

新しい triple- α 反応率が恒星進化における s -process 元素合成に与える影響

2011 年度第 41 回天文・天体物理若手 夏の学校 2011 年 8 月 1 日 (月)~8 月 4 日 (木)

@愛知県西浦温泉 ホテルたつき

九州大学 理学府 物理学専攻

宇宙物理理論研究室

菊池 之宏

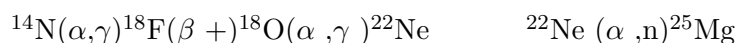
Abstract

太陽質量の 10 倍を超える質量を持つ恒星にはヘリウム燃焼と炭素燃焼において中性子源があるため、weak s -process と呼ばれる重元素合成過程が起きると考えられている。近年、Ogata et al.(2009) によって新しい triple- α 反応率 (以下 OKK rate) が発表された。この反応率は恒星進化に関わる温度付近で従来の反応率より数桁から数十桁大きい。Triple- α 反応は、進化における主要な元素である ^{12}C と ^{16}O に関わる重要な反応であり、OKK rate を用いた恒星進化計算並びに元素合成計算は従来の結果を変える可能性がある。本研究では星全体の質量が $25M_{\odot}$ で中心に $8M_{\odot}$ のコアを持つ恒星をモデルに、一次元静水圧平衡を仮定した比較的小さい核反応ネットワークで恒星進化計算を行い、その結果を用いて post-process によって大規模元素合成計算を炭素燃焼段階まで行った。得られた結果として、 s -process によって生成される元素の生成量は炭素燃焼後ではどちらの元素を用いた場合でも大きな違いは見られなかった。よって、OKK rate が weak s -process に与える影響は少ないと考えられる。

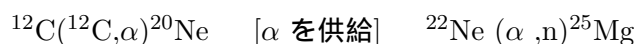
Introduction

S -process とは中性子捕獲反応と β 崩壊によって鉄より重い元素が質量数を増加させる過程の一つである。恒星進化では中性子量が少ないため、中性子捕獲反応のタイムスケールが β 崩壊より遅い。そのため中性子不安定核はすぐに β 崩壊をして安定核になるので、原子核は安定核付近を通過して質量数を増やす。太陽の 10 倍以上の質量を持つ大質量星での s -process は weak s -process とよばれ、質量数が 60 90 の元素が生成されると考えられている。Weak s -process は恒星進化中に中性子過剰となる 2 つの段階、He 燃焼と C 燃焼で起きる。

- He 燃焼



- C 燃焼



これらの反応によって中性子が供給されるが、その供給量は元になる元素 (ヘリウム、炭素、窒素など) の量や核反応率に依存することは調べられている。例えば炭素燃焼 ($^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$) の反応率の不定性と s -process によって生成される元素の関係調べた Bennet et al. (2010)[1] や ^4He が 3 つ反応して一つの ^{12}C になる triple- α 反応率と $^{12}\text{C}(\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反応率の不定性と s -process によって生成される元素の関係を調べた tur et al.(2009)[2] などがある。

近年、Ogata et al.(2009)[3] によって新しく triple- α の反応率が発表された。これは He 燃焼がおこる 10^8 K 付近で従来の反応率 (Fynbo et al. 2005 [4]) より 5 桁以上大きい (図.1)。先行研究によって、軽い元素の熱核反応率の不定性が s-process によって生成される元素の量に影響を与える事が知られている。そこで本研究では OKK rate を用いた恒星進化計算ならびに s-process 元素合成計算を行ない従来の反応率との比較を行なった。

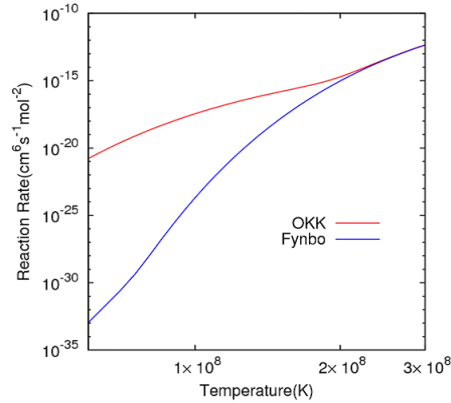


図 1: 横軸を温度とした Triple- α 反応率。従来の反応率 (Fynbo) に対して新しい反応率 (OKK) は 10^8 K 付近で 5 桁ほど大きい。

Methods

モデルは星全体の質量が $25M_{\odot}$ の恒星が中心に $8M_{\odot}g$ Helium コアを持つとし、このコアを計算領域とする。計算は 2 つの段階に分ける。

恒星進化計算 星は球対称で水平圧平衡であると仮定すると、流体力学の基礎方程式は以下に挙げる 4 個となる。

$$\frac{dr}{dM_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \quad (\text{連続の式}) \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dM_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \quad (\text{静水圧平衡の式}) \quad (2)$$

$$\frac{dl}{dM_r} = \epsilon_n - \epsilon_{\nu} + \epsilon_g \quad (\text{エネルギー保存の式}) \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dM_r} = -\frac{GM_r T}{4\pi r^4 P} \nabla \quad (\text{エネルギー輸送の式}) \quad (4)$$

各変数は M_r : 質量座標、 P : 圧力、 T : 温度、 l : 単位時間あたりに半径 r の球面を通るエネルギー、 ρ : 質量密度、 ϵ_n : 核反応によるエネルギー生成率、 ϵ_{ν} : ニュートリノによるエネルギー損失率、 ϵ_g : 収縮、膨張によるエネルギー生成、損失率 ($\epsilon_g = -Tds/dt$)、 ∇ : 温度勾配 ($\nabla = d \ln T / d \ln P$) である。これらの方程式を Henyey 法と呼ばれる手法を用いて解く。上記の連立方程式によって得られた温度と密度を利用して組成の変化を求める。 i 番目の核種の質量比を X_i とすると組成の時間変化は、

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{m_i}{\rho} \left(\sum_j r_{ji} - \sum_k r_{jk} \right), \quad i = 1, \dots, I \quad (5)$$

と書ける。ここで、 r_{ij} は i から j へ元素が変化する反応率を、 m_i は i 元素の質量を表す。反応率は温度と密度に依存するので、Henyeey 法により温度と密度を求めてそれぞれの反応率を決定する。時間 Δt の間に組成が ΔX_i だけ変化するとし、組成の時間発展を得る。ここでは恒星内に熱エネルギーを供給する 17 核種を扱う。核反応のうち Triple- α 反応率について OKK(Ogata et al. 2009) と Fynbo(Fynbo et al. 2005) を使って得られた結果を比較する。計算コードは Hashimoto et al. (1995)[5] を用いる。対流は Schwarzschild の条件を用いる。

$$\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}} \quad (6)$$

この条件の領域は流体の運動が不安定となり対流が起こると考えられる。対流が起きている領域は対流によって混ぜられているとし、組成を平均化する。

核反応ネットワーク計算 で得られた温度・密度・対流領域の時間発展を使って s -process を考慮した 1714 核種の元素合成計算を行なう。多くの核反応を扱う場合に、その核反応率が重要となる。今回は JINA REACLIB compilation と呼ばれる核反応率を集めて編集した反応率セットを用いる。これは WEB 上¹に公開されている。恒星進化計算と同様に、この反応率セットのうち Triple- α 反応率について OKK(Ogata et al. 2009) と Fynbo(Fynbo et al. 2005) を使って得られた結果を比較する。

Result

● 恒星進化計算

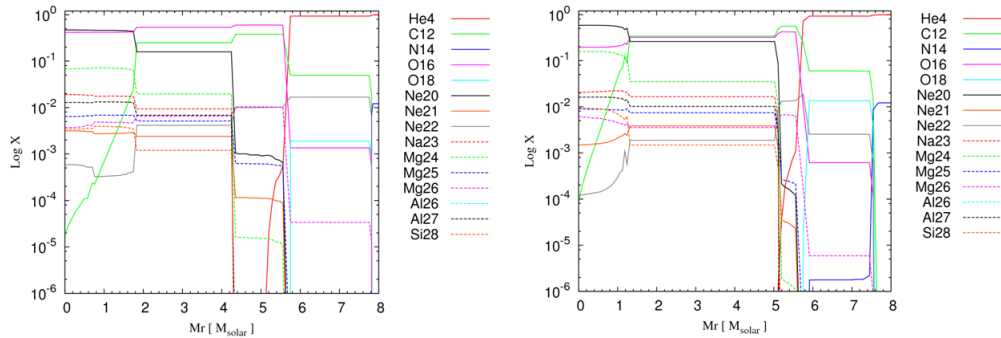


図 2: C 燃焼終了時の組成分布。横軸に質量座標、縦軸に各元素の mass fraction のをとる。左 : Fynbo 右 : OKK

上の図は計算の結果得られた C 燃焼終了時のそれぞれの組成構造である。横軸は中心からの距離に対応する。従来の反応率だと中心コアの外側に O rich layer が形成されるが、OKK では ²⁰Ne が豊富にある層が見られる。全体的に Fynbo に比べて OKK は ¹⁶O が少ない。

¹(<http://group.nsl.msui.edu/jina/reactlib/db/>)

上記の理由を考察するために3種類の元素の増減を比較した(図.3)。OKKのほうがTriple- α 反応率が大きいため、He 燃焼が低温で始まる。そして、 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ が活性化する前に ^{12}C が増加し、 ^4He が欠乏する。これによりOKKの場合 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ が起きにくく ^{16}O がFynboと比較して生成されにくいため、 ^{16}O と ^{12}C の組成比は逆転すると考えられる。

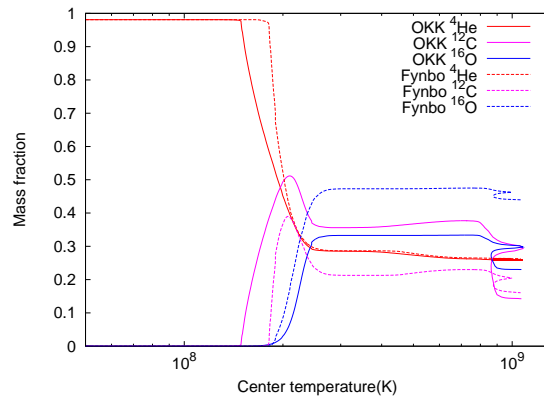


図 3: $^4\text{He}^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の mass fraction の計算領域での平均。実践は OKK、破線は Fynbo のもの。

● 核反応ネットワーク計算

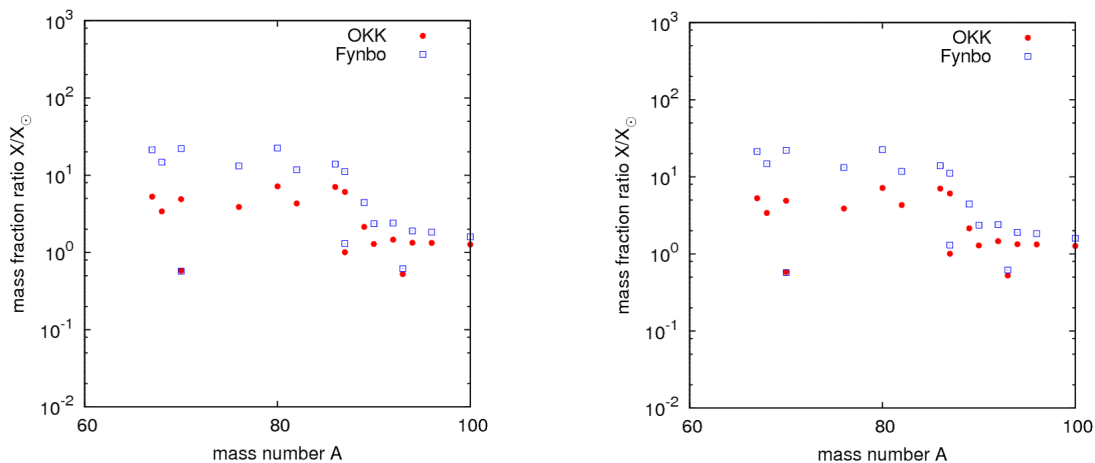


図 4: He 燃焼後、C 燃焼後における s 元素の mass fraction を太陽系組成で規格化したもの。s 元素の生成量を示す。左: He 燃焼後 右: C 燃焼後

図. 4 はそれぞれのステージでの起源がほぼ s-process である s 元素の生成量を示す。He 燃焼時には質量数が 90 以下の元素は 2 倍近くの差があるが、C 燃焼後には同程度になっている。中性子を生成する主要な反応は $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$, $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},n)^{23}\text{Mg}$ である。He 燃焼時に OKK の s 元素生成量は少ない(図.5 左参照)。これは ^4He が triple- α に使われて少なくなったために $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)^{25}\text{Mg}$ が起きにくくなったため

ある (Fig.5 左)。 ^{22}Ne の総量は ^{14}N の量で決まるため C 燃焼で $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\alpha)^{20}\text{Ne}$ によって α が作られると、残っている ^{22}Ne が反応する。また、今回の計算では従来よりも多くなった ^{12}C が C 燃焼時に大きな中性子源となることが分かった (図.5 右)。

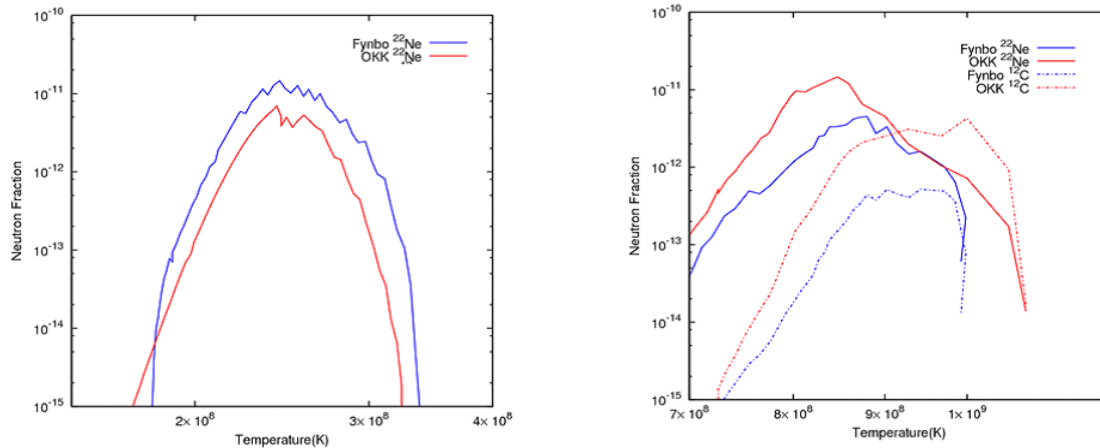


図 5: He 燃焼後、C 燃焼後における ^{22}Ne と ^{12}C 起源の中性子の供給量をそれぞれ示す。
左：He 燃焼中 右：C 燃焼中

Conclusion

OKK rate は従来の反応率と比較して恒星進化初期の温度で数桁大きい triple α 反応率である。Triple- α 反応は、進化における主要な元素である ^{12}C と ^{16}O に関わる重要な反応であり、OKK rate を用いた恒星進化計算並びに元素合成計算は従来の結果を変える可能性がある。計算の結果次のような結果が得られた。

恒星進化：進化を通して O の比が小さくなる。O rich layer Ne rich layer (C 燃焼終了時)

S-process: He 燃焼後は OKK のほうが生成量が少ない。C 燃焼で同じくらいになる。OKK の影響は小さい。

以上から、OKK を用いた計算では He 燃焼時の ^{12}C が多くなり ^{16}O が少なくなるが、C 燃焼終了時の s 元素生成量は結果として従来と同程度となる。

Reference

- [1] M. E. Bennett, R. Hirschi, M. Pignatari, S. Diehl, C. Fryer, F. Herwig, A. Hungerford, G. Magkotsios, G. Rockefeller, F. Timmes, M. Wiescher and P. Young JPCS. **202** (2010) 012023
- [2] C. Tur, A. Heger and S. M. Austin ApJ. **702** (2009), 1068.
- [3] K. Ogata, M. Kan, and M. Kamimura, Prog. Theor. Phys. **122** (2009), 4.
- [4] H. O. U. Fynbo et al. Nature, **433** (2005), 136.
- [5] M. Hashimoto, Prog. Theor. Phys. **94** (1995), 663.