

大質量の主系列星における内部構造および進化 Internal structure and evolution of high mass main sequence stars

○熊澤希珠¹, 藤井紫麻見²

*Kumazawa Nozomi¹, Fujii Shiomi²

Abstract: The stellar evolution is determined by mass of the star at birth. Stars maintain their shape by balancing the internal pressure of the self-gravity and the nuclear fusion reaction at its center. The purpose of the present study is to numerically simulate the internal structure corresponding to the Population. Calculations including differential equations introducing radiation and heat transport are performed. Obtained luminosity, surface temperature, and radius are compared with observed data.

1. はじめに

恒星の一生は誕生時の質量で決まり,自己重力と中心の核融合反応により発生する内部圧力が釣り合うことで,その形を保っている。

また,恒星内部の核融合反応および輻射・熱輸送を導入した微分方程式も含めて恒星の内部構造を求めることができる.本研究では,2~15 M_{\odot} の種族 I の恒星について内部構造を求める.得られた光度,表面温度,半径を実際の観測データと比較し,計算の妥当性を調べる。

恒星の分類法には,金属を多く含む種族 I ,金属が少ない種族 II ,水素とヘリウムでほぼ構成され,宇宙初期に誕生し金属を含まないと考えられている種族 III とする方法がある.太陽を含む種族 I ,球状星団などにある種族 II については,これまでよく研究がされているが,種族 III の恒星はまだ観測されておらず,不透明な点も多い。

2. 恒星の基本方程式

(a)化学組成

質量存在比を水素(X):ヘリウム(Y):それ以外の重元素(Z)と表す.完全電離の場合に,陽子質量を単位とした原子核と電子の平均質量 μ は

$$\frac{1}{\mu} = 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z \quad (1)$$

となる.今回の計算では種族 I の zero-age 主系列星として太陽組成 0.73 : 0.25 : 0.02 を用いた。

(b)基本方程式

恒星は,自らの重力で形を保ち,内部圧力を高くすることでその重力を支えている.このつり合いを静水圧平衡といい,式は

$$\frac{dP}{dr} = -G\rho \frac{M_r}{r^2} \quad (2)$$

である.ここで P は圧力, G は万有引力定数, ρ は密度, r は半径である。

M_r は半径 r の球内の質量で

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi\rho r^2 \quad (3)$$

である。

星の中心で発生したエネルギーが外向きに運ばれるとき,半径 r の球面を外向きに通過する単位時間あたりのエネルギーを L_r とすると

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi\epsilon r^2 \quad (4)$$

が成り立つ. ϵ は核融合反応などにより単位質量・単位時間あたりに発生するエネルギーである。

主系列星では,水素の核融合反応が起こっている.低温では陽子-陽子連鎖反が起こり,高温では CNO サイクルによるエネルギー生成が主になる.大質量星では温度が十分高く CNO サイクルだけ考慮すればよいのでエネルギー発生率は

$$\epsilon = 8 \times 10^{-114} \times \frac{1}{3} XZ\rho T^{16} \text{ [J/kg/s]} \quad (5)$$

である。

熱の輸送は,対流・輻射により行われる.恒星には,対流層と放射層が存在しており,温度変化は

$$\begin{cases} \frac{dT}{dr} = \frac{3}{4kc} \frac{\kappa\rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2} & \text{放射層} \\ \frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr} & \text{対流層} \end{cases} \quad (6)$$

となる.このとき, T は温度, κ は不透明度, k はボルツマン定数, $\gamma = 5/3$ は比熱比, c は光速である。

不透明度は,光子の吸収・散乱によって決まり,その主な過程は束縛-自由遷移,自由-自由遷移,電子散乱がある.大質量星の温度範囲では束縛-自由遷移が占めるため

$$\kappa = 2.17 \times 10^{25} \times Z(1+X)\rho T^{-3.5} \text{ [m}^2/\text{kg]} \quad (7)$$

である。

(2) ~ (6) 式の変数 M_r, L_r, r, P, T を無次元の

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

q, f, x, p, t に置き換えると

$$\begin{cases} M_r = qM, L_r = fL, r = xR, \\ P = p \frac{GM^2}{4\pi R^4}, T = t\mu \frac{m_p GM}{k R} \end{cases} \quad (8)$$

このとき、 M は質量、 L は光度、 R は半径、 m_p は陽子の質量である。(2)~(6)式は以下のように書き換えられる。

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{p q}{t x^2} \quad (9)$$

$$\frac{dq}{dx} = \frac{p}{t} x^2 \quad (10)$$

$$\frac{df}{dx} = D \times p^2 t^{\nu-2} x^2 \quad (11)$$

$$\frac{dt}{dx} = -C \times \frac{p^2 f}{t^{8.5} x^2} (\text{放射}) \text{ or } \frac{dt}{dx} = \frac{2 t dp}{5 p dx} (\text{対流}) \quad (12)$$

ここでC及びDは以下の定数である。

$$C = \left[\frac{3}{4ac} \left(\frac{k}{m_p G} \right)^{7.5} \left(\frac{1}{4\pi} \right)^3 \right] \left[\frac{\kappa}{\mu^{7.5}} \right] \left[\frac{LR^{0.5}}{M^{5.5}} \right]$$

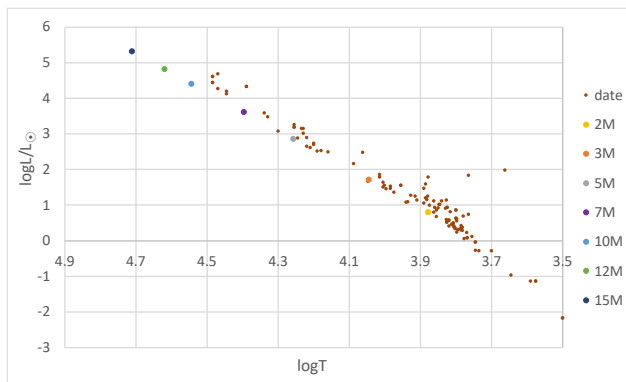
$$D = \left[\left(\frac{m_p G}{k} \right)^{16} \frac{1}{4\pi} \right] [\varepsilon \mu^{7.5}] \left[\frac{M^{18}}{LR^{19}} \right]$$

尾崎(1971)^[3]によると質量が $1.5M_\odot$ 以上の恒星では内側の層が対流層、外側の層が放射層である。

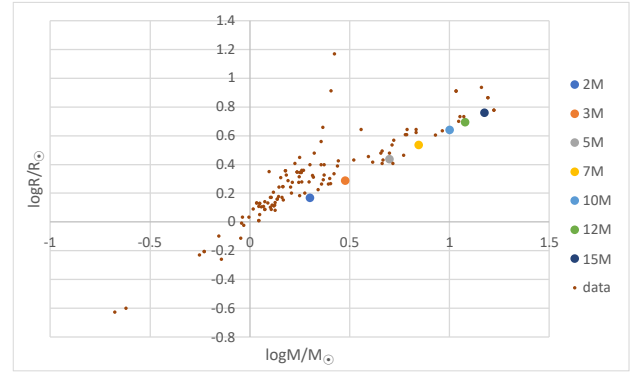
恒星の中心から表面に向けて中心温度・中心圧力をパラメータとして、対流の式を用いて積分した。表面から中心に向けては放射の式を用いて積分を行い、境界で連続的に接続するようパラメータを定めた。このとき、Cの収束する値を中心と表面の境界条件とした。Dは(11)式の積分から定めM,R,Lを求めた。

3. 計算結果

質量2,3,5,7,10,12,15 M_\odot についてそれぞれ計算し、[2]のデータと比較を行った。



Figur1.Relationship between surface temperature T and luminosity L . The abscissa is the surface temperature $\log T$ and the ordinate is the luminous intensity $\log L/L_\odot$. Observed data are shown by small dots[2].



Figur2. Relationship between mass M and radius R . The abscissa is the mass M/M_\odot and the ordinate is the radius R/R_\odot . Observed data are shown by small dots[2].

Figur1はHR図であり、縦軸に光度、横軸に表面温度で、左側ほど温度が高い。高温で明るい左上ほど大質量星が分布しており、低温で暗い右下ほど小質量星が分布している。 L は T の4乗に比例している。

Figur2は、質量が大きく、半径も大きい右上ほど大質量星が分布し、質量が小さく、半径も小さい左下ほど小質量星が分布している。 R は M の0.7乗に比例している。

4. 考察

Figur1より、光度がだいたい表面温度の4乗に比例していることがわかる。ステファン・ボルツマンの法則 $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ と比べて、半径の質量依存が小さいためであることがわかる。

Figur2より、半径が質量の約0.7乗に比例しており、質量が増えると恒星自体の大きさはやや大きくなることがわかる。

Figur1, Figur2より、観測された恒星の分布と計算結果の傾きがほぼ一致していることがわかる。計算で求めたのは誕生直後の zero-age 主系列星であるが、その後、星は進化することで、半径や光度が増え、図上で上方向に上がる。その結果、実際の星の分布の下限が zero-age 主系列星になり、今回の計算結果によく一致している。

今後、核融合反応が進むことで化学組成の変化し、その影響を考慮した計算を行い、それら星の進化を求めて図上の分布を再現する。さらに、種族IIまたは種族IIIの化学組成について質量ごとに同様の計算を行って、恒星の性質や進化段階を明らかにできる。

5. 参考文献

- [1]Martin Schwarzschild, “Structure and Evolution of the Stars”, Princeton Legacy Library (2015)
- [2]Daniel M Popper, “Stellar Masses”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol.18:115-164, 1980
- [3]尾崎 洋二「恒星における流体力学の問題」,ながれ,2巻4号17-22(1971)