

論文内容の要旨

論文題目 RADIATION HYDRODYNAMICS AND
NUCLEOSYNTHESIS IN HYPERNOVAE
(極超新星における輻射流体力学と元素合成)

氏名 中村 敬喜

重力崩壊型超新星の爆発エネルギーは超新星 SN 1987A に代表されるように 10^{51} erg 程度であると近年まで考えられていた。しかし最近、これをはるかに超える爆発エネルギーを持つ超新星が発見され、これらの天体は超新星を超えるという意味で“極超新星 (hypernova)”と呼ばれるようになった。この論文では光度曲線、爆発的要素合成、ショックブレイクアウトの3つの観点から極超新星を詳しく調べ、これらの天体が持つ性質を明らかにした。

まず、初めて発見された極超新星である Ic 型超新星 SN 1998bw の爆発モデルを再構築し、理論的な光度曲線とスペクトルを計算して、観測との比較を行った。この超新星はガンマ線バースト GRB980425 の可視領域での対応天体として発見され、電波領域でも非常に明るくなるなど、今までに発見されたことのないような極めて特異な Ic 型超新星であった。過去にも同様のモデル計算がなされていたが、最近になって観測グループが後期の時期までの全放射の光度曲線を発表したため、より正確なモデル化が可能となった。モデル計算と観測との比較の結果、 $14M_{\odot}$ の C+O 星が爆発エネルギー $E_{\text{exp}} = 5 \times 10^{52}$ erg で超新星爆発を起したとすると、SN 1998bw の光度曲線の最初の 30 日をうまく再現できることが分かった。また同じ時期のスペクトルは非常に広いライン幅を

持っていた。この性質を説明するためには放出物の速度が極めて大きくなくてはならないが、そのためにもやはり $E_{\text{exp}} = 5 \times 10^{52}$ erg 程度の爆発エネルギーが必要であった。この爆発エネルギーは普通の超新星よりも数十倍も大きく、SN 1998bw が確かに極超新星であることが分かった。爆発から数百日までの超新星の光の源は放射性元素 ^{56}Ni が $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ と崩壊していく過程で出てくるガンマ線のエネルギーである。この論文では観測とモデルとの比較によって SN 1998bw で放出された ^{56}Ni の量は $0.4M_{\odot}$ であることを求めた。これは従来の超新星爆発 ($0.07M_{\odot}$ 程度) の数倍であり、このことから SN 1998bw が特殊な爆発であったことが分かる。

初期の光度曲線が $E_{\text{exp}} = 5 \times 10^{52}$ erg の爆発モデルで再現できたのに対し、25日から200日までに観測された光度曲線はそのモデルが予想するよりも変化がゆっくりとしていて、より爆発エネルギーが小さいモデル ($E_{\text{exp}} = 7 \times 10^{51}$ erg) の方が観測をよく説明できることが分かった。これは、爆発エネルギーが大きいモデルでは物質の密度が急速に低下し、放射性元素からのガンマ線を十分に吸収できないことが原因である。つまり観測を再現するためには放出物の内側で高エネルギーの爆発モデルよりも密度が高く、より多くのガンマ線エネルギーを吸収して放出物を暖めてやる必要がある。この論文では、そのような複雑な密度構造を可能にするためには、爆発が非球対象であればよいことを示した。非球対象爆発は、現在提唱されている高エネルギー爆発の爆発機構や SN 1998bw の後期のスペクトルの観測とも一致する。

重力型崩壊型超新星爆発では、爆発時に星の中心部分で非常に高温、高密となるためにそこで元素合成が進み、それが宇宙空間にばらまかれる。極超新星は一般的な超新星よりも大きな爆発エネルギーを持つため、爆発的元素合成も超新星とは違った性質を持つと考えられる。そこで極超新星における爆発的元素合成の詳細な計算を行って、超新星における元素合成との比較を行った。その結果、極超新星では爆発的元素合成が星の外側まで進み、より多くの物質が燃えることが分かった。温度が 10^9K を越える状況ではシリコンを含むほとんどの物質が燃えて ^{56}Ni になるが、極超新星ではこのような状況になる領域が広がり、鉄属の元素が多く放出される。また超新星の場合と比べて温度が高く、密度が低い状況で元素合成が行なわれるため、シリコンが完全に燃える領域ではトリプルアルファ反応があまり進まず、He がより多く残されること、また捕獲する He が多く存在するため、Ti などのアルファエレメントも多く生成される

ことなども分かった。普通の超新星爆発における元素合成に基づく銀河の化学進化モデルでは Ti の量が足りないという問題があったが、極超新星を考慮に入ればその問題を解決できる可能性がある。

また、極超新星では酸素燃焼や炭素燃焼がより広い領域まで進むために、酸素、炭素、アルミニウムなどの元素は消費され、これらの反応でできる粒子(シリコン、硫黄、アルゴン、カルシウム等)が多く生成される。近年、Si/O が大きいスターバースト銀河が発見され、どのようにしてこの元素比が作られたかが謎であったが、これは極超新星によって汚染されたと考えれば説明できる。さらに、最近になって金属欠乏星には鉄属元素の比に特徴的な傾向 ([Fe/H] が小さい星ほど [Cr/Fe] と [Mn/Fe] は小さくなるが [Co/Fe] は大きくなる) があること発見されたが、 $E_{\text{exp}} \sim 10^{52}$ erg 程度の極超新星でこの傾向を説明できることを明らかにした。

重力崩壊型超新星爆発では、星の中心で発生した衝撃波が星の表面まで達した時に(ショックブレイクアウト)、非常に明るい紫外 / 軟 X 線バーストを起こす。このとき表面近くの光学的厚みが小さいところでは放射が衝撃波の伝播に大きな影響を与え、超新星爆発から出てくる光子の数やそのエネルギー、放出物の形や速度を変化させる。衝撃波面のあるガスが放射による加熱や加速を受け、全体として衝撃波を弱める効果が働くためである。過去の解析的、及び数値的研究によって、星の表面近くにおいて衝撃波が放射の効果で弱まるだけでなく、その後の放射冷却によって高密度の薄いシェルが形成され、新たな衝撃波が発生するという複雑な衝撃波の伝搬過程が明らかになっていた。この論文では、星の大気構造や爆発エネルギーによるショックブレイクアウトの違いを詳しく調べるため、輻射流体力学のコードを用いて数値シミュレーションを行なった。

まず、超新星 SN 1987A におけるショックブレイクアウトのモデル計算を行ない、ショックブレイクアウト時の光度曲線とスペクトル、周りの星間物質をイオン化した光子の数やその後の放出物の形状を求めた。その結果、衝撃波は重力崩壊から 90 分後に星の表面に達し、 $L \gtrsim 10^{45}$ erg/s の紫外 / 軟 X 線バーストを起こすことが分かった。また、SN 1987A の表面では放射冷却によって $M \sim 7 \times 10^{-8} M_{\odot}$ の質量を持つ高密度の薄いシェルができ、このシェルはレイリーテイラー不安定に対して安定であることを示した。ショックブレイクアウト時には星の外層にある物質が高温に熱せられてイオン化し、その時に大量

に発生した電子によって光子が散乱されるため、星の内側からくるエネルギーが高い光子が大量に放出される。この論文では各周波数毎の輻射輸送方程式を解くことによって、詳細なスペクトルの計算を行った。その結果、希薄黒体放射近似で予測されるよりもより多くの高エネルギー光子が放出されることが分かった。また SN 1987A の周りにある物質からの放射の観測から、ショックブレイクアウト時に周りの物質をイオン化した光子の数が推定されているが、モデル計算はこの推定量を満足するものであった。

さらに、SN 1987A よりも広がった外層を持つ赤色巨星におけるショックブレイクアウトのモデル計算を行い、超新星 SN 1987A のそれとの比較を行った。赤色巨星では衝撃波が表面に到達するのにより長い時間がかかり、ショックブレイクアウト時のバーストも長続きする。その反面バースト時に出てくる光子のエネルギーは低いことが分かった。

最後に、SN 1987A と同じ親星を持つ極超新星におけるショックブレイクアウトを調べ、バースト時の明るさは爆発エネルギーの2乗に比例することを示し、バースト時に大量の軟 X 線 ($\sim \text{keV}$) が放出されることを明らかにした。この極超新星ではショックブレイクアウト時に非常に明るくなるため ($L \gtrsim 10^{46} \text{ erg/s}$)、 $z = 1,000$ 程度の距離にあっても NGST を使えば観測することが可能である。また、ショックブレイクアウト後もしばらくは明るく輝き続けるため、 $z = 1$ 程度の距離にあっても、SUBARU 等の現存する望遠鏡で観測することが可能である。さらに、超新星ではショックブレイクアウト後に放射冷却によって高密のシェルが形成されていたが、極超新星では放射冷却が効く前に放出物が広がってしまうため、このようなシェルは形成されないことを明らかにした。