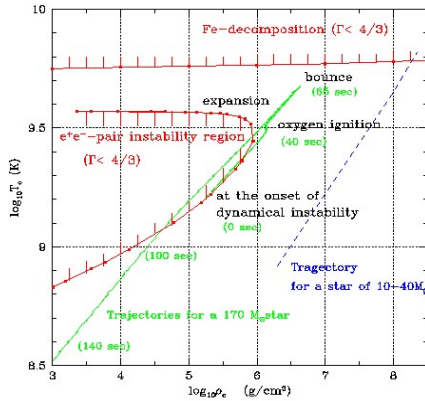


## e<sup>+</sup>-e<sup>-</sup> Pair Instability Supernovae (PISNe) : 140-270 M<sub>⊙</sub> stars (Mass-loss の無い場合)

大量の鉄の放出 数~数十M<sub>⊙</sub>  
 大きな爆発エネルギー E<sub>51</sub> = 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

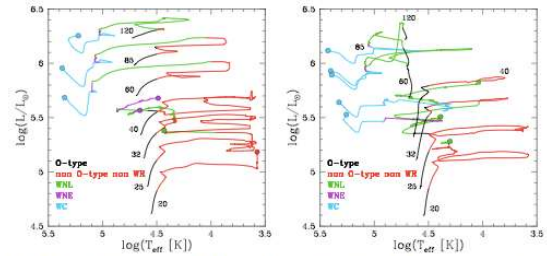


Fig. 1. HRD of the massive models from 20 to 120 M<sub>⊙</sub> with the different types/phases marked in colours (O-type: blue; neither O-type nor WR: red; WN1: green; WNE: purple; WC: cyan). *Left*: Non-rotating models. *Right*: Rotating models. We plotted the effective temperature at the surface of the hydrostatic core. The endpoints of the tracks are indicated by a circle.

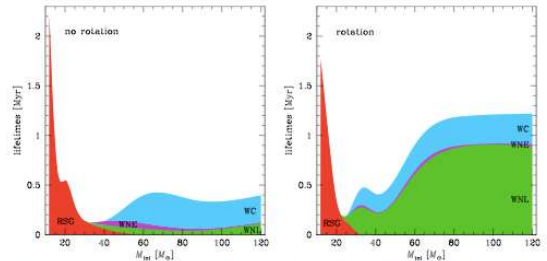


Fig. 2. Lifetimes in the RSG phase (defined as stars with log(T<sub>eff</sub>/K) < 3.66, see Eldridge et al. 2008) and in the different phases of WR stars. *Left*: Non-rotating models. *Right*: Rotating models.

## 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 ( $\mu$ 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  $L_\Psi$  を用い、

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

$F = |\vec{F}|$ ,  $S_\Psi$ 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、 $K, \rho, \varepsilon$  が一定, (2.6) →

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

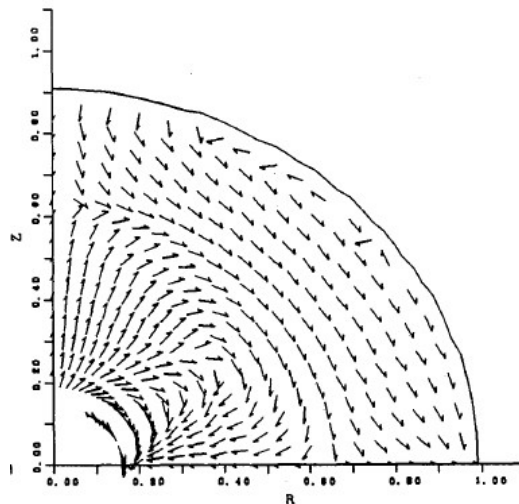
一般にこの式は成り立たない  
(これが定理：回転星は放射によるエネルギー輸送だけでは *stationary* でいられない)

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
  - $\mu$  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?

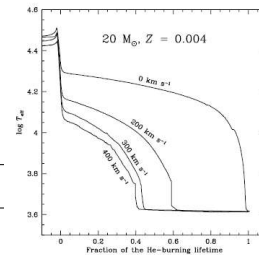
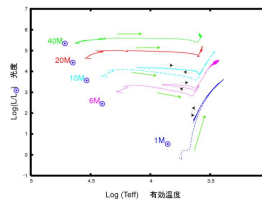


Fig. 9. Evolution of the  $T_{\text{eff}}$  as a function of the fraction of the lifetime spent in the He-burning phase for  $20 M_{\odot}$  stars with different initial velocities.

$M_{\text{ini}}$	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