

初代星の超新星爆発による重元素汚染

甲南大学大学院自然科学研究科理論研究室

修士課程一年

横山智広

宇宙ができて間もないころ、水素やヘリウムといった軽い元素のみが合成された。現在、太陽の観測では、2%の重元素が含まれていることが分かっている。宇宙初期には無かった重元素は、星の進化と超新星爆発によって作られ、放出されたものであると考えられている。初代星が超新星爆発を起こす際、重元素を放出する先は重元素量 0 の宇宙なので、次に形成される星は重元素を少しだけ含む、金属欠乏星となる。金属欠乏星はその星が含む重元素量の違いにより、重元素量の少ないほうから HMP star: Hyper Metal-poor star EMP star: Extremely Metal-poor star などと分類される。また、炭素の比率の高い金属欠乏性も見つかっており、CEMP: C-enhanced EMP star と呼ばれている。これら金属欠乏星は初代星の進化と超新星爆発による元素合成の結果を反映しており、観測によって元素組成比を調査することで、宇宙初期の化学進化を探ることができる。

超新星爆発の際に、温度の高い場所では重元素を合成する「爆発的元素合成」が起こる。爆発のエネルギーが大きいほど「高い温度を経験し重元素になる物質」は多くなり、小さいほど少なくなる(図 1)。単純に親星の中央にエネルギーを注入するだけの一次元球対称のモデルではその超新星爆発で放出

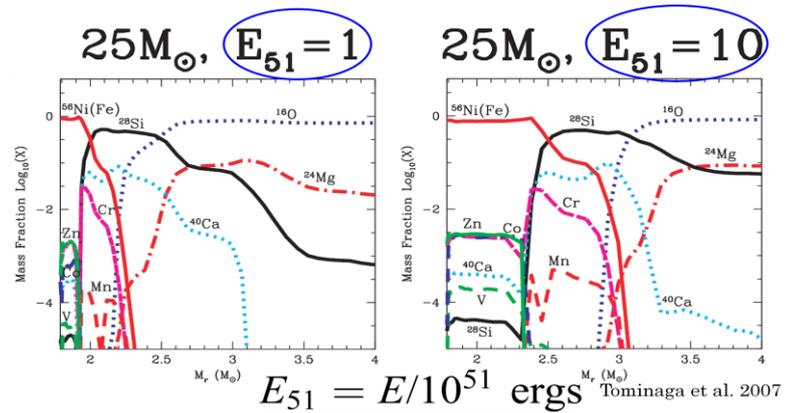


図 1:横軸は半径、縦軸はそれぞれの元素の存在量を表す。

される元素組成比と観測されている金属欠乏星の元素組成比と一致させることができない(図 2)ため、Mixing-fallback モデル(図 3)が導入された。これは、元素合成を起こしたのち、組成の違う外側と内側の領域の物質を混合し、一部を中心に降着させ、残りを外に放出するという過程を、一次元球対称の計算にパラメーターとして与えるもので、この計算の結果、金属欠乏星の元素組成比が超新星爆発によってつくられることが説明された(図 4)。この混合の物理過程についての研究が、2次元のシミュレーションを用いて行わ

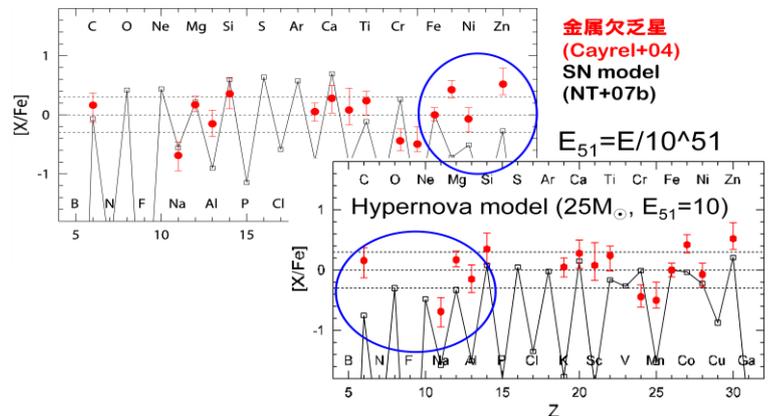


図 2:横軸は原子番号、縦軸は太陽における存在量との比。

れている。ジェット状に爆発を起こし、混合させるモデルと、レイリーテイラー不安定性によって混合を起こすモデルが考えられている。

ジェット状に爆発を起こすモデルは、星の赤道面方向から物質を降着させ、降着した物質の組成をそのままに、上下方向に噴出させるというものである。この計算は、与えるエネルギー、与えるエネルギーの注入率、計算する領域の開始地点(中心からの半径)、ローレンツファクター(物質の速度)、物質を噴出させる角度、を主なパラメーターとして、相対論的な2次元の流体計算のコードを用いて行われている。この計算によると、中央に降着する物質はエネルギーの注入率に依存しており、注入率が大きい( $10^{53}$ erg/s)場合中央付近の物質しか降着せず、注入率が小さい( $10^{51}$ erg/s)場合外側の層の軽い元素も降着する。このエ

ネルギー注入率を変えることで、HMP star や CEMP star、EMP star それぞれの組成比を同じ手法を用いて再現することができている(図5)。ただし、このジェットの発生機構は解明されていない。

レイリーテイラー不安定性による物質の混合は回転している親星を用意し、外側への運動エネルギーを中央に与えるというモデルを用いて計算されている。与えるエネルギーによって混合の様子は変わり、

IMF に沿った数の星を  $0.6 \cdot 10^{51}$ erg,  $1.2 \cdot 10^{51}$ erg,  $2.4 \cdot 10^{51}$ erg で爆発させそれぞれの平均がつくる元素組成比を金属欠乏星と比較した結果、 $2.4 \cdot 10^{51}$ erg での計算が一致してい

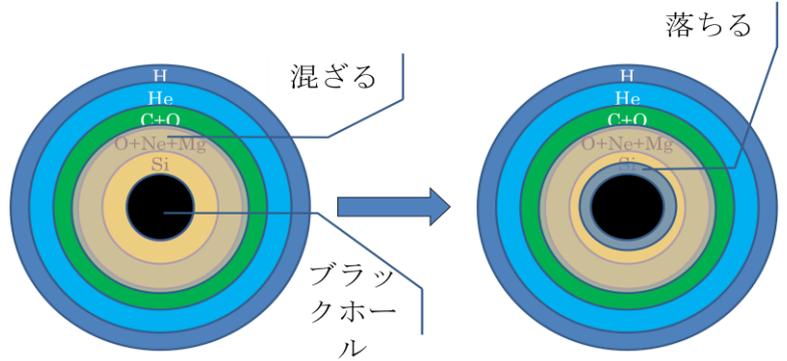


図3:ピンクの領域を混ぜ、青い領域を降着させ、残りの領域を放出させる Mixing-fallback の図。

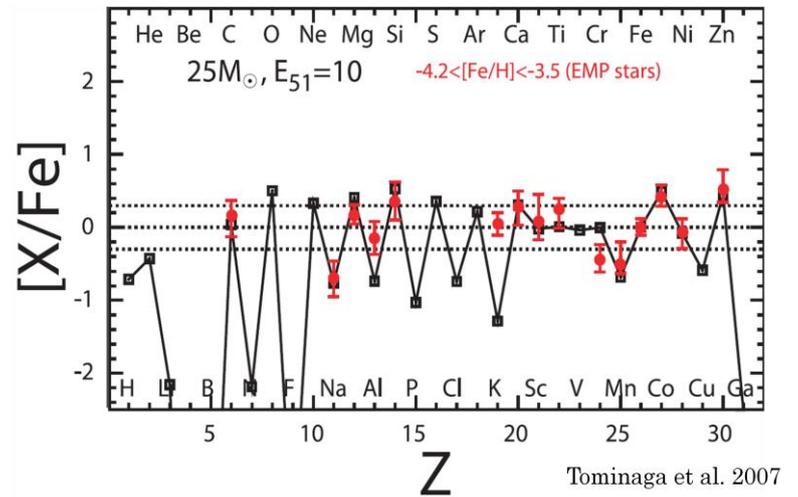


図4:Mixing-fallback モデルによる金属欠乏星の組成比の再現。

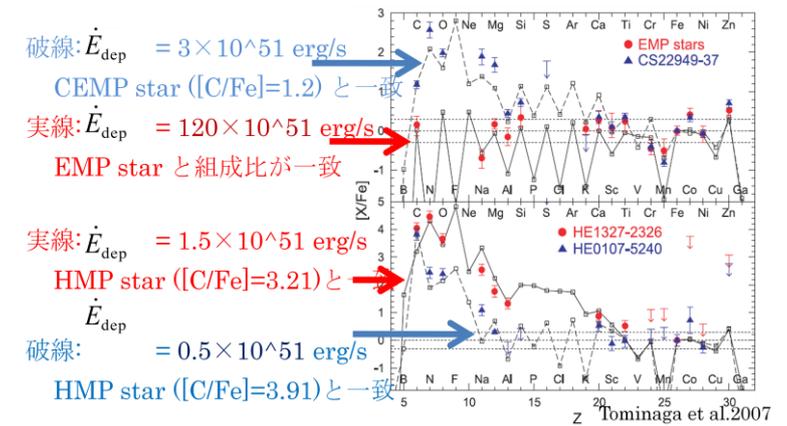


図5:Jet 状の爆発による合成結果と観測との比較。

る(図 6)。個々の金属欠乏性の元素組成比との比較では、15 太陽質量のものを  $2.4 \cdot 10^5 M_{\odot}$  での元素組成比が観測された組成比と近いものとなっているが、C-rich な金属欠乏星とは一致させることができていない。

まとめ: EMP star は昔の宇宙を表しており、その元素組成比は Mixing-fallback という手法で、星の中を混合することで再現することができている。この混合のためのメカニズムは 2 つ提案されており、一つはジェット状の爆発によるもので、このモデルにおけるメリットは炭素過剰な金属欠乏星を含め、さまざまな金属欠乏星の元素組成比を同じ手法で再現することができ、デメリットは、このジェットが発生する原理は未解明ということである。もう一つの方法として、レイリーテイラー不安定性をシミュレートしたものがあり、メリットとして、金属欠乏星の組成比を説明することに成功していることが挙げられる。デメリットとしては、炭素過剰な金属欠乏性を再現することができていないことが挙げられる。これは、このモデルでは与えるエネルギーが大きい場合 fallback が起こらないことに起因している。

#### 参考文献

- [1] Beers, T. C., & Christlieb, N. 2005, ARA&A, 43, 531
- [2] Tominaga, N. 2009, ApJ, 690, 526
- [3] Joggerst, C. C., et al. 2010, ApJ, 723, 353

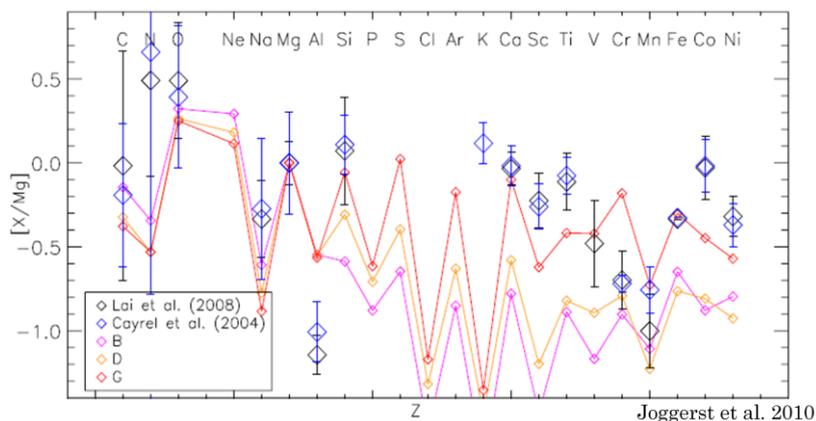


図 6: 組成比の IMF 平均と観測との比較。