

Triple- α 反応率の不定性が超新星爆発直前における大質量星の 元素組成に与える影響

2012年天文若手の会 夏の学校 @福井県東尋坊温泉三国観光ホテル 2012年8月1-4日

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)¹⁾ 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 ^4He 、 ^{12}C 及び ^{16}O に関わる重要な反応であり、OKK rate は恒星進化や組成分布の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とし、熱核反応のみのネットワークで一次元静水圧平衡を仮定した恒星進化計算を行なった。Triple- α 反応率については OKK rate と従来の反応率として Fynbo et al.(2005)²⁾ のものを用いて比較した。得られた結果として、OKK rate を用いると ^4He が Triple- α に使われるために他の ^4He を消費する反応が阻害されヘリウム燃焼での ^{12}C の生成量が増加し、 ^{16}O が減少した。ヘリウム燃焼以後は従来ならば O rich layer を形成する層が Ne rich layer となるなど星の内部構造に差異を与えることが分かった。今回の講演ではこれらの結果を定量的に議論する。

Introduction

太陽質量 (M_{\odot}) の10倍を超える質量を持つ星は主系列星段階を経て、中心に ^4He のコアを持つ。やがて重力収縮によってコアの温度、密度が上昇し、トリプル α 反応と呼ばれる、 ^4He が ^{12}C に合成される反応が起き、He 燃焼段階が始まる。He が枯渇すると重力収縮をして、今度は C が Ne や Mg, Na に合成される C 燃焼段階となる。このように、大質量星のコアでは重力収縮と熱核元素合成が繰り返し行われ、最終的には Fe のコアができる。今回の発表では O 燃焼まで扱う。

近年、Ogata et al.(2009) 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 10^8K 付近で従来の反応率 (Fynbo et al. 2005) より5桁以上大きい (図1)。また、先行研究 (Tur et al. 2010)³⁾ によって、軽い元素の熱核反応率の不定性が恒星進化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を行ない従来の反応率との比較を行なった。

Methods

モデルは星全体の質量が $25M_{\odot}$ の恒星が中心に $8M_{\odot}$ の 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。

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

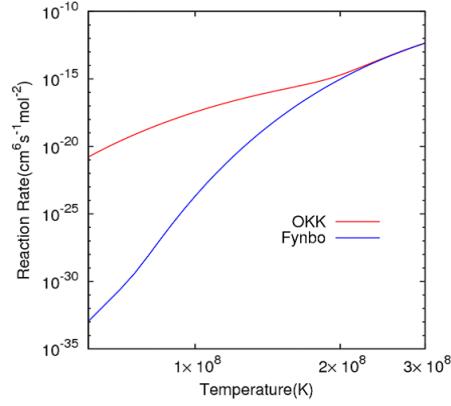


図 1: 横軸を温度とした Triple- α 反応率。従来の反応率 (Fynbo) に対して新しい反応率 (OKK) は 10^8 K 付近で 5 桁ほど大きい。

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 ($\epsilon_g = -T ds/dt$)、 ∇ : 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、Henyey 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)⁽⁴⁾ 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。

Result

図2は OKK rate と Fynbo rate のそれぞれで得られた組成をコアの全領域で平均して太陽系組成 (Anders Grevesse 1989)⁽⁵⁾ で規格化したものである。OKK rate は Fynbo rate より He 燃焼段階の温度で数桁高いので多くの ^4He が ^{12}C となり、そのため ^{16}O が減少した。 ^{12}C が豊富にあるため C コア燃焼、C シェル燃焼のそれぞれで C 燃焼起源の ^{20}Ne 、 ^{23}Mg 、 ^{23}Na が多く作られている。

ただし、 ^{16}O は少ないため、それから合成される ^{31}S は少なくなっている。したがって、OKK rate では ^{12}C 起源の元素が多く、 ^{16}O 起源の元素が少なくなると予想される。

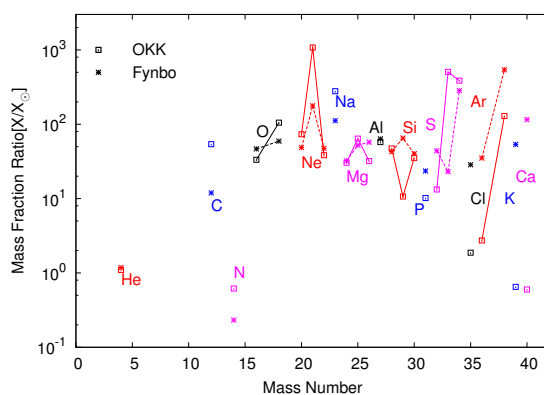


図 2: O コア燃焼終了時の OKK rate, Fynbo rate における核元素の組成を太陽系組成で規格化したもの。

Discussion

Triple- α 反応は熱核反応の中で最も軽い ^4He が関わっているため、この反応率の不定性はその後の ^4He より重い核の組成に影響を与えることが予想される。Triple- α 反応で生成される ^{12}C はその後の $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ という反応で ^{16}O を生成する。従来の計算や観測では組成は $^{12}\text{C};^{16}\text{O}$ の関係になると言われている。しかし、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ の反応率は原子核実験で求められつつあるが、恒星内温度領域ではいまだに不定性がある。今回、上の計算で用いた反応率は CF85(Caughlan et al.1985)⁽⁶⁾ であり、これと CF88(Caughlan and Fowler 1988)⁽⁷⁾ という反応率を比較する。この二つの関係は図3に示す。また、恒星の質量と ^{12}C 、 ^{16}O の量には関係があり、恒星の質量が小さいと ^{12}C が多く、 ^{16}O は少ないことが知られている。

超新星 1987A の progenitor は質量が $20M_{\odot}$ の恒星 ($6M_{\odot}$ のコアを持つ) だと言われており、観測とあわせて ^{12}C と ^{16}O の関係から triple- α 反応率の不定性を制限できないかと考える。

中心コアの質量が $5M_{\odot}$ 、 $6M_{\odot}$ 、 $8M_{\odot}$ の恒星について、triple- α 反応は OKK rate と Fynbo rate の 2 通り、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ は CF85 と CF88 の 2 通り、全部で 12 通りの組み

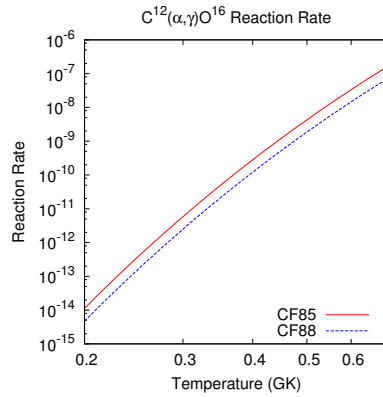


図 3: 温度が $2 \times 10^8 \text{K}$ から $7 \times 10^8 \text{K}$ における 2 つの $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率 (赤線が CF85、青点線が CF88) をプロットしたもの。この反応が起きる温度では CF85 が反応率大きい。

合わせて He コア燃焼終了まで計算を行なった。

図 4 はそれぞれの組み合わせについて全領域の組成の平均をとったものである。Triple- α 反応では OKK rate が Fynbo rate より大きいため ^{12}C が多く生成され、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ の反応率では CF88 のほうが CF85 より低いため ^{16}O ができにくくなっている。

OKK rate と CF88 を使ったものはいずれの質量でも ^{12}C が ^{16}O より多くなっている。特に $5M_{\odot}$ では ^{12}C が ^{16}O の 2 倍以上になっている。 $6M_{\odot}$ では OKK rate、CF85 の組み合わせで $X(^{12}\text{C}) \simeq X(^{16}\text{O})$ となった。今回の発表では超新星爆発直前まで計算することができなかったが、超新星 1987A の観測などと比較するために超新星爆発直前まで計算する必要がある。

name	Mass(M_{\odot})	$\alpha(\alpha,\gamma)^{12}\text{C}$	$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$	^4He	^{12}C	^{16}O
M8fy85	8	Fynbo	CF85	0.2771	0.1281	0.5742
M8fy88	8	Fynbo	CF88	0.2772	0.1481	0.5530
M8okk85	8	OKK	CF85	0.2771	0.2882	0.4165
M8okk88	8	OKK	CF88	0.2771	0.3973	0.3066
M6fy85	6	Fynbo	CF85	0.3619	0.1311	0.4888
M6fy88	6	Fynbo	CF88	0.3675	0.2762	0.3380
M6okk85	6	OKK	CF85	0.3644	0.3081	0.3105
M6okk88	6	OKK	CF88	0.3629	0.3921	0.2276
M5fy85	5	Fynbo	CF85	0.4159	0.1291	0.4377
M5fy88	5	Fynbo	CF88	0.4161	0.2625	0.3040
M5okk85	5	OKK	CF85	0.4123	0.3251	0.2461
M5okk88	5	OKK	CF88	0.4095	0.3964	0.1774

図 4: それぞれの組み合わせの恒星の コアに占める元素の割合。

Conclusion $8M_{\odot}$ のコアを持つ恒星の進化計算を 2 つの triple- α 反応率 (OKK rate, Fynbo rate) を用いて行ない、その結果を比較した。triple- α 反応率に加え、恒星の質量と $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率 (CF85, CF88) も変えて計算を行なった。その結果として、4 つ

の組合わせで ^{12}C と ^{16}O の逆転が見られた。観測からの制限を得るために超新星爆発直前まで計算を行なう必要がある。

Reference

- 1) K. Ogata, M. Kan and M. Kamimura, *Prog. Theor. Phys.* 122 (2009), 1055.
- 2) H. O. U. Fynbo et al., *Nature* 433 (2005), 136.
- 3) C. Tur, A. Heger and S. M. Austin, *ApJ*. 718 (2010), 357.
- 4) M. Hashimoto, *Prog. Theor. Phys.* 94 (1995), 663.
- 5) E. Anders, and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, (1989), 197.
- 6) G.R. Caughlan, W.A.Fowler, M. J. Harris and B.A. Zimmerman, *At. Data Nucl. Data Tables*, 32, (1985), 197.
- 7) G. R. Caughlan and W. A. Fowler, *At. Data Nucl. Data Tables*, 40 (1988), 283.