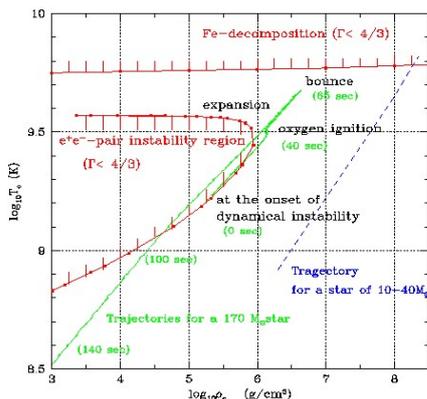


e⁺-e⁻ Pair Instability Supernovae (PISNe) : 140-270 M_⊙ stars (Mass-loss の無い場合)

大量の鉄の放出 数~数十M_⊙
 大きな爆発エネルギー E₅₁ = 数十
 存在すれば初期の宇宙に多大な影響



173

Grids of stellar models with rotation II. WR populations and supernovae/GRB progenitors at Z = 0.014

C. Georgy et al. 2012

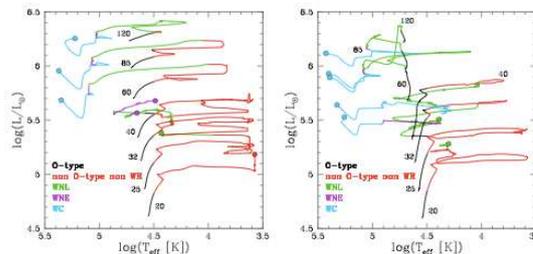


Fig. 1. HRD of the massive models from 20 to 120 M_⊙ with the different types/phases marked in colours (O-type: blue; neither O-type nor WR: red; WNL: green; WNE: purple; WC: cyan). *Left*: Non-rotating models. *Right*: Rotating models. We plotted the effective temperature at the surface of the hydrostatic core. The endpoints of the tracks are indicated by a circle.

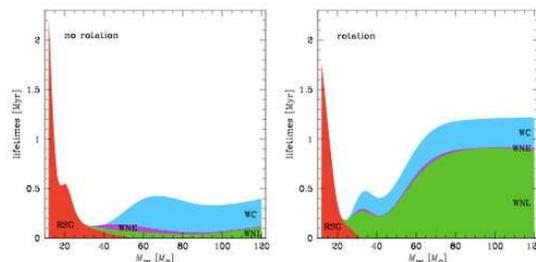


Fig. 2. Lifetimes in the RSG phase (defined as stars with log(T_{eff}/K) < 3.66, see Eldridge et al. 2008) and in the different phases of WR stars. *Left*: Non-rotating models. *Right*: Rotating models.

回転星の方程式

- まず星のエネルギー方程式を多次元に書き換える:

1次元の放射によるエネルギー輸送

$$j(x) = -\frac{4ac}{3} \frac{T^3}{\rho\kappa} \frac{dT}{dx}$$

多次元: Energy Fluxを \vec{F} と書くと

$$\vec{F} = -\frac{4ac}{3} \frac{T^3}{\rho\kappa} \vec{\nabla} T \quad (2.1)$$

エネルギー保存の式:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \rho \left(\varepsilon - \frac{dq}{dt} \right) \quad (2.2)$$

175

回転星の方程式

一様な物質では (μ 一定)
 等ポテンシャル面で温度が一定
 $T = T(\Psi)$ なので(2.4)、(2.1) \Rightarrow

$$\vec{F} = \frac{4ac}{3} \frac{T^3}{\rho\kappa} \frac{dT}{d\Psi} \vec{g}_{eff} \equiv -K(\Psi) \vec{g}_{eff} \quad (2.5)$$

$\vec{g}_{eff} = -\vec{\nabla}\Psi$: 有効重力加速度.

このとき $\Psi = const$ 面の光度 L_Ψ を用い、

$$L_\Psi = \int_{\Psi=const} \vec{F} \cdot d\vec{\Omega} = S_\Psi \langle F \rangle,$$

$F = |\vec{F}|$, S_Ψ は $\Psi = const$ 面の面積

$$\langle f \rangle \equiv \frac{1}{S_\Psi} \int_{\Psi=const} \vec{f} \cdot d\vec{\Omega},$$

176

エネルギー輸送に関する Von Zeipel's 定理 (1924)

等ポテンシャル面では、 K, ρ, ε が一定, (2.6) →

$$-\frac{dK}{d\Psi}(\bar{\nabla}\Psi)^2 + \frac{K}{s} \frac{d(s^2\omega^2)}{ds} = (\text{一定}) \text{ だが、}$$

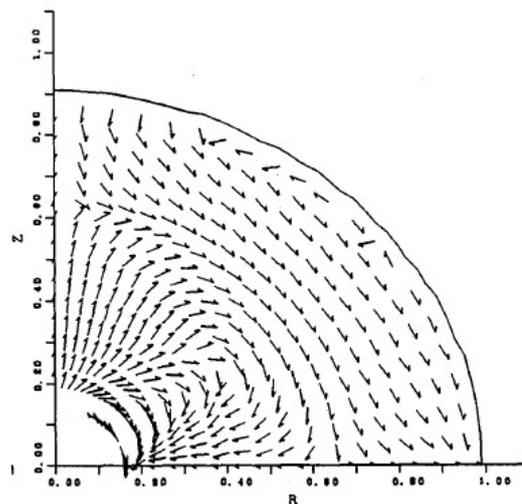
一般にこの式は成り立たない
(これが定理：回転星は放射によるエネルギー輸送だけでは *stationary* でいられない)

例、剛体回転($\omega = \text{const}$)の場合
 $s^{-1}d(s^2\omega^2)/ds = \text{const}$ であるが、 $\bar{\nabla}\Psi$ は一定でない。

177

子午面還流(数値計算例)

Eriguchi & Muller 1991, ApJ



回転星の方程式の問題

- 1次元で方程式が書けたように見えるが、実際は3次元の子午面還流が存在している。
 - この効果を物質の混合の効果に押し付けて1次元近似を貫く
 - μ バリアー
- 実際の星の回転は剛体回転ではないし、Conservative でもない
 - Shellular rotation の場合の定式化

大質量星：回転とB/R比

Maeder & Meynet, (2001) A&A 373, 555

- 青色超巨星と赤色超巨星の数の比(B/R比)は低金属になると急減する(観測)
- 対流のモデルを変えるとB/R比は変わるが、金属量の依存性は説明できない
- 回転星の核の進化はより重い星と似るため、He燃焼時にBlueでいる時間が減少する
- 金属が多いとMass Loss が多く角運動量を多く失う(低速回転)
- 回転進化の証拠?

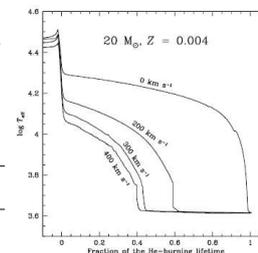
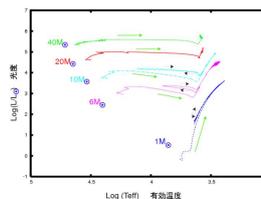


Fig. 9. Evolution of the T_{eff} as a function of the fraction of the lifetime spent in the He-burning phase for $20 M_{\odot}$ stars with different initial velocities.

M_{ini}	B/R	
	$v_{\text{ini}} = 0$	$v_{\text{ini}} = 300$
25	63	0.30
20	47	0.43
15	5.0	0.24
12	20.6	85
9	2.7	0.10

もっともらしい説明ではあるが、どの程度正しいのか、他の解はないのか、まだ不明

Z=0.004 観測値 0.5~0.8 (SMC)

180