

### Stellar core and fate of the star

Evolution after He-burning is mostly determined by the mass of C-O core. (KH450)  
 If a C-O core isn't too heavy, C-burning doesn't occur and the core cools monotonically (B).  
 In general, more massive stars have larger entropy (upper left in the figure below).  
 Massive C-O cores enter into unstable regions, depending on their mass.

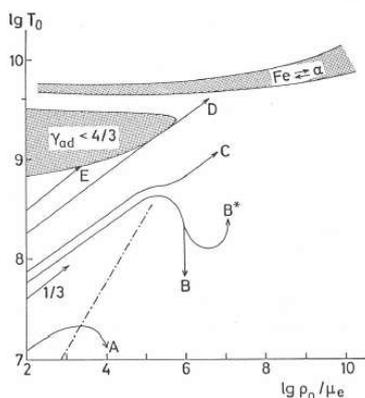


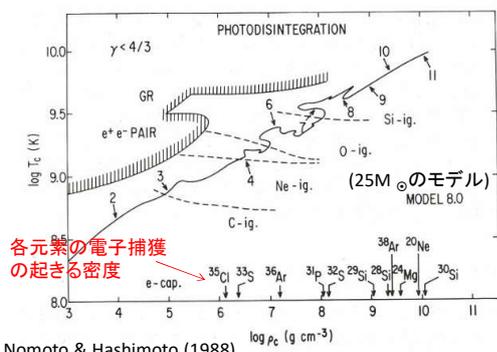
表 1.1 星の内部で進行する熱核反応.

燃焼段階	おもな反応	おもな生成物	温度 (10 <sup>8</sup> K)
H	pp チェイン CNO サイクル	<sup>4</sup> He <sup>14</sup> N	0.15-0.2
He	<sup>3</sup> He → <sup>12</sup> C <sup>12</sup> C + <sup>4</sup> He → <sup>16</sup> O + γ	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O	1.5
C	<sup>12</sup> C + <sup>12</sup> C → { <sup>23</sup> Na + p <sup>20</sup> Ne + α	Ne, Na Mg, Al	7
Ne	<sup>20</sup> Ne + γ → <sup>16</sup> O + α <sup>20</sup> Ne + α → <sup>24</sup> Mg + γ	O Mg	15
O	<sup>16</sup> O + <sup>16</sup> O → { <sup>28</sup> Si + α <sup>31</sup> P + p	Si, P, S, Cl, Ar, Ca	30
Si	<sup>28</sup> Si + γ → <sup>24</sup> Mg + α <sup>24</sup> Mg + γ → { <sup>23</sup> Na + p <sup>20</sup> Ne + α 多くの反応 → 統計平衡	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu	40

元素はいかにつくられたか(2007、野本憲一編)

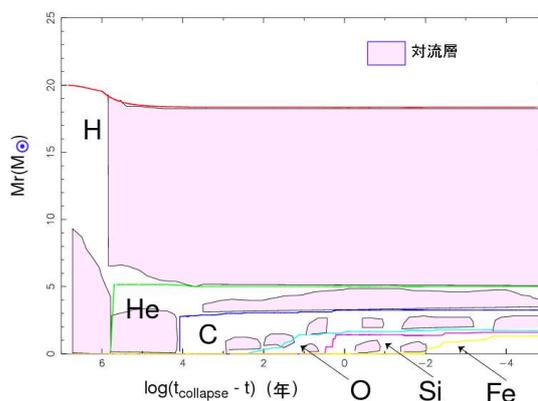
### 電子捕獲反応

- 物質は密度が非常に高いと電子を捕獲し中性子過剰の原子核になったほうが安定となる。大質量星の進化の末期にはこのような電子捕獲反応が進む。 e.g., <sup>24</sup>Mg + e<sup>-</sup> → <sup>24</sup>Na + ν<sub>e</sub>
- この過程でニュートリノが放出され、また電子の縮退圧が減少し収縮が進む



Nomoto & Hashimoto (1988)

### 星の進化 (内部組成と対流層の進化) 20M<sub>⊙</sub>, Z=0.02 model



-10

164

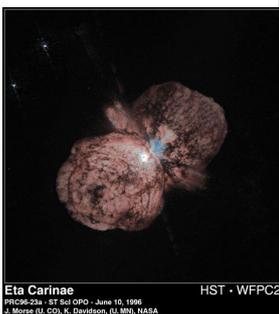
## 大質量星のMass Loss

- 一般に恒星は表面から質量を放出している: 表面のガスが星の放射圧によって加速、脱出速度を超えると星から放出される(太陽風)

- 質量放出率(半観測値)

$$\dot{M} \approx A(L, T_{eff}) Z^{0.5} \frac{L}{T_{eff}}$$

- 金属量(Z)が多く、明るい(質量が大きい)、半径の大きい星(巨星)ほどMass Loss が大きい



Eta Carinae HST - WFPC2  
PRC96-23a - ST ScI OPO - June 10, 1996  
J. Morse (U. CO), K. Davidson, (U. MN), NASA

エータ・カリーナ M ~100M<sub>☉</sub>

## ウォルフレイエ星

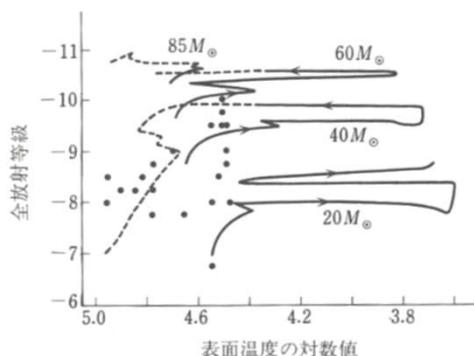


図 5 非常に質量の大きな星の進化経路とウォルフレイエ星

水素が少ない

WN型:ヘリウム、窒素が多い(CNOで出来たもの)

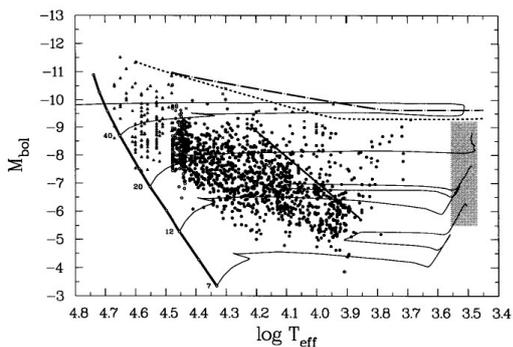
WC型:ヘリウム、炭素が多い(He燃焼で出来た)

WO型: (C+O)/He > 1 (以下のものはWC型)

上から順にMass Lossが進んだ星

## HD Limit

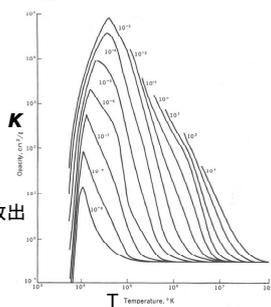
Humphreys-Davidson limit



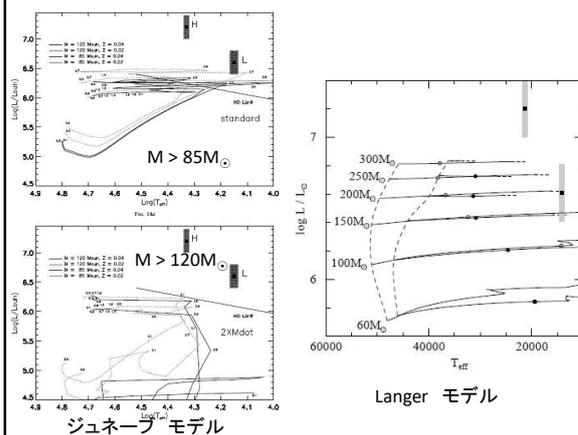
M > 40M<sub>☉</sub>の星はRedSGにならない

光度がEddington Luminosity L<sub>Edd</sub> = 4πcGM/kを超えないため。

HD Limitに近いような星は不安定。断続的に大きな質量放出 Luminous Blue Variables (LBV)と呼ばれる(ηカリーナ)



## ピストル・スターの進化モデル



Langer モデル: Mass Loss Rate 小さいと仮定

初期

M = 60, 100, 150, 200, 250, 300 M<sub>☉</sub>

水素が燃え尽きた時点で、それぞれ

M = 54, 84, 110, 158, 197, 244 M<sub>☉</sub>

回転が遅いためにMass Lossが小さいと仮定 (正しいか?? (大質量星の合体???)