

## Semiconvective Zone の形成のされ方

中村 健太郎 (新潟大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

大質量星 ( $M \gtrsim 10M_{sun}$ ) の主系列段階でエネルギー輸送が放射優勢である Envelope と対流優勢である Core の間に平均分子量に勾配のある領域 (Semiconvective Zone) が形成される。Semiconvective Zone では特殊な混合 (Semiconvection) が発生し、最終的にはある一定の値の平均分子量の領域になるように均される。Spruit(1992) では Overturn という断熱的な混合により平均分子量が一定の狭い領域が形成され、その領域が拡散により周囲の領域に浸透し Semiconvective Zone が均されるとして平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールが計算された。

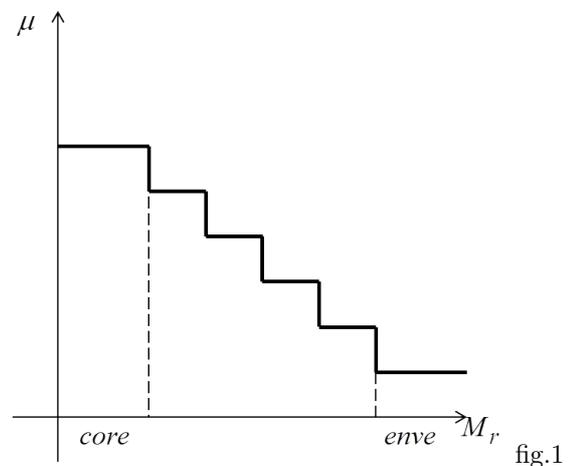
しかし、Spruit(1992) では 1 つの狭い平均分子量が一定の領域についてのみでしか議論がされていなかった。Semiconvective Zone の形成のタイムスケールよりも平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールの方が長い場合、平均分子量が階段状の構造が形成され、そこから最終的な平均分子量が一定の領域になっていく。逆の場合は平均分子量が一定の 1 つの狭い領域が広がって最終的な平均分子量が一定の領域になる。2 つの場合に対して最終的な平均分子量が一定の領域になるまでの時間が変わってくるので、過去の恒星進化の計算の論文を参考にして Semiconvective Zone の形成のタイムスケールを計算し、平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールと比較を行った。

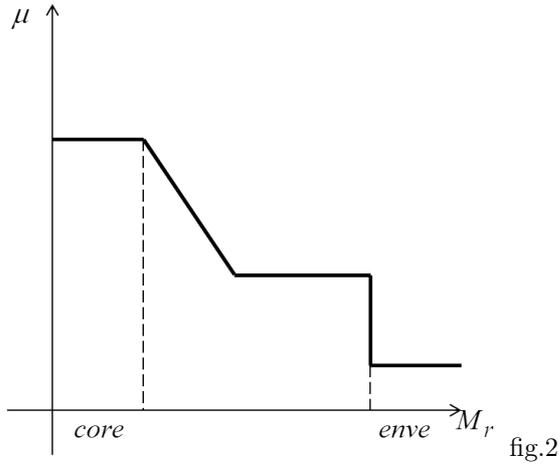
## 1 Introduction

大質量星 ( $M \gtrsim 10M_{sun}$ ) の主系列段階でエネルギー輸送が放射優勢である Envelope と対流優勢である Core の間に平均分子量に勾配のある領域 (Semiconvective Zone) が形成される。Semiconvective Zone では特殊な混合 (Semiconvection) が発生し、最終的にはある一定の値の平均分子量の領域になるように均される。その領域がどの程度の範囲まで広がるか、どの程度のタイムスケールで広がるかによって恒星の化学的構造に違いが生じ、大質量星の進化の最終段階である超新星爆発に影響を与える。

Spruit(1992) では Overturn という断熱的な混合により平均分子量が一定の狭い領域が形成され、その領域が拡散により周囲の領域に浸透し Semiconvective Zone が均されるとして平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールが計算された。しかし、Spruit(1992) では 1 つの狭い平均分子量が一定の領域についてのみでしか議論がされていなかった。Semiconvective Zone の形成のタイムスケールよりも平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールの方が長い場合、平均分子量が階段状の構造が形

成され、そこから最終的な平均分子量が一定の領域になっていく。(fig.1) 逆の場合は平均分子量が一定の 1 つの狭い領域が広がって最終的な平均分子量が一定の領域になる。(fig.2) 2 つの場合に対して最終的な平均分子量が一定の領域になるまでの時間が変わってくるので、過去の恒星進化の計算の論文を参考にして Semiconvective Zone の形成のタイムスケールを計算し、平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールと比較を行った。





## 2 Methods

自転のない静水圧平衡にある球対称の恒星を考える。下記の3つの領域に分ける。

$$Envelope : \nabla < \nabla_a$$

$$SemiconvectiveZone : \nabla_a < \nabla < \nabla_a + \frac{\varphi}{\delta} \nabla_\mu$$

$$Core : \nabla_a + \frac{\varphi}{\delta} \nabla_\mu < \nabla$$

$$\left( \varphi = \left( \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \mu} \right)_{P,T}, \delta = \left( \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_{P,\mu} \right)$$

ここで、 $\nabla (= d \ln T / d \ln P)$  は温度勾配、 $\nabla_a$  は断熱的温度勾配、 $\nabla_\mu (= d \ln \mu / d \ln P)$  は平均分子量勾配である。エネルギー生成率を Henyey et al.(1959) の

$$\varepsilon = 6.32 \times 10^{18} R_{pp} X^2 + 5.734 \times 10^{18} R_{CN} X X_{CN}$$

$$R_{pp} = \frac{4.19 \times 10^{-26} T_6^{5.5}}{1 + (T_6/15)^3} \rho$$

$$R_{CN} = \frac{6.52 \times 10^{-45} T_6^{21}}{1 + (T_6/24)^6} \rho$$

の式を用い、Core でのみエネルギーが生成されるとした。ここで、 $T_6$  は  $10^6 K$  単位の温度である。Semiconvective Zone での平均分子量の勾配については Roy(1952) の扱い

$$\frac{dX}{dM_r} = \frac{1}{M_r} \times Const$$

を用いた。Opacity への寄与は電子散乱によるもののみとした。中心温度  $T_c = 4.0 \times 10^7 K$ 、表面密度  $\rho_s = 4.0 \times 10^{-7} g/cm^3$ 、恒星質量  $M \simeq 16 M_{sun}$  について水素の質量比 0.7、ヘリウムの質量比 0.29、重元素の質量比 0.01 の均質な初期構造から中心の水素の質量比が 0.5 になるまで構造を解いてみた。

## 3 Results

M=16.470105Msun								
Xc	Te(K)	L(erg/s)	Pc(g/cm/cm)	Mc/M	Rc(cm)	Time(year)	Mc(g)	
0.70	1.03E+05	1.25E+38	5.14E+16	0.4695	9.25E+10	0.00E+00	1.55E+34	
0.60	9.49E+04	9.94E+37	5.34E+16	0.3509	7.91E+10	2.74E+05	1.16E+34	
0.50	8.67E+04	7.68E+37	5.67E+16	0.2641	6.76E+10	5.35E+05	8.70E+33	
M=20Msun								
0.68	3.51E+04	1.92E+38		0.4950		0.00E+00		
0.51	3.44E+04	2.25E+38		0.4160		2.47E+06		
0.34	3.30E+04	2.89E+38		0.3740		2.82E+06		
0.17	3.12E+04	3.36E+38		0.2900		3.69E+06		
0.05	2.92E+04	3.79E+38		0.2640		4.19E+06		

Tab.1

Tab.1 は計算結果である。 $M = 20 M_{sun}$  は Henyey et al.(1959) の計算結果の引用である。私のモデルでは水素の質量比 0.7、ヘリウムの質量比 0.29、重元素の質量比 0.01 の均質な初期構造をもつ時刻を  $Time = 0.0$  とし

$$Time = 0.007c^2 \int \frac{dM_b}{L}$$

を用いて経過時間を求めた。ここで、 $M_b$  は燃焼した水素の質量である。Henyey et al.(1959) のモデルでも水素の質量比 0.68、ヘリウムの質量比 0.31、重元素の質量比 0.01 の均質な初期構造をもつ時刻を  $Time = 0.0$  として同様な計算を行った。

## 4 Discussion

Tab.1 から  $M \simeq 16 M_{sun}$  の恒星に対して Semiconvective Zone の広がる速度は

$$\begin{aligned} v &\simeq \frac{9.25 \times 10^{10} - 6.76 \times 10^{10}}{1.70 \times 10^{14}} \\ &\simeq 1.47 \times 10^{-4} (cm/s) \end{aligned}$$

となる。Spruit(1992) から平均分子量が一定の層の厚さの増加率

$$\frac{dd}{dt} \simeq \frac{(\kappa_s \kappa_t)^{1/2}}{d} \left( \frac{4}{\beta} - 3 \right) \frac{\nabla_r - \nabla_a}{\nabla_\mu}$$

が得られている。ここで、 $\kappa_t$  は熱拡散率、 $\kappa_s$  は溶質拡散率、 $\nabla_r$  は放射的な場合の温度勾配、 $d$  は平均分子量一定の層の厚さ、 $\beta(= P_g/P)$  は総圧に対するガス圧の比である。Overturn による層の形成のタイムスケールは実験で他のタイムスケールより非常に小さいことがわかっているので上記の 2 つの値を比較することにより Semiconvective Zone の形成のされ方がわかる。私のモデルの平均分子量に勾配がある領域で層の厚さの増加率を求めてやると

$$\frac{dd}{dt} \sim \frac{10^4}{d}$$

が得られる。この値により初期の段階では 1 つの層だけが徐々に厚さを増加させていくが、 $X_c = 0.5$  の時の Semiconvective Zone の広さは  $\sim 10^{10}$  であるのである程度まで時間が経つと階段状の平均分子量勾配の構造が形成されると考えられる。

## 5 Future Work

今回は私の恒星進化の計算結果が正しいものとして議論を進めたが、Tab.1 を見てもらうとわかるように Henyey(1959) の計算結果と定性的に違うふるまいをしてしまっている。載せはしなかったが違う恒星質量でも計算はしてみたのだが、それも違うふるまいをしていた。Henyey(1959) の計算で使われた仮定と私の計算で用いた仮定で大きく異なるのが Semiconvective Zone での平均分子量勾配の扱いである。計算の簡易化のため私の用いた扱いは非現実的であるので、もっと現実的な扱いを導入して再度計算を行ってみる必要があると考える。

## Reference

- H.C.Spriut, A&A, 253, 131 (1992)
- R.J.Tayler, ApJ, 120, 332 (1954)
- R.Stothers, ApJ, 138, 1074 (1963)
- L.G.Henyey et al., ApJ, 129, 2 (1959)
- A.E.Roy, MNRAS, 112, 484 (1952)