# 回転大質量星コードの開発

#### 吉田 敬,梅田秀之

#### (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

超新星爆発と数値シミュレーション 2011年12月26日,京都大学基礎物理学研究所

### **Introduction**





(Meynet & Maeder 2002)





#### 回転大質量星モデルの開発

### 大質量星の進化コード

Saio codeを改良 (Saio, Nomoto, & Kato 1988; Umeda & Nomoto 2008)

●核反応ネットワークとエネルギー生成

**→ 282 species of nuclei from** *n*, *p*, to Br NSEを使わずcore collapse直前まで元素合成計算

● OB星, 赤色巨星, Wolf-Rayet星の質量放出率

■ Schwarzschild対流条件

●初期質量, metallicityの範囲  $\longrightarrow M_{MS} \ge 9 M_{\odot}, Z \ge 0$ 

28日大北さんの講演…*M*<sub>MS</sub> = 110 *M*<sub>☉</sub> (*Z*=0.004)の星

●現在はSi燃焼後の進化を調整中

<u>回転星のモデル</u>

質量座標として等圧面を用いる*M<sub>r</sub> → M<sub>P</sub>* (e.g., Kippenhahn & Thomas 1970; Endal & Sofia 1976; Meynet & Maeder 1997; Heger, Langer, & Woosley 2000)

\*半径" $r_p$ は等圧面内の体積を用いて定義  $r_P = \left(\frac{3}{4\pi} V_P\right)^{1/3}$ 



$$\frac{\partial P}{\partial M_P} = -\frac{GM_P}{4\pi r_P^4} f_P$$

$$\frac{\partial r_P}{\partial M_P} = \frac{1}{4\pi r_P^2 \bar{\rho}}$$

$$\frac{\partial \ln \bar{T}}{\partial \ln P} = \min(\nabla_{ad}, \nabla_{rad} \frac{f_T}{f_P})$$

$$\frac{\partial L_P}{\partial M_P} = \varepsilon_{nucl} - \varepsilon_v + \varepsilon_{grav}$$

$$\dot{M}(\omega) = \dot{M}(\omega=0) \left(\frac{1}{1 - v/v_{crit}}\right)^{0.43}$$

$$\dot{J} = \dot{J}_{env} \dot{M}$$

$$f_T, f_P: \text{ Correction factors}$$

●角運動量輸送(拡散) (e.g., Heger, Langer, & Woosley 2000)

$$\overline{\rho}\frac{d}{dt}(r_P^2\omega)_{Mr} = \frac{1}{r_P^2}\frac{\partial}{\partial r_P}\left\{\overline{\rho} \ v \ r_P^4\frac{\partial\omega}{\partial r_P}\right\}$$

Rotational mixing

$$\frac{dX_n}{dt} = \frac{\partial}{\partial M_P} \left\{ (4\pi r_P^2 \bar{\rho})^2 D \frac{\partial X_n}{\partial M_P} \right\} + \left( \frac{\partial X_n}{\partial t} \right)_{\text{nucl}}$$

*i*: specific angular momentum, *v*: turbulent viscosity

• [比較] 角運動量輸送(移流) (e.g. Hirschi, Meynet, & Maeder 2004)  $\bar{\rho} \frac{d}{dt} (r_{P}^{2} \omega)_{Mr} = \frac{1}{5r_{P}^{2}} \frac{\partial}{\partial r_{P}} \{ \bar{\rho} r_{P}^{4} U(r_{P}) \} + \frac{1}{r_{P}^{2}} \frac{\partial}{\partial r_{P}} \{ \bar{\rho} v_{\text{shear}} r_{P}^{4} \frac{\partial \omega}{\partial r_{P}} \}$  $u(r,\theta) = U(r)P_{2}(\cos\theta)$ 子午面還流の動径速度

### **Factors in Diffusion Coefficient**

角運動量輸送(拡散的)
 *v* = *D*<sub>conv</sub> + *D*<sub>DSI</sub> + *D*<sub>SHI</sub> + *D*<sub>SSI</sub> + *D*<sub>ES</sub>

#### Rotational mixing

 $D = D_{\text{conv}} + f_{\text{c}} \left( D_{\text{DSI}} + D_{\text{SHI}} + D_{\text{SSI}} + D_{\text{ES}} \right)$ 

## • 子午面還流 (Eddington-Sweet circulation) $D_{\text{ES}} \equiv \min\{d_{\text{inst}}, H_{\nu,\text{ES}}\} v_{\text{ES}}$ $v_{\text{ES}} \equiv \max\{|v_e| - |v_\mu|, 0\}$ $v_e \equiv \frac{\nabla_{\text{ad}}}{\delta(\nabla_{\text{ad}} - \nabla)} \frac{\omega^2 r p^3 l}{GM_P} \{\frac{2(\varepsilon_{\text{nuc}} + \varepsilon_{\nu})r p^2}{l} - \frac{2r p^2}{M_P} - \frac{3}{4\pi\bar{\rho}r p^2}\}$ $v_\mu \equiv f_\mu \frac{H_P}{\tau^*_{\text{KH}}} \frac{\phi \nabla_\mu}{\delta(\nabla_{\text{ad}} - \nabla)}$ $\tau^*_{\text{KH}} \equiv \frac{GM_P^2}{r_P(l - M_P \varepsilon_{\nu})}$

回転による混合の効率

**f**<sub>c</sub> = 1/30 adopted from Heger, Langer, & Woosley (2000) 組成の不連続による回転混合の抑制 *f*<sub>µ</sub> = 0.003: H燃焼後に表面のN存在度が3倍程度になるように設定

<u> 組成分布と対流の効果(H燃焼)</u>

 $M_{\rm MS} = 20 \ M_{\odot} \ , Z = 0.02 \ \nu_{\rm init} = 200 \ \rm km \ s^{-1}$ 

H燃焼時



子午面還流による物質混合と組成分布の変化
 M<sub>r</sub>~5-9 M<sub>o</sub>におけるHeの増加

表面におけるNの増加

### <u>H, He燃焼後の組成分布</u>



Solid lines:  $V_{r0} = 200$  km s<sup>-1</sup>; Dashed lines:  $V_{r0} = 0$  km s<sup>-1</sup>

- 大きなCO, Heコアと小さな総質量
  M<sub>f</sub> = 13.8 (16.9) M₀
- $M_{\text{He core}} = 7.72 \ (6.26) \ M_{\odot}$
- $M_{\rm CO\ core} = 5.72$  (4.04)  $M_{\odot}$

 $M_{\rm MS} = 20 \ M_{\odot}, Z = 0.02, V_{r0} = 0, 200 \ {\rm km \ s^{-1}}$ 



炭素燃焼以降の組成分布



角運動量分布

 $M_{\rm MS} = 20 \ M_{\odot} \ , Z = 0.02, \ V_{r0} = 200 \ \rm km \ s^{-1}$ 



 Rotational mixing
 対流層では剛体回転的 角運動量は外側へ移動
 He燃焼以降には角運動量分布の再配置

#### まとめ

#### 回転大質量星モデルのテスト計算

- $M_{\rm MS} = 20 \ M_{\odot}, Z_0 = 0.02, V_{r0} = 200 \ \rm km \ s^{-1}$ 
  - H燃焼から**Si**燃焼(log*T*<sub>c</sub>~9.7)まで

他groupの結果を定性的に再現

- ●角運動量の約90%が進化の過程で失われる
- ●主系列星での表面N存在度の増加

● He, CO core質量の増加

### 問題点

- ●より高速回転の時に計算が進みにくくなる
- Time step control & mass-coordinate resolution
   Shell burningsにおける混合範囲に影響