

Dependence of the C/O ratio on the Initial Mass and Metallicity of the Asymptotic Giant Branch Stars

田染 翔平 (北海道大学大学院 宇宙理学専攻)

Abstract

Because carbonaceous dust is expected to form in C-rich AGB stars and to be injected to interstellar space, C-rich AGB stars can be important resource of dust in galaxies in the early universe. But the dependence of C/O ratio on the initial mass and metallicity of AGB stars as well as the dust formation and mass loss in metal poor stars has not yet been investigated systematically.

In this study, (I) we investigate the dependence of C/O ratio on the initial mass and metallicity of AGB stars employing Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) and find that all stars with initial mass $M_{init} \leq 4 M_{\odot}$ evolve to C-rich AGB stars except the star of $4 M_{\odot}$ with solar metallicity. (II) By adopting the criterion for realizing dust driven wind derived from the model calculations of dust driven wind, it is found that all stars which encounter the TDU and finish HBB (if HBB occurs) satisfy the criterion for the dust driven wind except stars with $2 M_{\odot}$ and $Z \leq 10^{-4}$. (III) In initial metallicity $Z = 0$, where we don't know whether mass loss occurs or not, We compare models including mass loss with ones including no mass loss and found that we should use mass loss rate considering dust formation.

1 導入

ダストの供給源として、漸近巨星分枝星 (Asymptotic Giant Branch star; AGB 星) の重要性が近年議論されている。核崩壊型超新星がダストの主要な供給源であると言われてきた宇宙初期においても、最近の化学進化モデル (Valiante et al. 2011) は AGB 星が重要な寄与を与えていることを示した。

局部銀河群における Spitzer 望遠鏡の観測によって AGB 段階のダスト形成が精査されている。アウトフローの機構やグレイン形成の詳細は分かっていないが、定性的には、脈動によって生じた衝撃波が星表面上のガスを持ち上げることで冷却・凝縮されてダストグレインが形成され、さらに炭素質のダストの場合、そのダストが放射圧によって加速されてガスを引きずってアウトフローを起こして星間空間に放出されると考えられている。

そこで、われわれは初期宇宙における AGB 星がダストの主要な供給源となり得るかを見るために、上記のようなダスト形成およびそれに伴う質量放出を AGB 星進化と整合性を保持して計算したい。ダス

トの性質は星の表面の化学組成に依存している (Ferrarotti & Gail 2001) ため、まず (1) AGB 星の進化計算を行い、その表面組成を用いて (2) ダスト形成およびそれに伴う質量放出を計算し、さらに (3) ダスト形成を考慮した (2) の質量放出率を用いて AGB 星の進化計算を再び行う。

星の表面組成は TP (Thermal Pulse)-AGB 段階のイベントである Third Dredge-Up (TDU) や Hot Bottom Burning (HBB) に支配されている (Iben & Renzini 1983)。一方 TDU や HBB は初期金属量や初期質量のほか、質量放出率や対流効率のパラメータへの依存性もある。

今回は (1) の AGB 星の進化計算を初期質量 $M=2-5 M_{\odot}$ 、金属量 $Z=0-0.019$ に対して行い、われわれが設定したダスト形成およびそれに伴う質量放出を起こす規準を満たすかどうかを調べた。ただし、低金属量星では質量放出が起こるかどうか分かっていないため、 $Z=0$ の各質量に対しては質量放出がない場合も計算して比較した。

2 AGB 星の表面組成変化

ヘリウムコア燃焼段階終了後、中質量星 ($M < (8-9)M_{\odot}$) は、C+O 縮退核との間でヘリウムリッチな層が周期的に燃焼することで引き起こされる連続した熱パルス (TP) を経験する。この進化段階は AGB として知られている (AGB のレビューは Herwig 2005)。ここでは AGB 星の表面組成に影響を与える 2 つの基礎的な物理過程である TDU と HBB のメカニズムと効果について簡単に述べる。

2.1 Third Dredge-Up

TDU はそれぞれの TP に続いて表面外層が内部に侵入することに関連している。 3α 燃焼の結果として形成される Pulse-Driven Convective Zone (PDCZ) によって、ヘリウム合成の生成物 (主に炭素と酸素) が拡散される。その領域に外層が混入した結果、表面に炭素が供給されるのである。

TDU のモデル化は数値的な取り扱いに大きく依存する。数時間程度のタイムステップと 5000 程度のメッシュポイントをもった細かい時間・空間区分が必要である。また、表面对流層の底から、あるいは TP が始まって形成される PDCZ の境界からの overshoot を仮定することでより深い TDU を得ることも可能である。

炭素リッチモデルに対してはさらに、低温の放射 opacity に不確定性がある。C/O 比が 1 に近づくと放射の主な吸収源は酸素を持つ分子から、主要な元素の表面質量比により依存性の高い、炭素を持つ分子に変わる。つまり、炭素リッチなモデルは、星の表面化学組成の変化により依存しやすいのである。炭素増加による放射吸収増大の効果は、AGB 段階の計算で一般に無視されていた。しかし、はじめて Marigo(2002) によって示唆され、後に AGB のフル計算 (Ventura & Marigo 2010) に基づいて確認されたように、補正した opacity を用いると、C/O 比が 1 に到達すると突然膨張しそれに伴って質量放出率が増加する。そして、外層がより速くはがれ、表面に汲み上げられる炭素量は減少する (Ventura & Marigo 2010)。また、膨張に伴う冷却によって、HBB を和らげる可能性も指摘されている (Marigo 2007)。今回の計算で

は炭素リッチな組成を考慮した opacity は入れていないが、次回の計算では考慮する予定である。

2.2 Hot Bottom Burning

TDU とは異なり、HBB はパルス間に起こる。外層の底の温度は $\sim 40 \times 10^6 \text{K}$ を超えて p-capture 合成が活発化する。その生成物は対流によってすぐさま表面に運ばれる。弱い HBB は表面の炭素を減少させ、強い HBB ($T > 70 \times 10^6$) は表面の酸素を減少させるが、いずれの場合でも表面の窒素を大幅に増加させる。

3 恒星進化モデル

本計算の恒星モデルは初期金属量 $Z = 0, 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 0.001, 0.01, 0.019$ に対して質量は $M = 2, 3, 4, 5 M_{\odot}$ をもつ。MESA コード (以下、詳しくは Paxton et al. 2011 参照) を用いて前主系列段階から AGB 段階まで計算した。

対流は混合距離理論 (MLT) にしたがってモデル化されている。対流境界はシュワルツシルトの規準で決められている。対流不安定領域では化学組成の混合と核燃焼は拡散スキームを用いてカップルさせている。放射安定領域内の対流の overshoot は、拡散係数を対流境界から指数関数的に減少する描像で記述されている。overshooting parameter は Herwig et al(1999) にしたがって、 $f = 0.016$ とした。

質量放出率は Reimers(1975) によるものを用い、 $\eta_R = 1.0$ とした。

4 結果

4.1 TDU と HBB の質量および金属量依存性

TDU は $5M_{\odot}$ 、 $Z=0$ 以外のモデル全てで起こった。HBB は $5M_{\odot}$ 、 $Z=0$ 以外の全ての初期金属量、初期質量 $4M_{\odot}$ 以上で起こり、 $2M_{\odot}$ では起こらなかった。 $3M_{\odot}$ では $Z \leq 10^{-4}$ で HBB が起こったが、 $Z \geq 10^{-3}$ では起こらなかった (図 3)。ただし、HBB は初期

質量、初期金属量に関わらず、総質量が $2M_{\odot}$ あたりになると止まり、その後は TDU によって C/O 比が上昇する傾向が見られた。

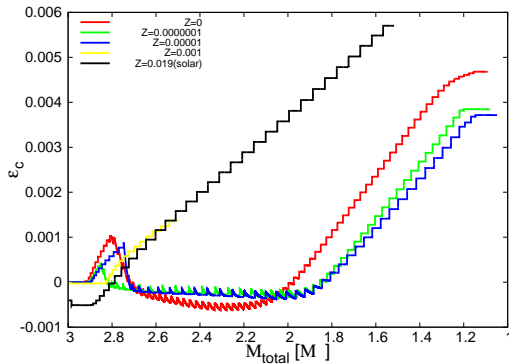


図 1: ϵ_c for $Z=0$ (red), 10^{-7} (green), 10^{-5} (blue), 10^{-3} (yellow), 0.019(solar) as a function of the total mass for the AGB star model with $M_{init} = 3M_{\odot}$

4.2 C/O 比の質量および金属量依存性

初期質量 $4M_{\odot}$ 以下と初期金属量 $Z \leq 0.001$ の $5M_{\odot}$ は、太陽金属量の $4M_{\odot}$ を除いて、全て炭素リッチ AGB 星になった。炭素リッチ AGB 星にならなかったモデルは全て HBB 段階で計算が止まってしまった(収束問題)。

4.3 $Z=0$ の質量放出がない場合との比較

質量放出がない場合の計算において、対流境界がシュワルツシルトの規準では計算が止まってしまったため、Ledoux の規準 (Ledoux 1947) を用いて質量放出率が有り無し双方の場合を計算し比較した。同じ質量放出率でシュワルツシルトの規準と Ledoux の規準を用いた結果の比較から、対流の規準が表面組成と表面温度の傾向に与える影響は十分に小さいと判断し、Ledoux の規準を用いた。

質量放出がない場合の方が、core mass が大きくなり、HBB が強くなり、 ϵ_c も、表面温度も小さくなる傾向が見られた。図 4 は、 $Z=0$ 、初期質量 $2M_{\odot}$ の場合の表面組成の比較である。質量放出有りの場合

と異なり、無い場合は HBB が起こって ϵ_c が小さくなっていることが分かる。

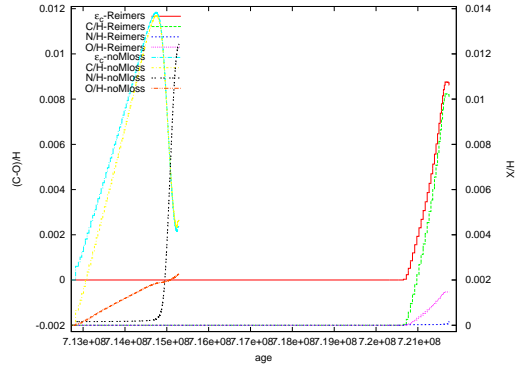


図 2: Comparison for evolution of surface elemental ratios by number between Reimers as mass loss ratio and no mass loss with $M_{init} = 2M_{\odot}$ and $Z = 0$. Explanation of line colors are in figure.

4.4 Dust Driven Wind の規準とそれを満たす時点の質量

導入で述べたように、炭素質ダストに内部からの放射があたることによって質量放出が引き起こされる。この現象を dust driven wind という。dust driven wind が起こる規準として以下の 2 つを定めた。CO 分子の結合力は非常に強いため、炭素質ダストが形成されるためには、炭素が酸素よりも有意に多い必要がある。そのため、表面の数比で $(1)\epsilon_c = (C-O)/H \geq 0.0001$ を要求した。さらにダスト形成には低温な環境が必要のため、 $(2)T_{eff} \leq 3500$ K を要請した。実際の dust driven wind の大きさは星の光度などにも依存するがここでは簡単のため、上記の 2 つを規準とした。

規準を満たすモデルについて横軸質量、縦軸に規準を満たす時点での年齢 (図 5) と質量 (図 6) を各初期質量についてプロットした。規準を満たす年齢はほとんど主系列の期間と変わらないが、主系列の期間は同初期質量に対して金属量が低いほど短い。AGB がダストの主要な供給源となり得るのは、星形成初期から 10 億年オーダーと考えられているので、規準を満たすものは全て供給源となりうる。規準を

満たす時点の質量は HBB に大きく依存する。図 6 の初期質量 $3M_{\odot}$ の $Z=10^{-3}$ と 10^{-4} との間のギャップがこれを明らかに示している。

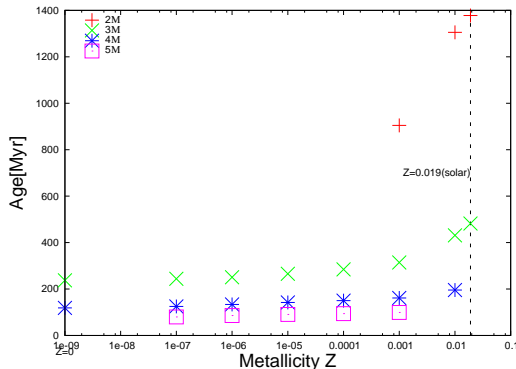


図 3: Age (in units of Myr) of stars meeting dust driven criterion for $M_{init} = 2M_{\odot}$ (red plus), $3M_{\odot}$ (green cross), $4M_{\odot}$ (blue asterisk), and $5M_{\odot}$ (magenta square dot) as a function of metallicity. Dot line indicates solar metallicity.

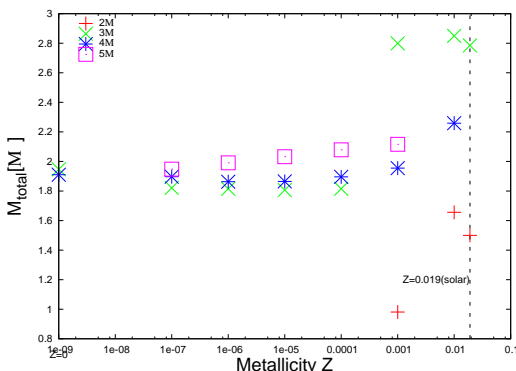


図 4: Total mass (in units of M_{\odot}) of stars meeting dust driven criterion as a function of metallicity. Symbols and line are same as Fig.3.

5 議論

TDU を起こし、かつ HBB が起こっている場合 HBB が止んだモデルは $2M_{\odot}$ の $Z \leq 10^{-4}$ を除き、全て dust driven wind の規準を満たしている。ただし、 $2M_{\odot}$ の $Z \leq 10^{-4}$ は全て $T_{eff} \leq 3500$ K になれば dust

driven wind の規準を満たすため、計算時の星表面の化学組成の混合物を考慮した opacity を適用するならば、規準を満たす可能性がある。

さらに、質量放出率が小さいと、 ϵ_c も、表面温度も小さくなる傾向があった。したがって、現計算より小さい質量放出率を用いて計算した場合、表面温度の条件は満たしても、HBB が止んで ϵ_c の条件を満たすという保証はない。

しかし、現在のモデルの条件下では、10 億年オーダーで dust driven wind が起こり、AGB 星からのダストの寄与が有意にあり得ると結論づける。

6 今後

星表面の化学組成を考慮した opacity およびダスト形成と整合性を保った質量放出率を扱って AGB 進化計算を行い、AGB 星が初期宇宙のダストにどの程度寄与するかを評価する。

Acknowledgement

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University. Discussions during the YITP workshop WITP-W-13-07 on "Summer School on Astronomy & Astrophysics 2013" were useful to complete this work .

Reference

- Ferrarotti A.D., Gail H.P., 2001, A&A, 371, 133
- Ledoux, P. 1947, ApJ, 105, 305
- Herwig F. 2005, ARA&A, 43, 435
- Herwig, F., Blecker, T., Langer, N., et al. 1999, A&A, 349, L5
- Iben I., Jr, Renzini A., 1983, ARA&A, 21, 271
- Marigo, P. 2002, A&A, 387, 507
- Marigo P., 2007, A&A, 467, 1139
- Paxton B., Bildsten L., et al. 2011, ApJS, 192, 3
- Reimers, D. 1975, Mem. Soc. R. Sci. Liege, 8, 369
- Valiante R, Schneider R et al., 2011, MNRAS, 416, 1916
- Ventura P., Marigo P., 2010, MNRAS, 408, 2476