

論文の内容の要旨

Numerical Models of the Progenitor Star of SN 1987A Based on the Stellar Merger Scenario

(恒星合体シナリオを基にした SN 1987A の親星の数値モデル)

漆畑 貴樹

SN 1987A は大マゼラン雲で発生した重力崩壊型超新星 (CCSN) である。近傍領域で発生したので、爆発の初期段階から多波長を用いて観測する事に成功した。観測的事実から親星は奇妙な進化を辿ったと知られている。

当時の理論予測から大質量星は赤色超巨星 (RSG) として爆発すると考えられていた。しかし、SN1987A 由来のニュートリノの検出時間や親星が直接同定された事から、RSG よりも半径が約 100 倍小さい青色超巨星 (BSG) が親星であると判明した。爆発地点の周囲には 3 つのリング状の物質構造が存在しており、He や N が多く存在している事がスペクトルの解析により判っている [1, 2]。リング形成と組成異常の起原を説明するために、親星には RSG の時期が存在し、その際に放出されたガスと収縮して BSG になった後に放出されたガスの衝突したと考えられている。また、爆発地点からリングまでの距離と物質の速度構造から約 2.0×10^4 年前に BSG への遷移が起こったと推定されている。

恒星の寿命が尽きようとする段階で急激な収縮が起こるという奇妙な進化を説明するための代表的な機構が 2 つある。1 つ目は恒星の自転から発生する回転混合により外層の He 量を増加させ、光度増加を引き起こし、エネルギーを過剰に抜くことによって収縮させる機構である [3]。2 つ目は質量輸送と恒星合体といった連星系由来の現象で外層質量を増加させ、つまりコア質量と全質量の比 ($q \equiv M_{\text{core}}/M_{\text{tot}}$) を減少させ、重力収縮を起こす機構である [4]。この機構はリング形成に対しても親和性が高い [5]。しかし、現段階にお

いて全ての観測的事実を定量的に説明できる親星の進化モデルは存在していない。

まず上記機構の検証を行う為に、回転を考慮した恒星進化コード [6] を用いて3つのモデルを構築した。1つ目は質量降着モデルである。物質が降着した事を想定して、恒星表面から質量を増加させる。この時、降着物質の物理量は表面の値を複製して使用する。作用される恒星は初期質量が $14.0 M_{\odot}$ の He コアと CO コアを持った2種類の RSG である。 1.0×10^2 年掛けて質量を増加させ、Fe コア形成まで計算する。He コアを持った RSG は $6.0 M_{\odot}$ 以上増加させると親星が BSG になった。一方、CO コアを持った RSG は $12.0 M_{\odot}$ 増加させても一度も BSG にならなかった。この差異は RSG の物理構造に依る。2つ目は He 増加モデルで、外層全体の He 量をパラメータとして与える。He 量を 10 年掛けて変化させ、 1.0×10^7 年進化計算を行う。その際、質量放出を 0 にして、核反応による組成変化を止める事によって外層の変化を計算する。このモデルでは作用される恒星は CO コアを持った RSG のみである。結果として、0.625 (質量比) 以上の He 量を与えると親星は BSG になった。しかし、現実的なパラメータ値内で実現出来たとは言えない。3つ目は2つの効果を合わせたモデルであり、増加させる質量と外層全体の He 量をパラメータとして与える。作用される恒星は CO コアを持った RSG のみである。このモデルにおいても親星が BSG になる結果が得られるが、現実的なパラメータ値内で実現は出来なかった。

次に、恒星合体シナリオ [4, 7] を基にした進化モデルを構築した。近接連星系において RSG (質量 M_1 [$14.0 M_{\odot} : 16.0 M_{\odot}$]) と主系列星 (MS) (質量 M_2) が存在するとき、動的質量輸送により系が共通外層段階へ移行する可能性がある。この段階における MS が周囲との摩擦により軌道角運動量を失い螺旋運動しながら中心へ落ち込む様子を、軌道角運動量 J_{orb} をパラメータとして 1.0×10^2 年掛けて対流外層 [$1.0 \times 10^2 R_{\odot}$: 表面] へ注入する事でモデル化した。先行研究において、この段階のモデル化を行った恒星進化計算は存在していない。次に、MS が中心付近へ達した際に溶け出す様子を、MS の質量 M_2 と溶けだした物質が到達する位置 M_{in} をパラメータとして 1.0×10^2 年掛けて質量を増加させる事でモデル化した。MS の位置を $10.0 R_{\odot}$ に固定し、それに対応する質量座標を M_{out} とすると、質量増加は [$M_{\text{in}} : M_{\text{out}}$] の質量座標間を M_2 だけ引き延ばす事で表現する。よって、加えられる物質の構造は RSG のこの領域における物理量に依存する。また、溶けだした物質が周辺環境へ与える影響として、この質量座標間の組成を一様にする。溶けだした物質は H-rich なので、コアの He 層に侵入した際に相互作用を起こし大規模な混合が起こる可能性がある。質量増加の後に [$M_{\text{in}} : \text{表面}$] までの組成を一様にする事でこれをモデル化する。大規模混合の有無をパラメータにして計算を行った。

ベストモデルのパラメータは $\{M_1, J_{\text{orb}}, M_{\text{in}}, M_2, \text{Mixing}\} = \{14.0 M_{\odot},$

3.0×10^{53} erg sec, $4.6 M_{\odot}$, $7.7 M_{\odot}$, Yes} である。このモデルは観測的制限である RSG から BSG への遷移、組成異常、外層質量、HR 図における親星の位置を説明できる。遷移から親星の段階まで約 2.5×10^4 年であり、この制限もほぼ満たす事ができる。よって、ほぼ全ての観測的制限を満たすモデルを構築する事ができた。このモデルで使われている RSG は CO コアを持ったモデルである。定量的な評価が出来ていないのは s-process 元素の過剰についてのみである。これは計算モデルに含まれている核種に s-process 元素が含まれていない為であり、今後のモデルのアップデートで評価が可能になる。合体モデルで明らかになった事は次の通りである；上述したように質量降着モデルでは $12.0 M_{\odot}$ を増加させても一度も青い段階へ遷移しなかったが、遷移した結果が得られた合体モデルとの違いは異なる質量増加の手法による外層構造である。質量座標で見ると、検証モデルにおいては外層の対流領域を増加させる手法になっており、一方で、合体モデルにおいてはコアと対流領域下部に存在している輻射領域を増加させる手法になっており、この差異が進化に影響を与えていると考えられる。したがって、より現実的な降着物質の物理量を考慮し、モデルを作成する事が重量であると言える。全てのパラメータに対して $q < 0.27$ で親星は BSG になった。合体モデルの RSG と MS の質量の組み合わせにおける J_{orb} の典型的なオーダーは 10^{54} erg sec である。しかし、 $J_{\text{orb}} = 1.0 - 3.0 \times 10^{54}$ のモデルでは質量放出が激しく q が上昇する為、BSG の親星を作る事は困難であった。恒星進化コードは 1 次元で記述されており、質量放出は wind mass loss が仮定されている。よって、より角運動輸送の効率が良い質量放出、例えば disk-like mass loss、が示唆され、連星系由来のリング形成のシナリオと一致する。大規模の混合の有無は恒星の進化自体にはほとんど影響を与えないが、組成異常を説明する為に重要である。先行研究で指摘されていたように、BSG の他にも親星が黄色超巨星 (YSG) や白色超巨星 (WSG) であるモデルも構築する事が出来た。パラメータ群 $\{M_1, J_{\text{orb}}, M_{\text{in}}, \text{Mixing}\} = \{14.0 M_{\odot}, 3.0 \times 10^{53}$ erg sec, $4.6 M_{\odot}$, Yes} の場合、親星が YSG である為には $6.0 M_{\odot} < M_2 < 6.3 M_{\odot}$ 、WSG である為には、 $6.8 M_{\odot} < M_2 < 7.0 M_{\odot}$ の範囲の質量増加が必要である。パラメータ群 $\{M_1, J_{\text{orb}}, M_{\text{in}}, \text{Mixing}\}$ を変更してもこの傾向は変わらない為、これらが親星であるケースは珍しい。

参考文献

- [1] Lundqvist, P. & Fransson, C. (1996). The Astrophysical Journal, 464, 924.
- [2] Mattila, S., Lundqvist, P., Groningsson, P., Meikle, P., Stathakis, R., Fransson, C. & Cannon, R. (2010). The Astrophysical Journal, 717, 11401156.

- [3] Saio, H., Nomoto, K. & Kato, M. (1988). *The Astrophysical Journal*, 331, 388393.
- [4] Podsiadlowski, P., Joss, P. C. & Hsu, J. J. L. (1992). *The Astrophysical Journal*, 391, 246264.
- [5] Morris, T. & Podsiadlowski, P. (2007). *Science* 315, 1103.
- [6] Takahashi, K., Umeda, H. & Yoshida, T. (2014). *The Astrophysical Journal*, 794, 40.
- [7] Ivanova, N., Podsiadlowski, P. & Spruit, H. (2002). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 334, 819832.