

宇宙の化学進化への超巨大質量星の寄与

甲南大学大学院理論研究室

横山智広

概要と結論

宇宙の重元素汚染は、金属量 $z=0$ の種族III星(Population III star, Pop III star)の超新星爆発により始まった。宇宙初期の密度揺らぎによって生まれた星は Pop III.1 star と呼ばれ、太陽の 300 倍を超える質量の星に成長すると提案されている。そのような大質量の星(very massive Pop III.1 star: VMS)は一生を終えると重力崩壊し直接ブラックホールになると考えられてきたが、近年 gamma-ray bursts (GRBs)の親星となりえるという提案がなされた。本講演では、VMS の超新星爆発における爆発的要素合成を計算し、金属欠乏星(第二世代以降の低質量星で、宇宙初期の元素組成比を反映していると考えられている星)の元素組成比と比較することにより、VMS が初期宇宙の化学進化に寄与してよいかを明確にする。VMS が $(3.3, 6.3) \times 10^{53} \text{erg}$ で爆発した場合、超新星爆発によって合成される元素の化学組成は金属欠乏星の $[\text{C}/\text{Fe}]$ と $[(\text{Ti}, \text{Ni}, \text{Zn})/\text{Fe}]$ を同時に再現できないことがわかった。今後、多次元相対論的流体シミュレーション・元素合成計算を実際に行う必要があるが、この結果からは宇宙初期において VMS は顕著に化学進化に寄与してはならないことを示唆している。

1000 太陽質量の星(超巨大質量星)

宇宙で最初に形成された初代星は 1000 太陽質量を超える大質量星であったのではないかと提案されている。このような星は、進化の過程で pair-instability を起こす領域に入るが、重力による束縛エネルギーが大きいため爆発に至らず、進化を続ける。その後、鉄の光分解が起こる温度と密度に達し、重力崩壊を起こす(Ohkubo et al 2006)。この重力崩壊に起因する爆発として、ジェット状の超新星爆発を仮定し 2 次元の非相対論的流体計算コードを用いたシミュレーションが行われている。この流体シミュレーションを用いた元素合成計算から、intergalactic medium の元素組成(Aguirre et al. 2004)が再現できることが報告されている。しかし、金属欠乏星との比較においては、 $[\text{O}/\text{Fe}]$ や $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ はシミュレーションから得られる組成比が小さく、再現できていない。

Population III gamma-ray bursts

近年超巨大質量星は重力崩壊の際、GRB になりえるとの提案がなされた。Suwa & Ioka 2011 では、Jet luminosity は降着率に比例すると仮定し、星を突き抜けてもなお降着率は高いまま維持されることが示された。Jet が星外に出た後でも、降着率が維持されることで Jet へのエネルギーの注入も維持され、GRB として観測されうると提案されている。そのため Pop III GRB は、Pop III star を直接観測する手段になり得るのではないかと注目を集めている(deSouza et al. 2011)。

C-rich metal-poor star

弱く継続時間の長い Jet を伴う SN によって C-rich な元素組成が実現され、C-rich EMP star や Hyper metal-poor star の組成比を再現できることが示されている(Tominaga et al. 2007)。そのため、Suwa & Ioka 2011 で提案されているような継続時間の長い Jet では、[C/Fe]が enhance され VMS の[C/Fe]が小さいという問題を解決できる可能性がある。

手法

Jet 状の爆発における元素組成は、球対称計算に非球対称性を近似的に取り入れる mixing-fallback model によって、Zn や Ti などの特定の元素を除いてうまく再現できることが示されている(Tominaga 2009)。Mixing-fallback model とは、物質を混合する領域の星内部側の境界 $M_{\text{cut}}(\text{ini})$ と混合する領域の星外側の境界 $M_{\text{mix}}(\text{out})$ 、混合した物質を放出する割合 f の3つのパラメータを用いて1次元 model に非球対称性を取り入れる model で、ある元素 A の放出量は

$$M_{\text{ej}}(\text{A}) = \int_{M_{\text{cut}}(\text{ini})}^{M_{\text{preSN}}} f(m) X(\text{A}, m) dm$$

$$f(m) = \begin{cases} f & m < M_{\text{mix}}(\text{out}) \\ 1 & m > M_{\text{mix}}(\text{out}) \end{cases}$$

となる。 M_{preSN} は超新星親星の質量、 $X(\text{A}, m)$ はある質量座標 m でのある元素 A の質量比である。

結果

EMP star の[C/Fe]と[Mg/Fe]は、Mg が合成される不完全 Si 燃焼層が mixing され、かつ、Fe が多く含まれている完全 Si 燃焼層をほとんど放出しない爆発で実現される。この爆発では、完全 Si 燃焼層で合成される Zn がほとんど放出されないため[Zn/Fe]が低くなる。

一方で、高い[Zn/Fe]を実現する完全 Si 燃焼層から物質を放出する爆発では、Fe の放出量が多く、[Mg/Fe]~0を実現するには完全 Si 燃焼層より上の物質はすべて放出されるため、[C/Fe]が低くなる。

考察とこれから

球対称流体計算+mixing-fallback model の下では超巨大質量星の超新星爆発の際の元素合成のイールドは超金属欠乏星の元素組成を再現できないことが示された。一方で Tominaga et al. 2007, Tominaga 2009 では、弱い Jet でのシミュレーションにおいても高い[Zn/Fe]を得ることができることが示されている。超巨大質量星の超新星爆発の有無を完全に決定するには、実際に多次元計算を用いて検証を行うことが必要であり、今後は2次

元相対論的流体・元素合成計算を行う予定である。

参考文献

- [1] Ohkubo et al 2006ApJ...645.1352O
- [2] de Souza et al 2011A&A...533A..32D
- [3] Tominaga et al 2007ApJ...657L..77T
- [4] Tominaga 2009ApJ...690..526T