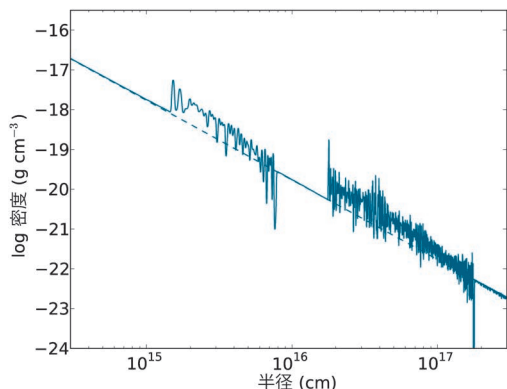


図5 20太陽質量回転星の爆発時の星周物質構造 (実線)。破線は質量放出率に変化がなかった場合の構造。

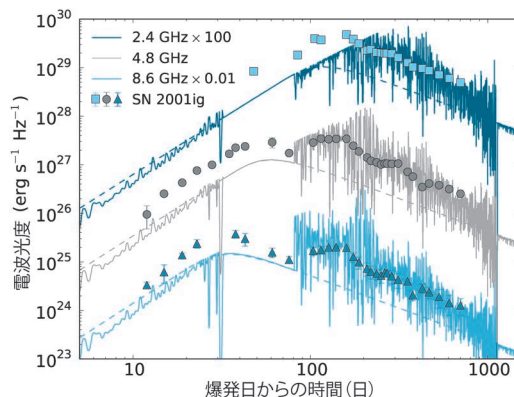


図6 図5に示した密度構造を基に計算した超新星電波光度曲線 (実線)。短時間の時間変動はモデル中では考慮していない光経路差の効果で実際には消える。破線は図5の破線の構造を用いた際の電波光度曲線。電波光度の突発的な上昇を見せるI Ib型超新星2001igの光度曲線<sup>36)</sup>も示した。

してきたIIn型超新星やSLSNの親星の問題の解決には至っていない。

今回初めて報告された理論的なLBVの超新星親星は残念ながらIIn型超新星やSLSNの親星ではなさそうであるが、この親星が本当に爆発したとすると、親星がLBVであったためにその超新星に現れるような特徴はないのであろうか？ 実は、20太陽質量の星が進化の最終段階で短時間に質量放出率を大きく変化させていることがわかった。これは、この星の爆発直前の表面温度が約20,000 Kになっているためである。この温度は、鉄が2階電離の状態から3階電離の状態に変わる温度であり、鉄は2階電離の状態の方がより多くの遷移をもつため、星から放出される光子をより多く捕らえることができる。このため、約20,000 Kより低温側に星がある方が質量放出率が高い。20太陽質量のLBV超新星親星の表面が爆発直前に低温側と高温側を短時間に行き来するため、星周物質に特徴的な構造ができることがわかった<sup>35)</sup> (図5)。もし星周物質に本当にこのような構造が存在するとすると、はじめに紹介したように電波領域の光度曲線の振る舞いに影響を与える。親星が定常的な質量放出をしているような通常の超新星の電波光度は、単調に増加した後に

単調に減少するだけだが、20太陽質量のLBV超新星親星の星周物質の構造をもとに電波光度曲線を計算すると、星周物質の密度が上昇する場所に衝撃波が達した際に電波光度の突発的な変化があることがわかった (図6)。このような電波光度の突発的な上昇は、特にI Ib型超新星で実際に観測されていることが知られている。これまで電波光度の突発的な変化の由来について諸説存在したが、われわれはこれが今回得られたLBV超新星親星から自然に説明が可能であることを示した<sup>35)</sup> (図6)。これは、LBVがIIn型に限らず、I Ib型といった他の超新星としても爆発している可能性を示唆している。ずっと理論的に爆発しないと思われてきたLBVは、実はさまざまな形で頻繁に爆発している星なのかもしれない。

## 5. 超新星残骸への影響

ここまで、主に高密度星周物質、言い換えると爆発直前に高い質量放出率をもつ超新星親星が爆発した際に超新星の観測量に与える影響について議論してきた。超新星は爆発後どんどん広がって

いき、超新星残骸となっていく。高密度星周物質の存在は、超新星自体だけでなく、その残骸にも影響を与える。高密度星周物質はいろいろな影響を超新星残骸に与えるが、ここでは特に再結合プラズマをもつ超新星残骸についてごく簡単に紹介したい。以下に出てくるさまざまな温度や、再結合プラズマをもつ超新星残骸の詳細については、過去の天文月報の記事を参照していただきたい<sup>37),38)</sup>。

超新星爆発が起こると、星周物質中に衝撃波が伝わっていく。衝撃波面では主に、イオンの熱温度が上昇する。その後、クーロン相互作用で電子温度が上昇する。電子温度が上昇すると、衝突電離によってイオン化状態で決まる温度である電離温度が上昇し、やがて電子温度と電離温度が平衡状態になる。このため、超新星残骸の観測をするとき、電子温度のほうが電離温度よりも高くなっているか、両者は平衡状態にあることが予想される。ところが、いくつかの超新星残骸は、電離温度のほうが高い状態になっている、つまり再結合しているようなプラズマをもっていることが知られている<sup>37)</sup>。

このような電離温度のほうが高いプラズマをもつ超新星残骸はどうしたらできるのだろうか。有力な説の一つに、超新星が爆発の際に高密度な星周物質をもっていたというものがある<sup>39),40)</sup>。爆発時に衝撃波が十分に高密度な星周物質中を通過すると、密度が高いおかげで、電子温度と電離温度が爆発直後すぐに平衡状態になれるのである。爆発直後に二つの温度が平衡状態になった後、衝撃波が星周物質の高密度な領域を抜けると、一気に膨張することにより電子温度だけを下げることができる。つまり、高密度星周物質によって一度プラズマ温度の平衡状態を爆発直後に作ってしまえば良いのである。

筆者は、どのような超新星親星であれば爆発直後にプラズマ温度の平衡状態を実現できるほど高密度な星周物質をもちうるかを調べた<sup>41)</sup>。この

結果、これまで紹介してきたII型超新星であれば簡単にこのような状況になり、II型超新星の超新星残骸は再結合プラズマをもつものになることがわかった。しかし、他のII型超新星でも再結合プラズマをもちうるということがわかり、再結合プラズマをもつ超新星残骸の起源は必ずしもII型超新星ではなく、むしろその多くはより出現率が高い他のII型超新星であると考えられる。

## 6. ま と め

ここまで、星周物質との相互作用が観測量に影響を与える超新星について紹介してきた。これらは、現在の恒星進化理論の枠組みでは説明ができないものであり、悩ましい問題である。しかし、そこに現在の理論に何が足りないのかを示すヒントが隠されているはずであり、これらが現在の恒星進化理論に欠けたピースを知るうえで重要な天体であることは間違いない。大質量星進化、特に大質量星の質量放出を明らかにするうえで、星周物質と相互作用する超新星は重要な役割を演じていくであろう。

## 謝 辞

草稿に目を通して有益な助言をくださった前田啓一氏と富永望氏に感謝いたします。また、ここでまとめた研究のほとんどは、筆者が東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構に在籍したときに得られたものです。同機構と、同機構で日頃の議論や雑談に付き合ってくくださった皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Chevalier R. A., Fransson C., 2006, ApJ 651, 381
- 2) Chevalier R. A., et al., 2006, ApJ 641, 1029
- 3) Maeda K., 2012, ApJ 758, 81
- 4) Vink J. S., et al., 2001, A&A 369, 574
- 5) Vink J. S., de Koter A., 2005, A&A 442, 587
- 6) Schlegel E. M., 1990, MNRAS 244, 269
- 7) Barbon R., et al., 1999, A&AS 139, 531
- 8) Pastorello A., et al., 2006, MNRAS 370, 1752
- 9) Filippenko A. V., 1997, ARA&A 35, 309
- 10) Richardson D., et al., 2002, ApJ 123, 745
- 11) Li W., et al., 2011, MNRAS 412, 1441
- 12) Moriya T. J., et al., 2013, MNRAS, 435, 1520
- 13) 守屋 堯, 2013, 博士論文(東京大学)
- 14) Gal-Yam A., Leonard, 2009, Nature 458, 865
- 15) Mauerhan J. C., et al., 2013, MNRAS 430, 1801
- 16) Langer N., 2012, ARA&A 50, 107
- 17) Pastorello A., et al., 2007, Nature 447, 829
- 18) Ofek E. O., et al., 2013, Nature 494, 65
- 19) Quataert E., Shiode J., 2012, MNRAS 423, L92
- 20) Kiewe M., et al., 2012, ApJ 744, 10
- 21) Taddia F., et al., 2013, A&A 555, 10
- 22) Gal-Yam A., 2012, Science 337, 927
- 23) Wang X., et al., 2009, ApJ 697, 380
- 24) Quimby R. M., et al., 2013, MNRAS 431, 912
- 25) Quimby R. M., 2006, 博士論文(テキサス大学オースティン校)
- 26) Moriya T. J., et al., 2013, MNRAS 428, 1020
- 27) Chatzopoulos E., et al., 2013, ApJ 773, 76
- 28) Ginzburg S., Balberg S., 2012, ApJ 757, 178
- 29) Davidson K., Humphreys R. M., 1997, ARA&A 35, 1
- 30) Smith N., 2006, ApJ 644, 1151
- 31) Yoshida N., et al., 2007, ApJL 667, L117
- 32) Tanaka M., et al., 2012, MNRAS 422, 2675
- 33) Tanaka M., et al., 2013, MNRAS, 435, 2483
- 34) Groh J. H., et al., 2013, A&A 550, L7
- 35) Moriya T. J., et al., 2013, A&A 557, L2
- 36) Ryder S. D., et al., 2004, MNRAS 349, 1093
- 37) 小澤 碧, 山口弘悦, 2011, 天文月報104, 58
- 38) 内田裕之, 2013, 天文月報106, 604
- 39) Itoh H., Masai K., 1989, MNRAS 236, 885
- 40) Shimizu T., et al., 2012, PASJ 64, 24
- 41) Moriya T. J., 2012, ApJL 750, L13

## Supernovae Interacting with Circumstellar Media

Takashi J. Moriya

*Argelander Institute for Astronomy, University of Bonn, Auf den Hugel 71, D-53121 Bonn, Germany*

Abstract: Understanding the nature of massive stars which explode as supernovae is essential to understand the Universe. Supernovae interacting with dense circumstellar media (Type IIn supernovae and superluminous supernovae) have caught attention in the context of the massive star evolution. Light curve modeling of such supernovae reveals that no theoretical supernova progenitor model predicts explosions of stars with such circumstellar environment. This indicates that their progenitors should be stars which are theoretically not considered to be a supernova progenitor (luminous blue variables) or there may exist unknown mass-loss mechanisms which enhance the mass-loss rates of supernova progenitors shortly before their explosions. Stellar evolution theories recently reveal that some stars can explode at the luminous blue variable stage. However, the current models are still not able to explain supernovae with dense circumstellar media. The existence of the dense circumstellar media also affects the properties of supernova remnants. Supernovae interacted with dense circumstellar media can be observed as recombining supernova remnants. The existence of supernovae exploding within dense circumstellar media is challenging the current stellar evolution theory and revealing the nature of them is a key issue for the stellar evolution theory.