

超新星爆発超新星爆発における放射性元素 ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の合成

堤 陵 (甲南大学 自然科学研究科)

Abstract

100 万年程度の半減期を持つ短寿命放射性同位体核種である ^{26}Al , ^{60}Fe は INTEGRAL や RHESSI, COMPTEL などの衛星によって放射性崩壊によって放射される γ 線の観測が行われている。その中でも、特に ^{26}Al は天の川銀河の中心部に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを明確に示している。しかしながら、これらの核種の生成源としては、重力崩壊型超新星、Wolf-Rayet 星、AGB 星などが提案されているものの未だ決着がついていない。そこで、私は重力崩壊型超新星における ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成に注目し研究を行う予定であり、本稿ではそれらの生成量の核反応率に対する依存性を調べた Tur et al. ApJ, 718, 357 (2010) についてのレビューを行う。彼らは $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $25M_{\odot}$ の星について、その進化および超新星爆発における元素合成計算を行い、特にトリプルアルファ反応および $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応に対する ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成量の依存性を調べた。その結果、彼らは核反応率の不定性の範囲でこれらの核種の生成量が一桁程度変化することがあることを明らかにし、また核反応率に対する依存性は ^{60}Fe , ^{26}Al , ^{44}Ti の順で大きいことを示した。その一方で、生成量と核反応率の関係は単調ではなく、生成量の最大値と最小値を見積もることは可能であるものの、その不定性の範囲を簡単な統計に基づいて明らかにすることは困難であることを示した。そのため、トリプルアルファ反応と $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 核反応率をより正確に求め、さらにそれを用いて実際に星の進化計算、超新星爆発計算を行うことが必要であると考えられる。

1 Introduction

放射性同位体核種である ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe は半減期がそれぞれ $7.2 \times 10^5 \text{yr}$, 60yr , $2.62 \times 10^6 \text{yr}$ である。これらの核種は放射性崩壊によって γ 線を放出し、その γ 線を INTEGRAL や RHESSI, COMPTEL などの衛星による観測が行われている。その中でも、特に ^{26}Al は天の川銀河の中心部に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを示している。 ^{44}Ti については、SN1987A と Cas A で存在が確認されており、 ^{44}Ti の生成量が見積もられている。これらの核種の生成源は ^{44}Ti , ^{60}Fe については超新星爆発であると考えられているが、 ^{26}Al はいまだ生成源を特定するに至っておらず、重力崩壊型超新星爆発、Wolf-Rayet 星、AGB 星などが提案されている。超新星爆発での合成元素の生成量を計算する上で、He 燃焼時の核反応である $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率 $R_{\alpha,12}$ とトリプルアルファ反応率 $R_{3\alpha}$ は特に重要であり、これらの核反応率は ^{12}C と ^{16}O の相対的な割合を決

定し、He 燃焼後のすべての段階に影響を及ぼす。これらの核反応率には実験的不定性が 1σ の範囲内で 12%–25% あり、今までの重力崩壊型超新星爆発でのこれら ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成量の計算にはばらつきがあることが知られている。そこで Tur et al. ApJ, 718, 357 (2010) では、これらの生成量に対する He 燃焼核反応率の依存性を調べている。本稿ではこの論文についてレビューを行う。

2 Models

Tur らは $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $25M_{\odot}$ の星について H 燃焼から重力崩壊までの星の進化を KEPLER コードを用いて計算した。超新星爆発についてはピストンを O 殻の底に配置し、爆発エネルギーを $1.2 \times 10^{51} \text{erg}$ とし、Fallback と Mixing を考慮してシミュレートした。He 燃焼核反応率 $R_{\alpha,12}$ と $R_{3\alpha}$ と $\pm 2\sigma$ の範囲で 3 通りにそれぞれ変化させ ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成量を計算している。(A) $R_{3\alpha}$ を一定に保ち、 $R_{\alpha,12}$

を変化させる。(C) $R_{\alpha,12}$ を一定に保ち、 $R_{3\alpha}$ を変化させる。(B) 両方の核反応率を同じ割合で変化させる。また、初期の星の組成は太陽と同じ組成であるとし、Anders&Grevsse(1989) と Lodders(2003) の 2 通りの太陽組成についてそれぞれ計算している。この 2 通りの太陽組成の違いは主に Lodders(2003) は Anders&Grevsse(1989) に比べて、CNO 含有量が大幅に少ないことである。

3 Results

$15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, $25M_{\odot}$ のそれぞれの星について、 ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成量を He 燃焼核反応率をスタンダードな反応率 ($R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}$) = (1.00, 1.20) として、初期太陽組成に対する依存性を調べた。その結果、初期太陽組成の依存性は、次に述べる He 燃焼核反応率の依存性よりも小さいことを示した。He 燃焼核反応率の変化に対する ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の生成量の変化は、単調ではないことを示している (図??)。これらの核種の中で一番依存性が強いのは ^{60}Fe であり、 ^{26}Al の依存性は弱く、 ^{44}Ti に関してはさらに弱い (図??)。

^{26}Al の生成に重要な核反応は $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反応であり、すでに H 燃焼時から活発に行われるので ^{26}Al は He 燃焼開始までの間にかなりの量が生成されている。また同時に温度が $\sim 10^6\text{K}$ 以上で β^+ 崩壊により ^{26}Al は破壊される。 ^{26}Al は C 殻燃焼でも生成され、本質的にはコアで O が枯渇するまでは ^{26}Al の量はほぼ一定で残る。最終的に ^{26}Al の放出量は He 燃焼開始時の量の約一桁オーダーで大きくなる (図??)。He 燃焼開始時の ^{60}Fe の量 ($\sim 3 \times 10^{-15} M_{\odot}$) はかなり少ないが、 ^{60}Fe は He 燃焼で多く生成されることから、コアで He が枯渇した時には ^{60}Fe の量は $\sim 10^{-7} M_{\odot}$ まで素早く増加する。この段階から星の進化に応じて徐々に ^{60}Fe の量は増加する。 ^{60}Fe は He 燃焼核反応率に強い依存性があり、 ^{60}Fe の生成量は $R_{3\alpha}$ を 18% 増加させたとき ($R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}$) = (1.18, 1.20)、スタンダードの値 ($R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}$) = (1.00, 1.20) に対して約一桁増加した (図??)。He 燃焼開始時の ^{44}Ti の量は極めて少ない。He 核反応率がスタンダードの値の場合 ($R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}$) = (1.00, 1.20)、 ^{44}Ti の一部は

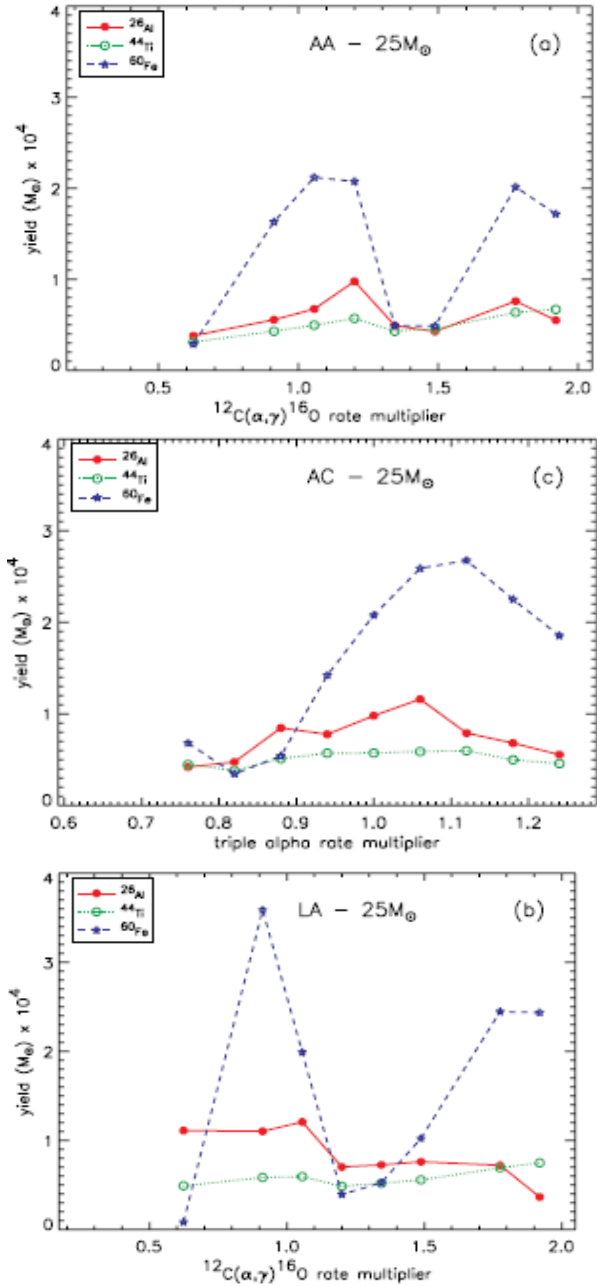


図 1: それぞれ $25M_{\odot}$ の星について核種の生成量を表しており、上図は初期太陽組成を Anders&Grevsse(1989) とし、 $R_{\alpha,12}$ を $\pm 2\sigma$ の範囲で変化させた場合、中図は上図と同じ初期太陽組成で $R_{3\alpha}$ を $\pm 2\sigma$ の範囲で変化させた場合、下図は初期太陽組成を Lodders(2003) とし、 $R_{\alpha,12}$ を $\pm 2\sigma$ の範囲で変化させた場合である。

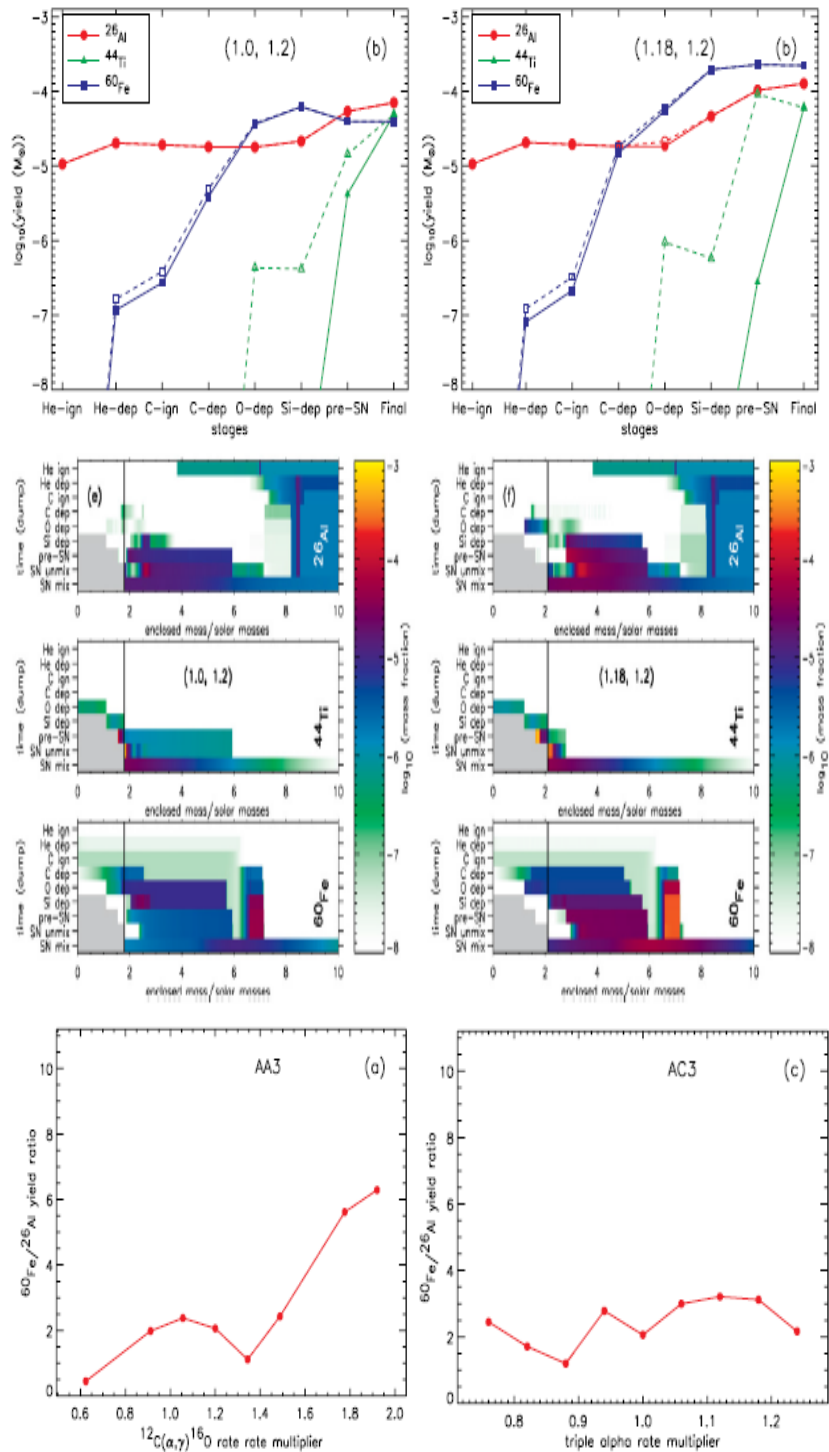


図 2: 上図は星の進化における核種の総生成量の変化を表している。中図は pre-SN 時の質量座標に対する核種の生成量を表し、左の図は $(R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}) = (1.00, 1.20)$ のときの場合、右の図は $(R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}) = (1.18, 1.20)$ のときの場合である。下図は $R_{\alpha,12}$ と $R_{3\alpha}$ の変化に対する ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量比である。

O 殻燃焼で生成され、 $R_{3\alpha}$ を 18% 増加させた場合 ($R_{\alpha,12}, R_{3\alpha}$) = (1.18, 1.20)、コアで Si が枯渇するまでほとんど生成されない。 ^{44}Ti は超新星爆発時にかなり多くの量が生成され、超新星爆発の性質によってその生成量は特徴づけられる (図??)。

4 Discussion

$R_{\alpha,12}$ の増加もしくは $R_{3\alpha}$ の減少の割合によって He 燃焼後の C の量は緩やかに減少することが予測されているが、星の進化を経て超新星爆発によって生成される ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の量は、単調な振る舞いをしないことが図??からわかる。これら核種の生成量に含まれる不定性は、He 燃焼核反応率のよる不定性だけではなく、対流の不定性などすべての不定性を含んでいる。その核種の中で、 ^{60}Fe が一番それらの不定性に敏感である。(図??)。

Tur らの超新星爆発での合成元素の生成量と観測との比較を考える。これらの核種の半減期は、銀河の進化のタイムスケールよりも十分短いのでこれら核種の崩壊により放出される γ 線の生成率は、超新星爆発に放出される ^{26}Al , ^{44}Ti , ^{60}Fe の量とつりあうと予想される。観測された天の川銀河内の ^{26}Al の γ 線フラックスと超新星爆発のイベント率から推測される 1 つの超新星爆発あたりに見積もられる ^{26}Al の生成量は、Tur らの論文が示した ^{26}Al の生成量とほぼ一致している。次に、 ^{26}Al と ^{60}Fe の生成量の比を比較する。もし、これら 2 つの核種の生成源が超新星爆発であるなら、同じ分布で観測されるはずである。観測された γ 線フラックスの比は生成量の比で表すことができ、Wang(2007) は γ 線観測から ^{26}Al に対する ^{60}Fe の存在量比は、 (0.15 ± 0.06) と示した。Tur らの示した ^{26}Al と ^{60}Fe の存在量比は、それに比べるとかなり大きい (図??)。

5 Conclusion and Future work

Tur らは He 燃焼核反応率の不定性の範囲でこれらの核種の生成量が一桁程度変化することがあることを明らかにし、また核反応率に対する依存性は ^{60}Fe , ^{26}Al , ^{44}Ti の順で大きいことを示した。その一

方で、生成量と核反応率の関係は単調ではなく、生成量の最大値と最小値を見積もることは可能であるものの、その不定性の範囲を簡単な統計に基づいて明らかにすることは困難であることを示した。また、彼らは初期太陽組成について、Anders&Grevesse(1989) と Lodders(2003) を比較することでその依存性を調べた。He 燃焼核反応率の依存性に比べると初期太陽組成の依存性は小さいことを示した。Tur らの ^{26}Al に対する ^{60}Fe の生成量比は観測に比べると大きすぎることを示されている。これまでの ^{26}Al や ^{60}Fe の生成量の計算には、球対称の爆発を仮定している。私は非球対称の爆発を仮定することで ^{60}Fe の量を減らせるのではないかと考え、非球対称爆発を仮定した星の進化計算、超新星爆発計算を行いたいと考えている。

Reference

Tur et al. ApJ,718,357 (2010)