

Section 9.

進化した星

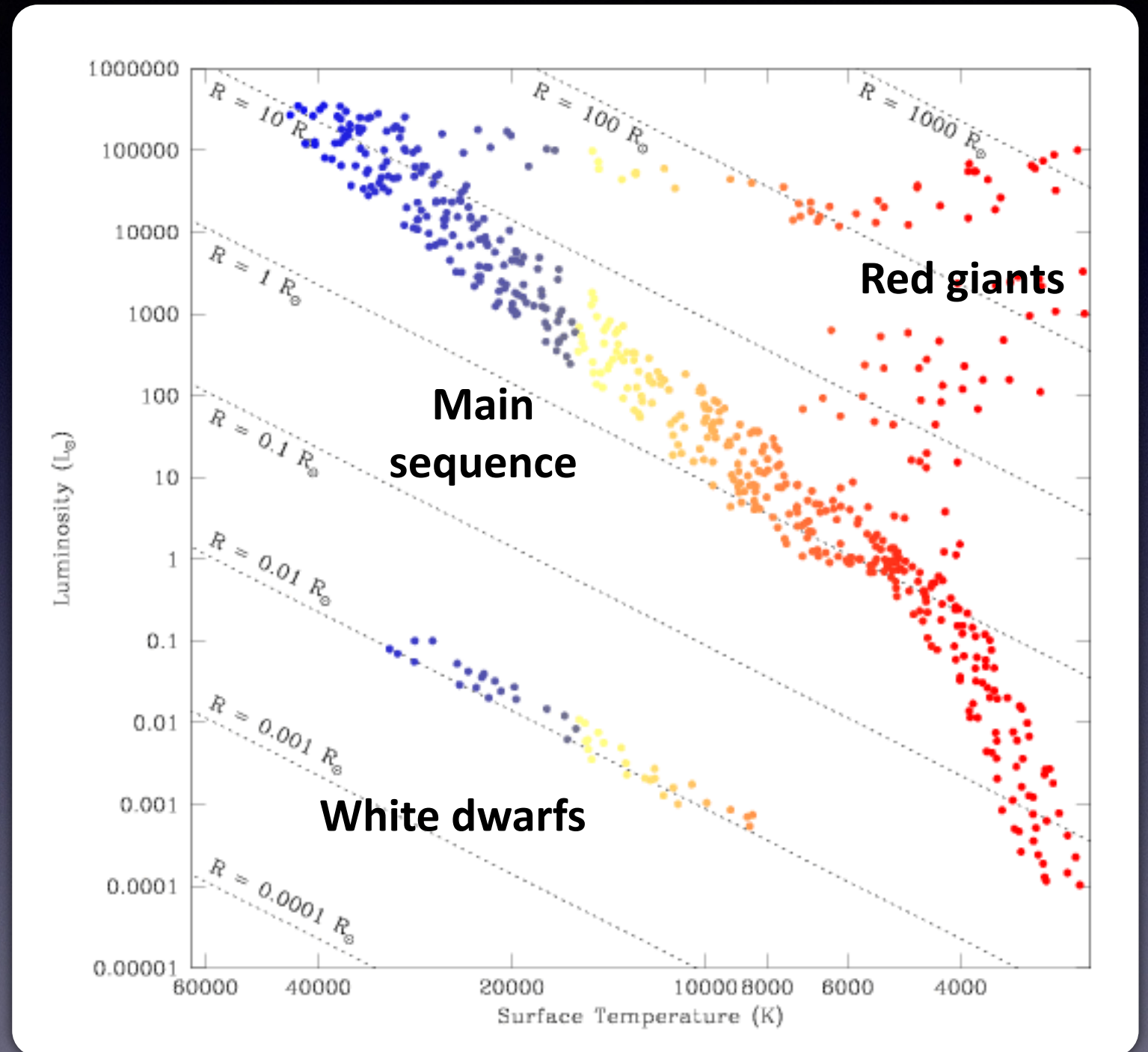
9.1 赤色巨星

9.2 林の禁止領域

ツツコミを入れる練習

Hertzsprung-Russel diagram (HR図)

Luminosity (L_{sun})



Temperature (K)



疑問に思うことを書き出してみる

- 赤い星はほとんど太陽の半径ぐらいなのに、
大きい星はなんで大きいのだろう？ (赤色巨星)
- 主系列星の赤い側が折れているのはなぜ？
- MS - RGは繋がっているのに、MS-WDは離れているのはなぜ？
- MSが並んでいるのはなぜ？
- WDも並んでいるのはなぜ？
- 星の分布が密な部分と疎な部分があるのはなぜ？
- WDの低温側がないのはなぜ？ 赤くならないの？ 観測バイアス？
- 明るい星が水平に並んでいるのはなぜ？
- RGがバラバラなのはなぜ？
- MSとWDに色々な色があるのはなぜ？
- MSの明るさの幅があるのはなぜ？ 明るい側は太い？
- 温度～光度とは限らないのはなぜ？ (WD, RG)
- 明るさが桁で違うのはなぜ？
- $T > 40,000 \text{ K}$ はMSしかないのはなぜ？
- この図の範囲外に星がないのはなぜ？ 超高温、超低温、 $L > 10^6 L_{\text{sun}}$???

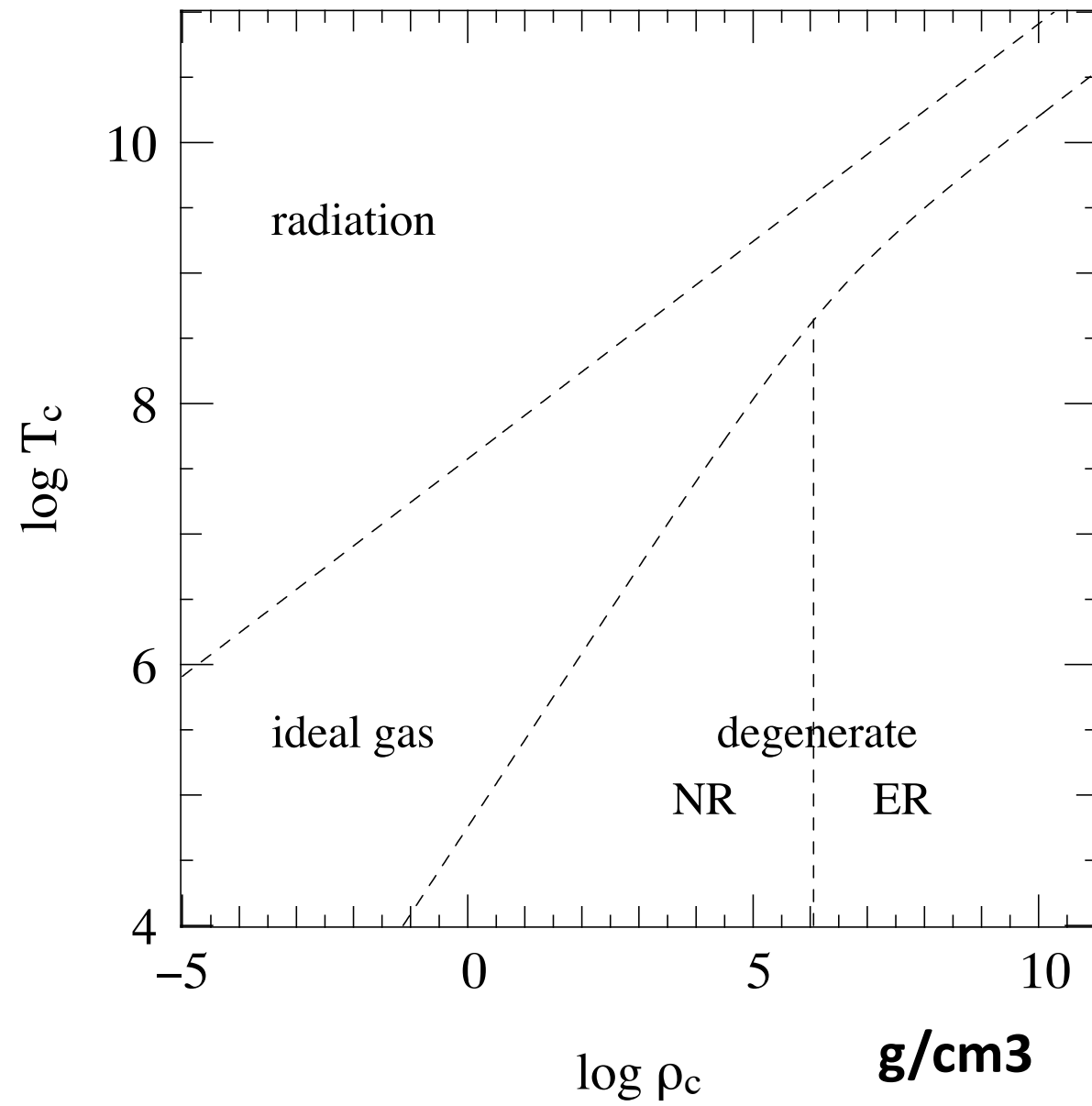
Section 9.

進化した星

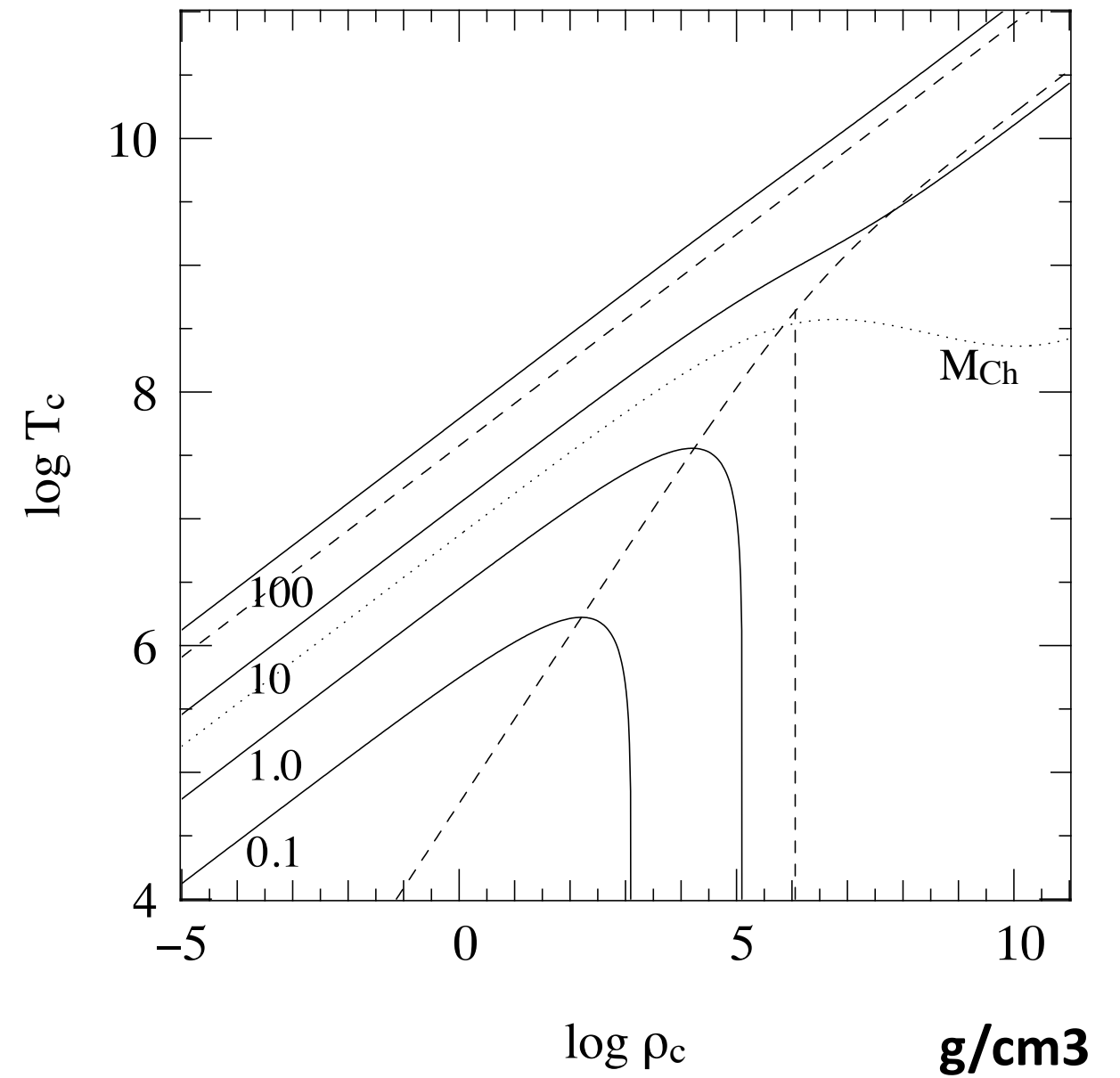
9.1 赤色巨星

9.2 林の禁止領域

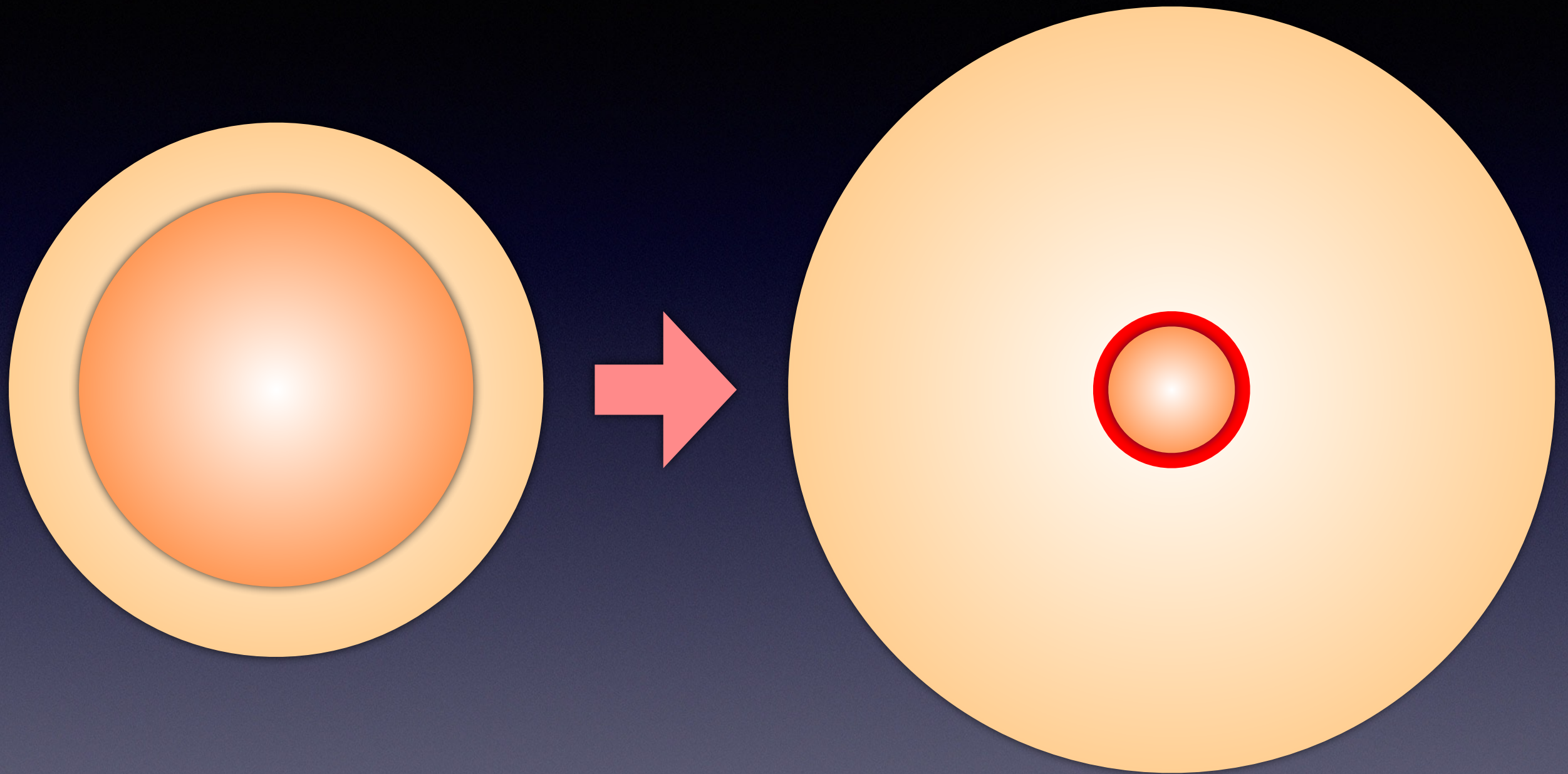
状態方程式



進化経路の概略



コアが収縮 => 外層は膨張

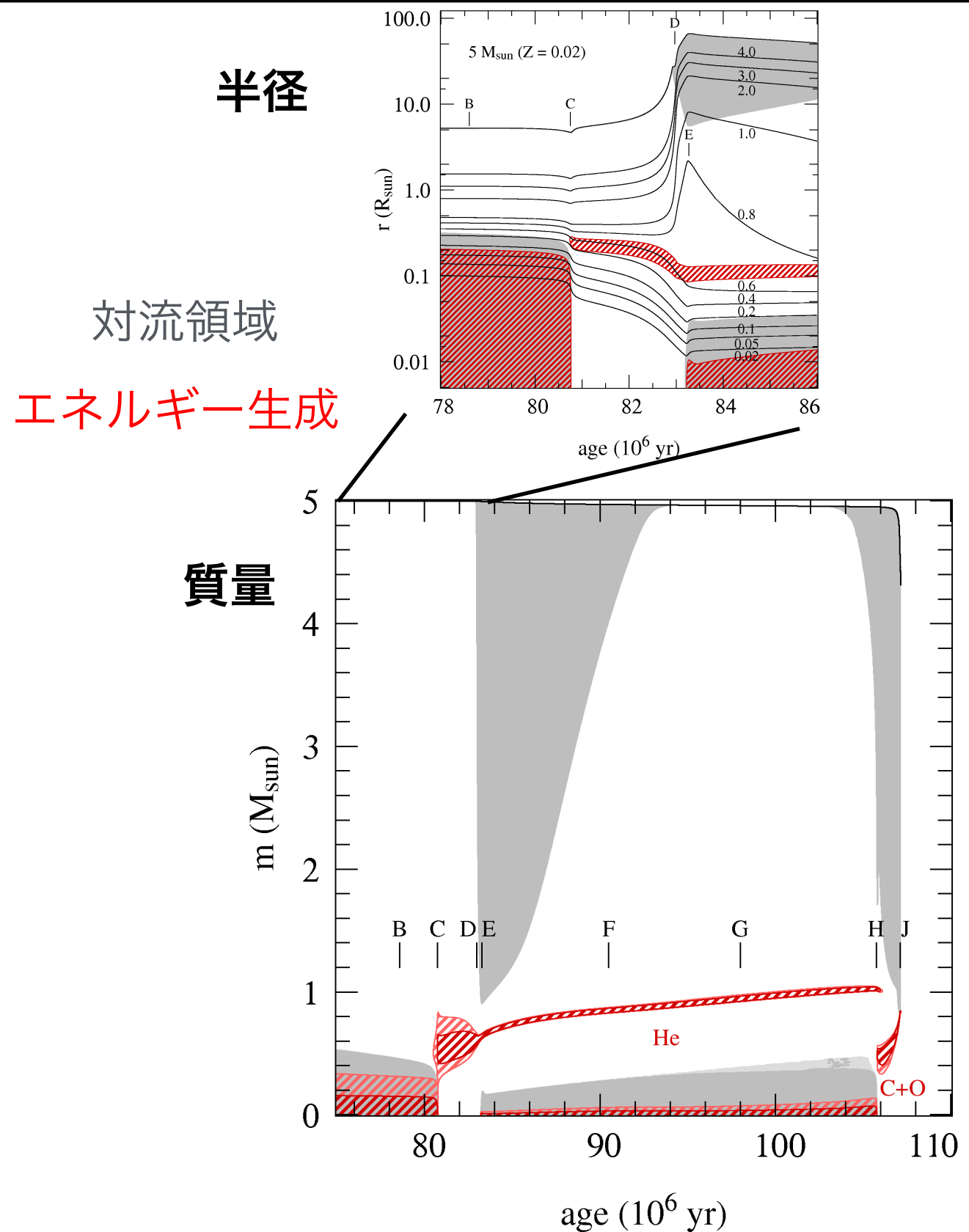
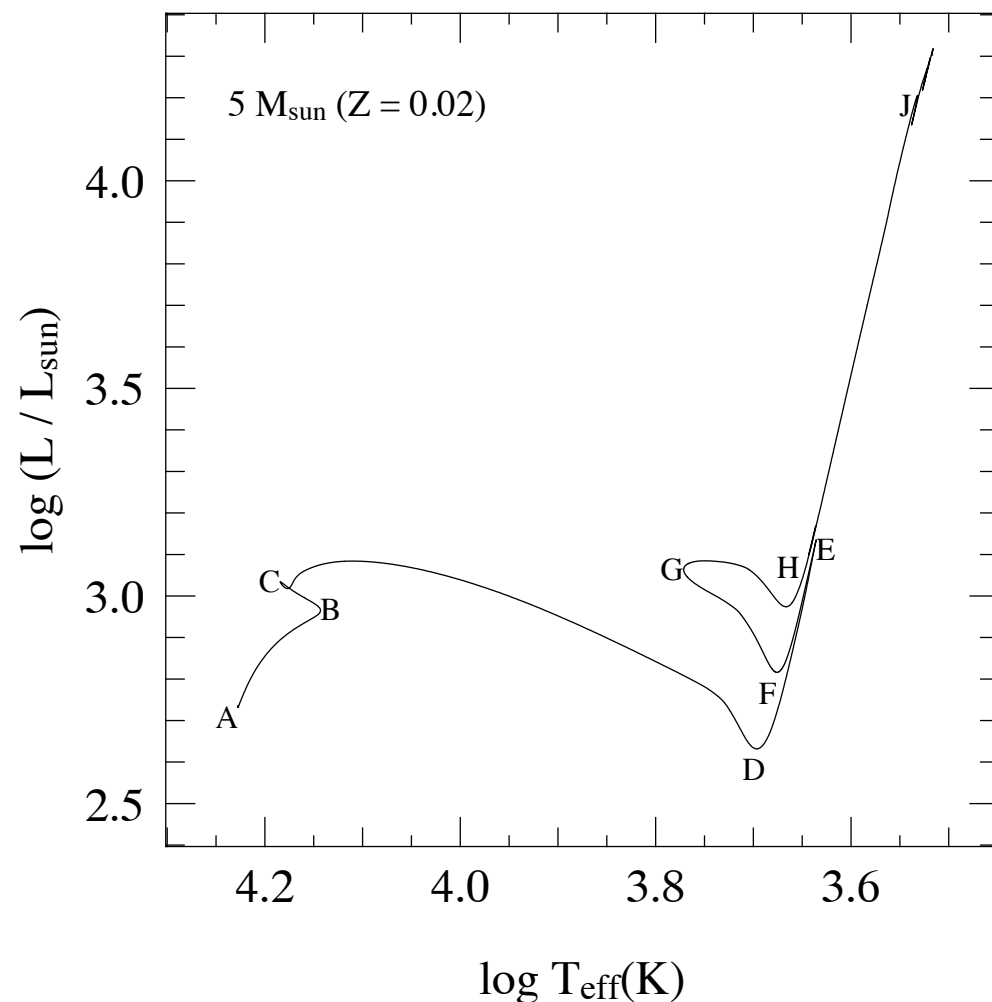


表面温度が下がる => 「赤色巨星」

赤色巨星への進化

textbook by Pols

- A: 水素燃焼
- B: 水素燃焼の終わり => コア収縮
- C: 水素殻燃焼 => 膨張
- D: 外層で対流が発達
- E: ヘリウム燃焼の開始



ヘリウム燃焼

textbook by Pols

E: ヘリウム燃焼の開始

F => G: 外層の収縮 (対流外層ではなくなる)

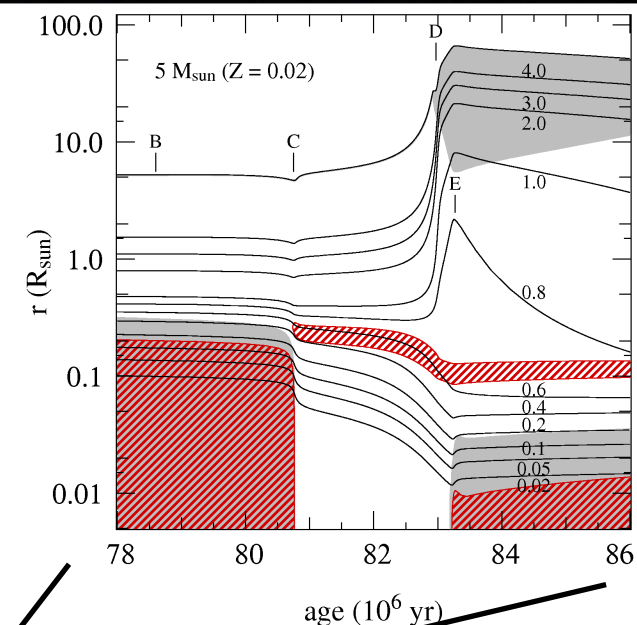
「水平分枝星」

G => H: ヘリウムコア収縮、外層の膨張

H: (コア)ヘリウム燃焼の終了、
ヘリウム殻燃焼の開始

J: AGB星

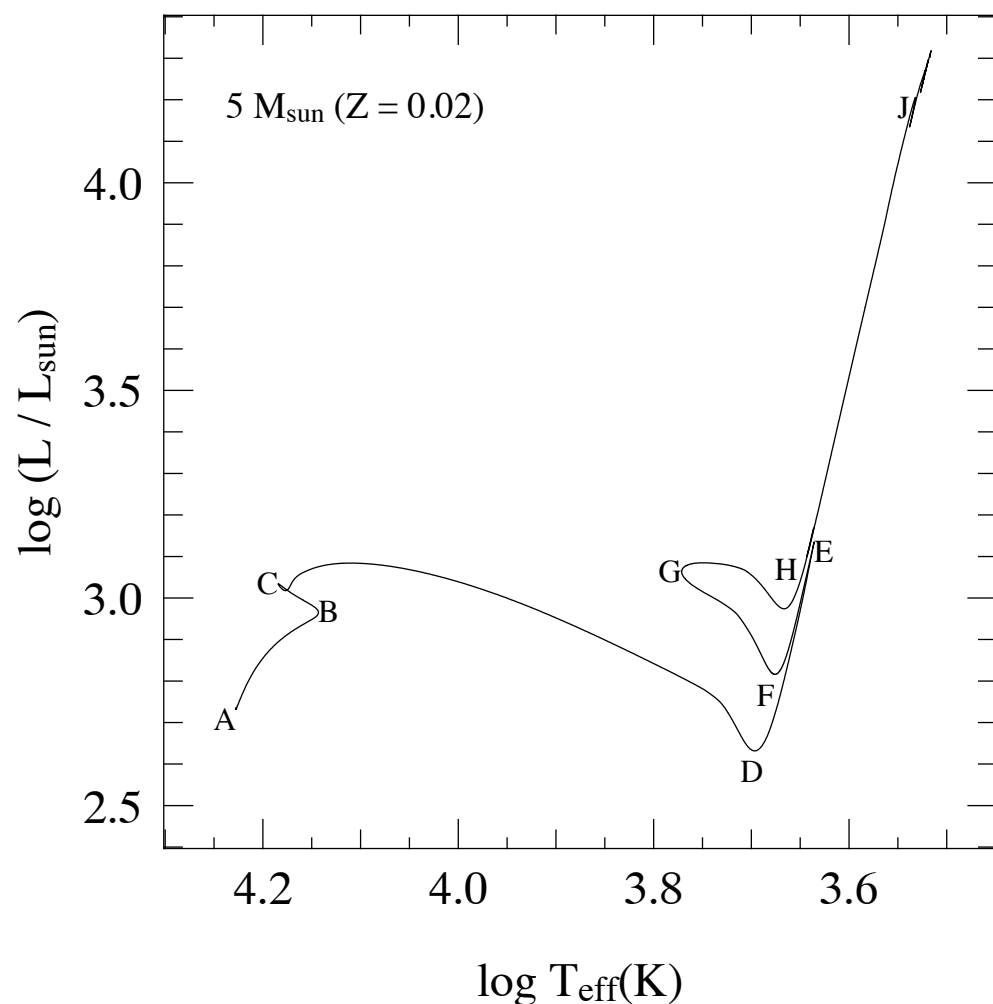
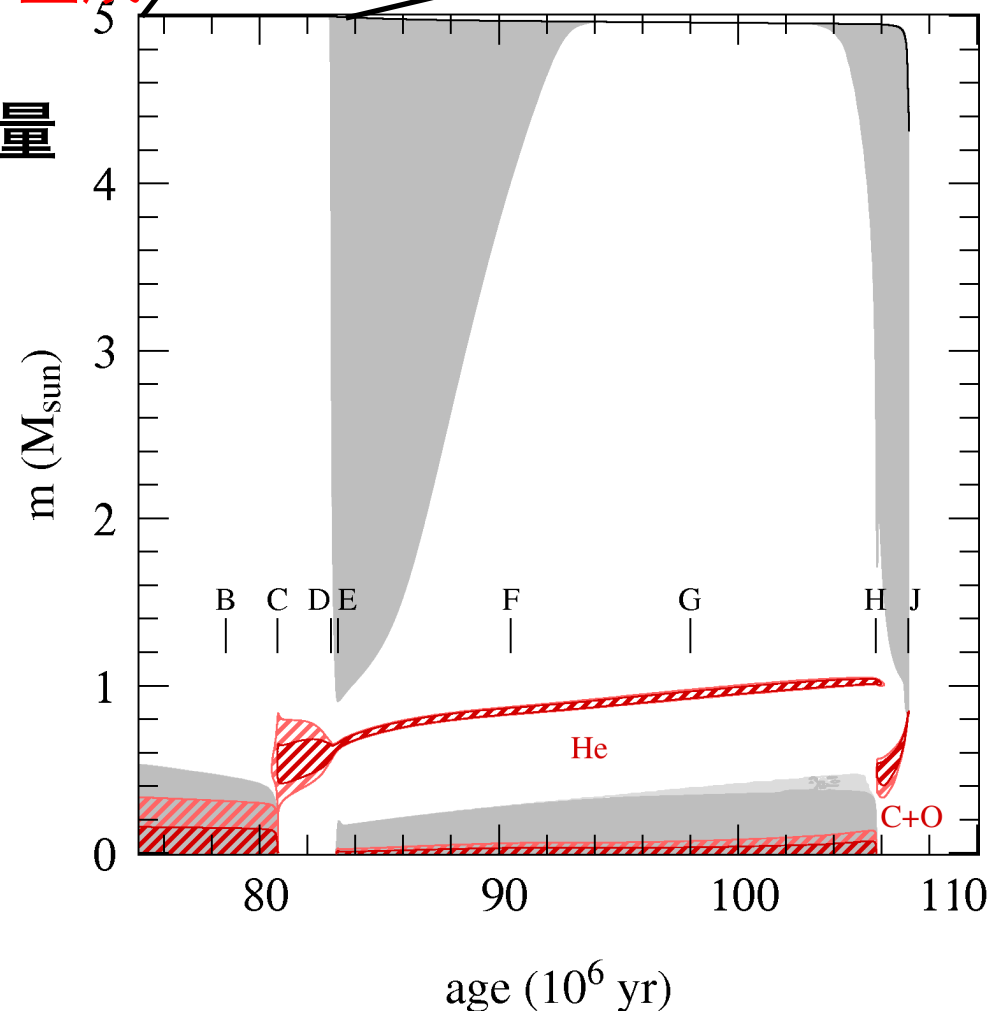
半径



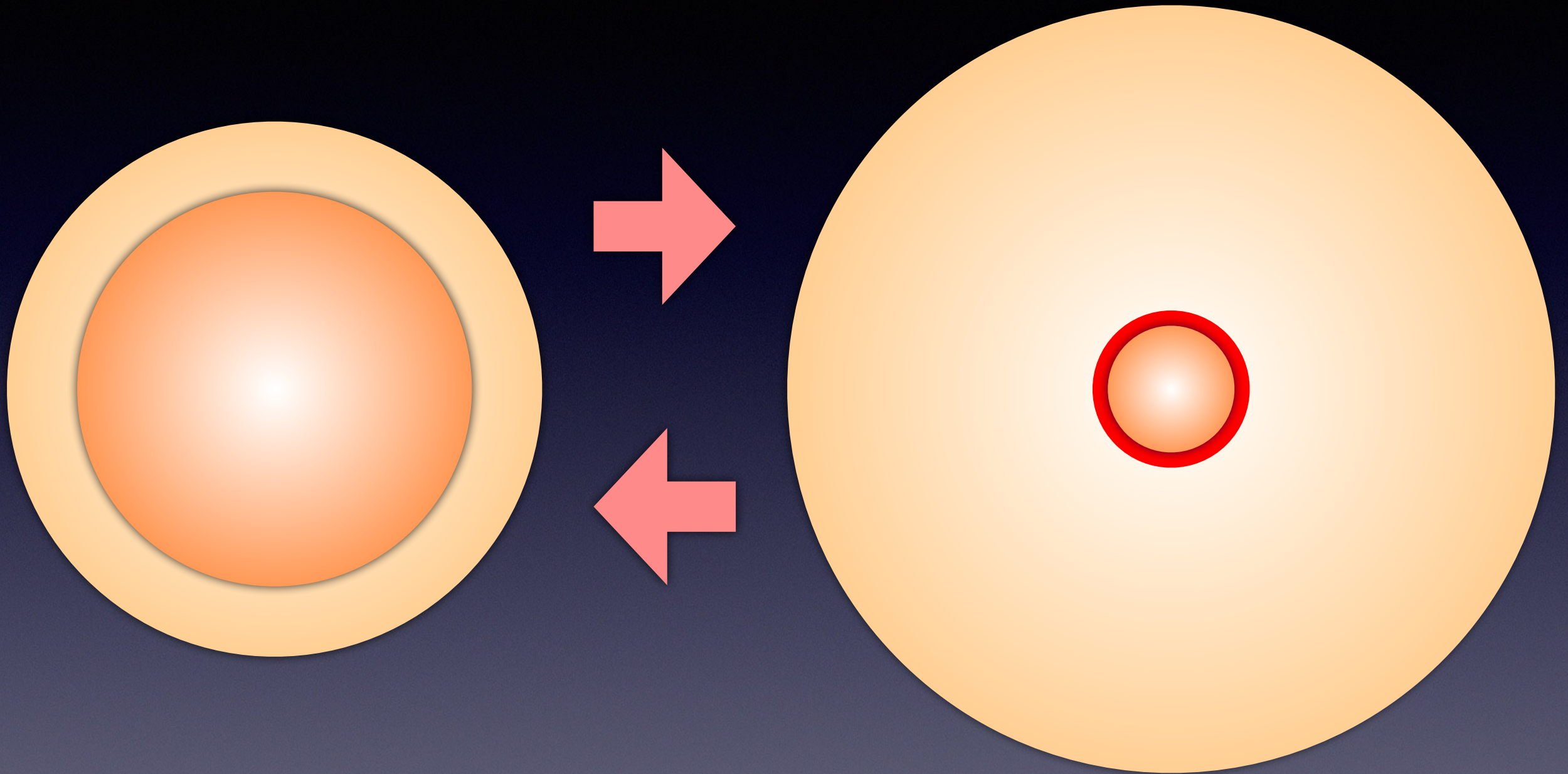
対流領域

エネルギー生成

質量



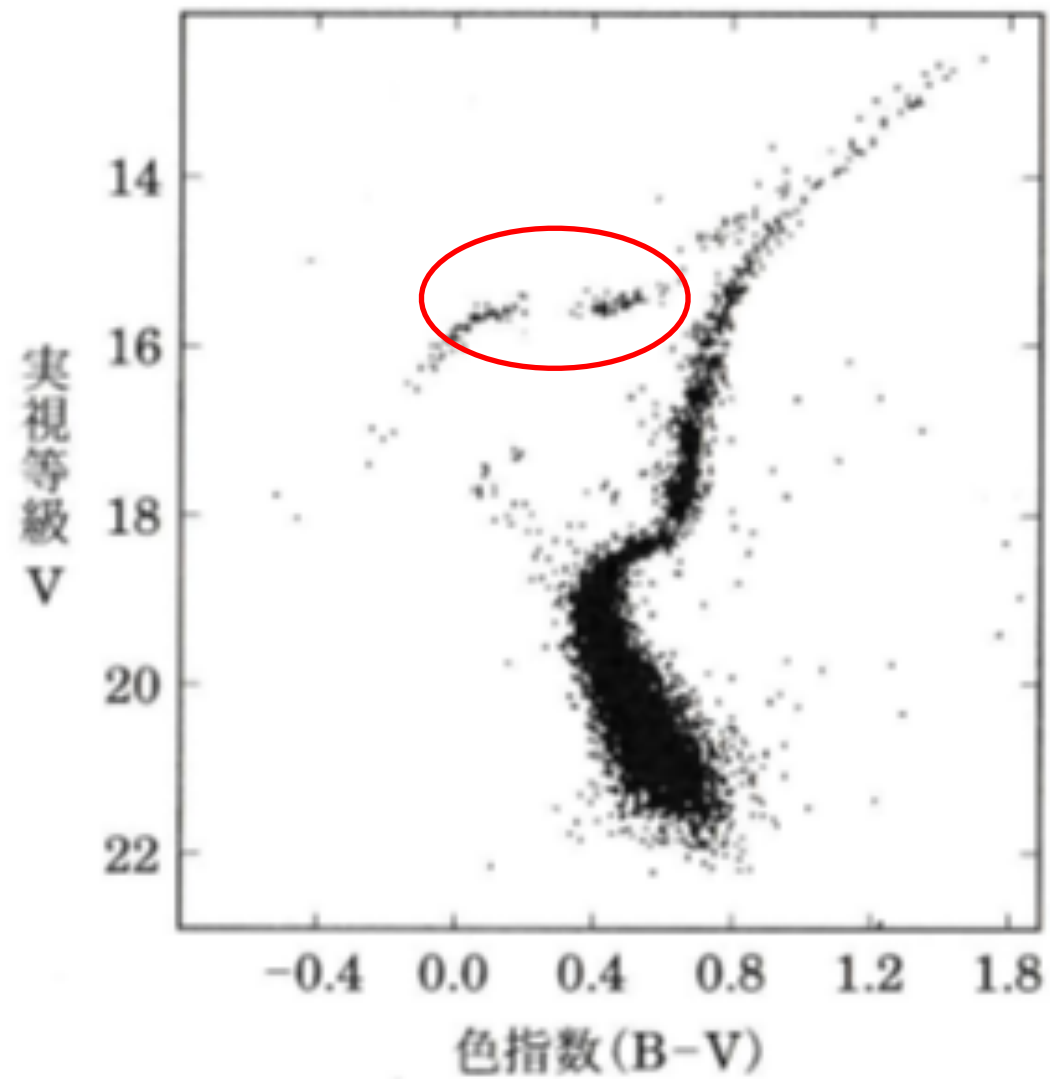
コアが収縮 => 外層は膨張
(コアの燃焼が終わった時)



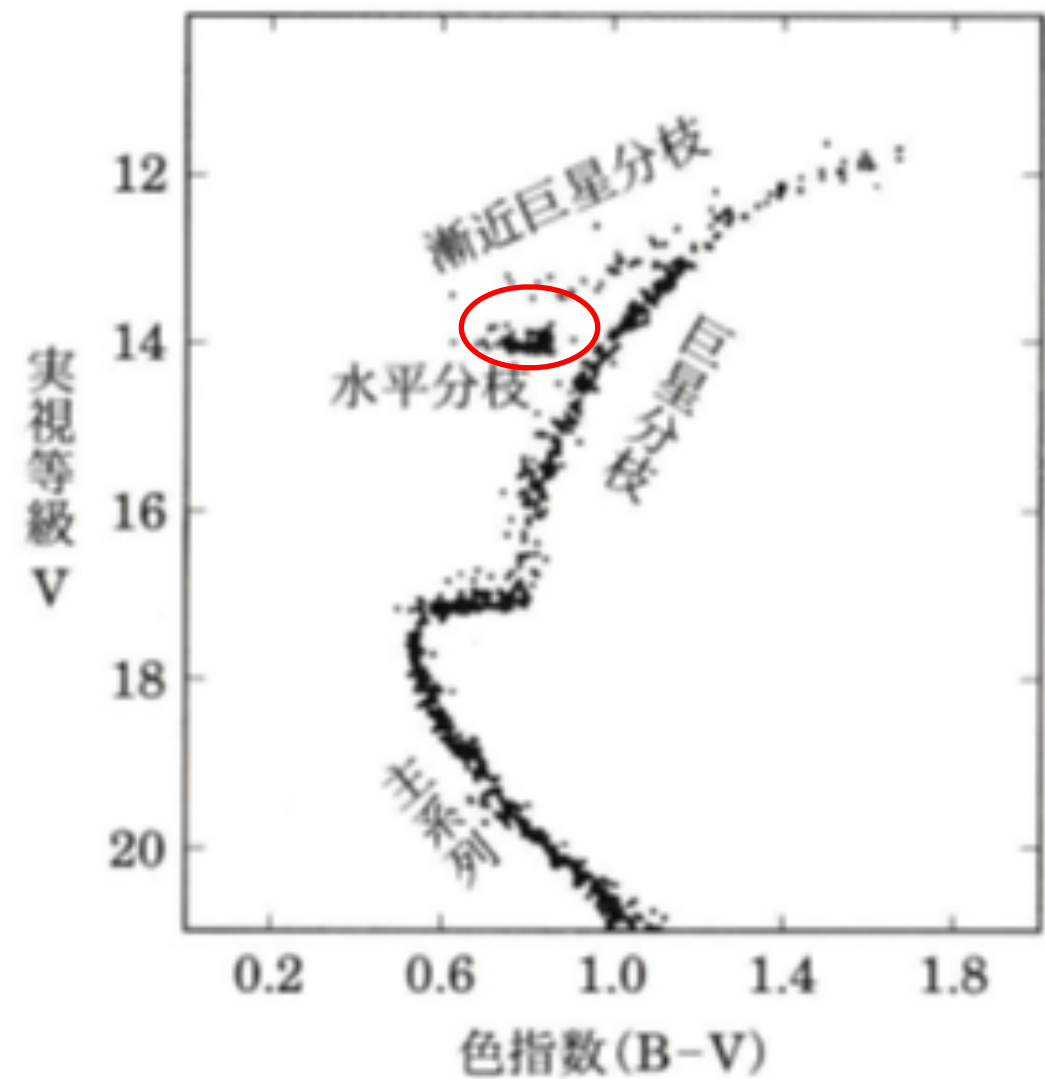
コアが膨張 => 外層は収縮
(コアの燃焼が再開した時)

球状星団

M3



47 Tuc



金属量が高い

=> 水平分枝星が赤い (レッドクランプ)

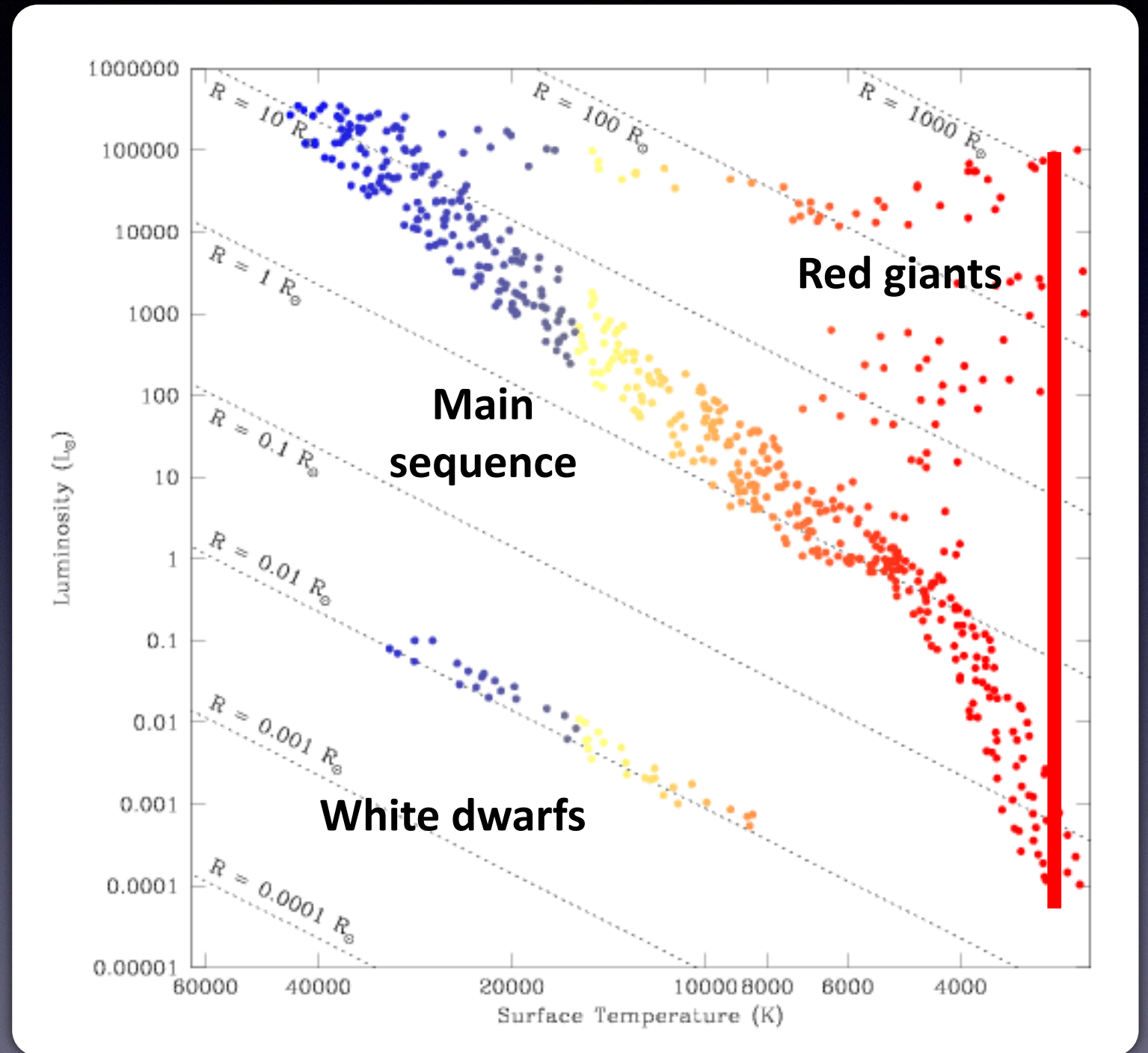
Section 9. 進化した星

9.1 赤色巨星

9.2 林の禁止領域

HR図 : $T \sim < 3,500 \text{ K}$ に星がない

Luminosity (L_{sun})



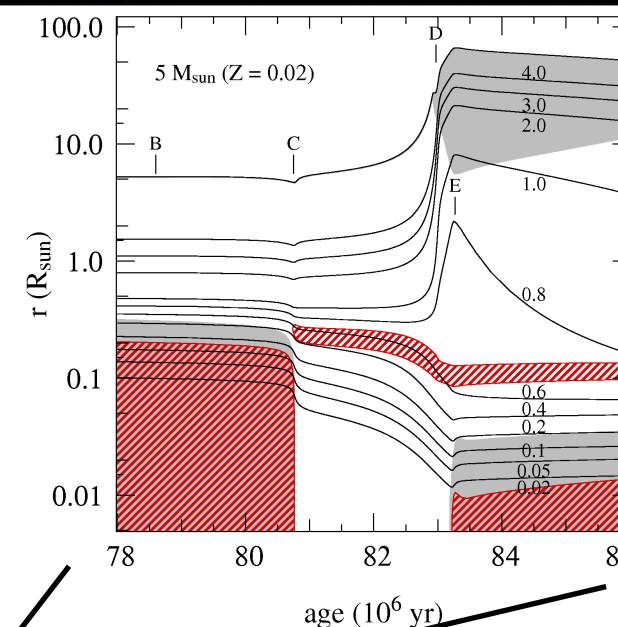
Temperature (K)



外層の大部分が対流

textbook by Pols

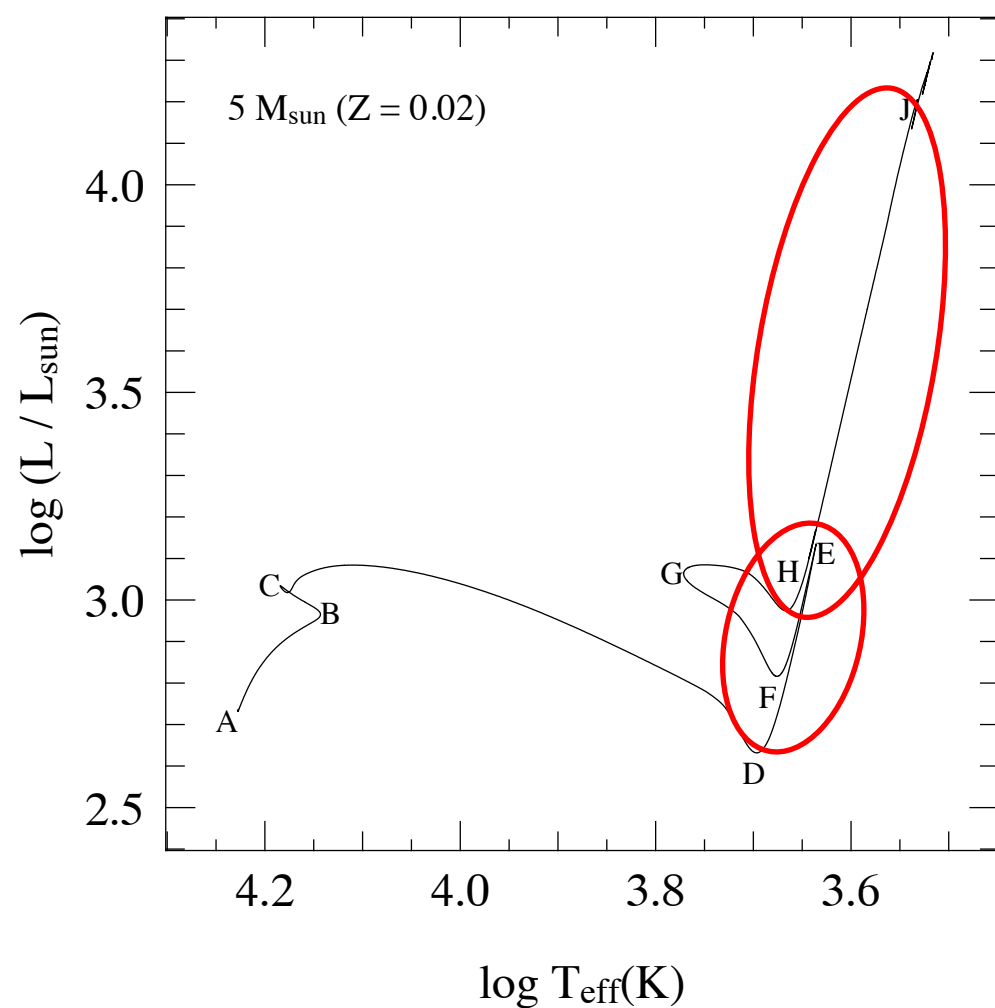
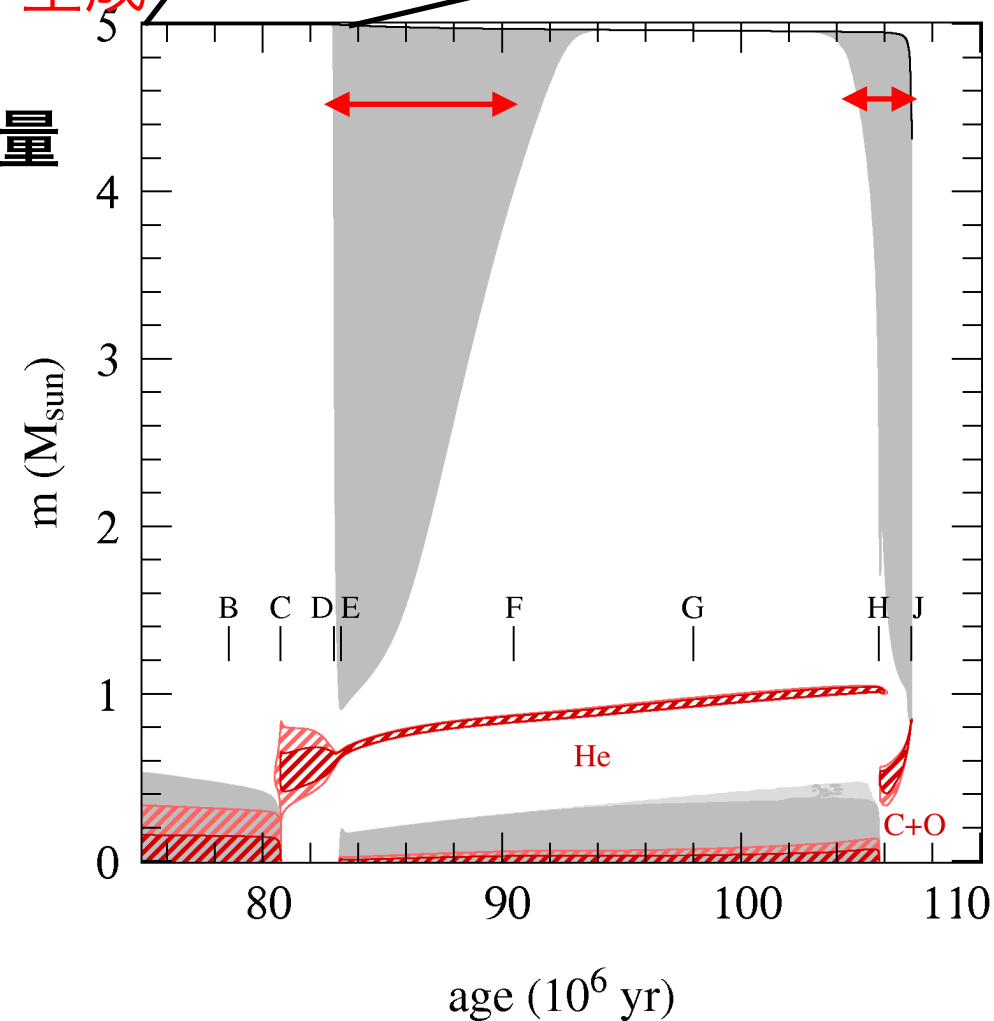
半径



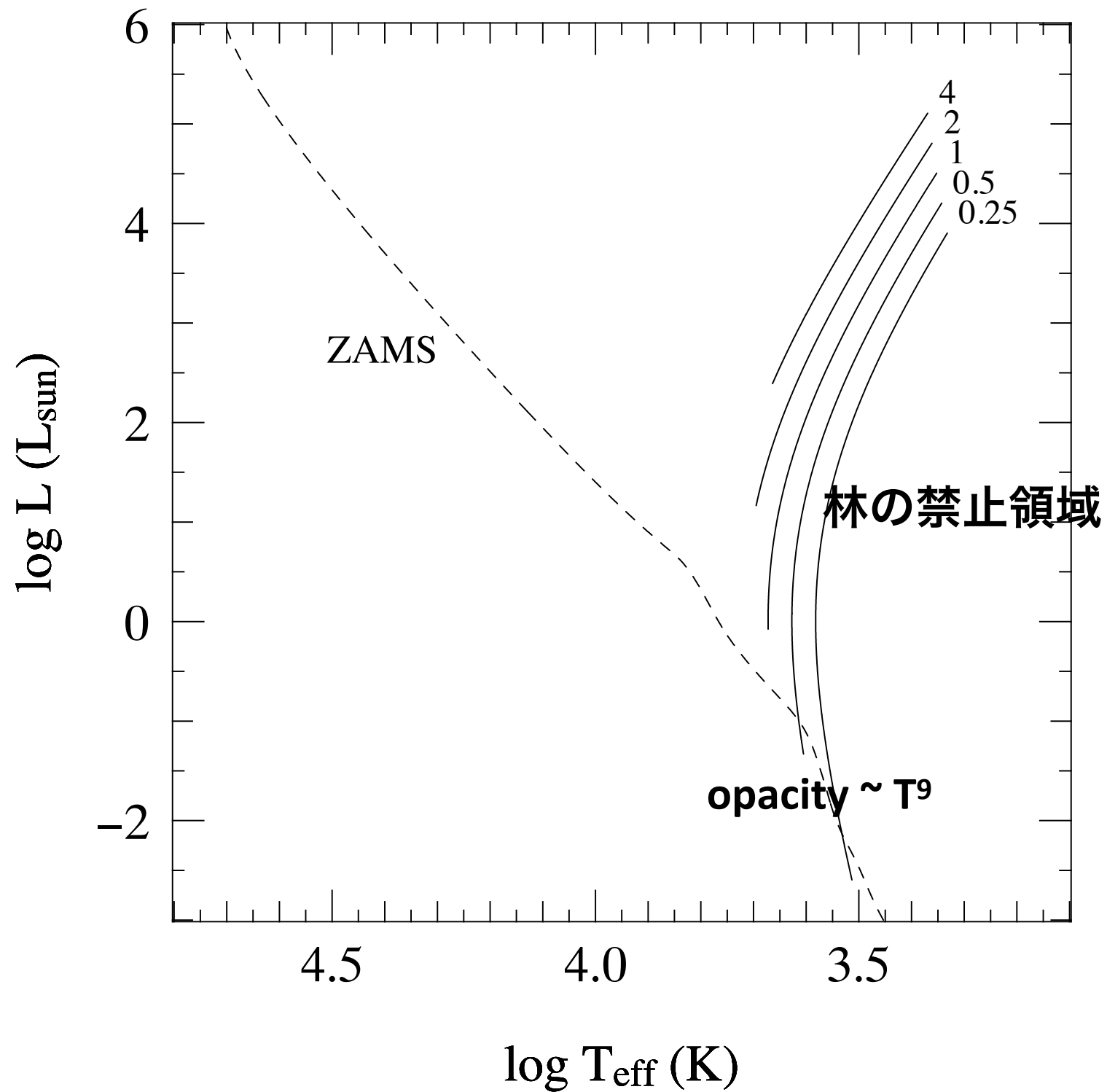
対流領域

エネルギー生成

質量



林の禁止領域

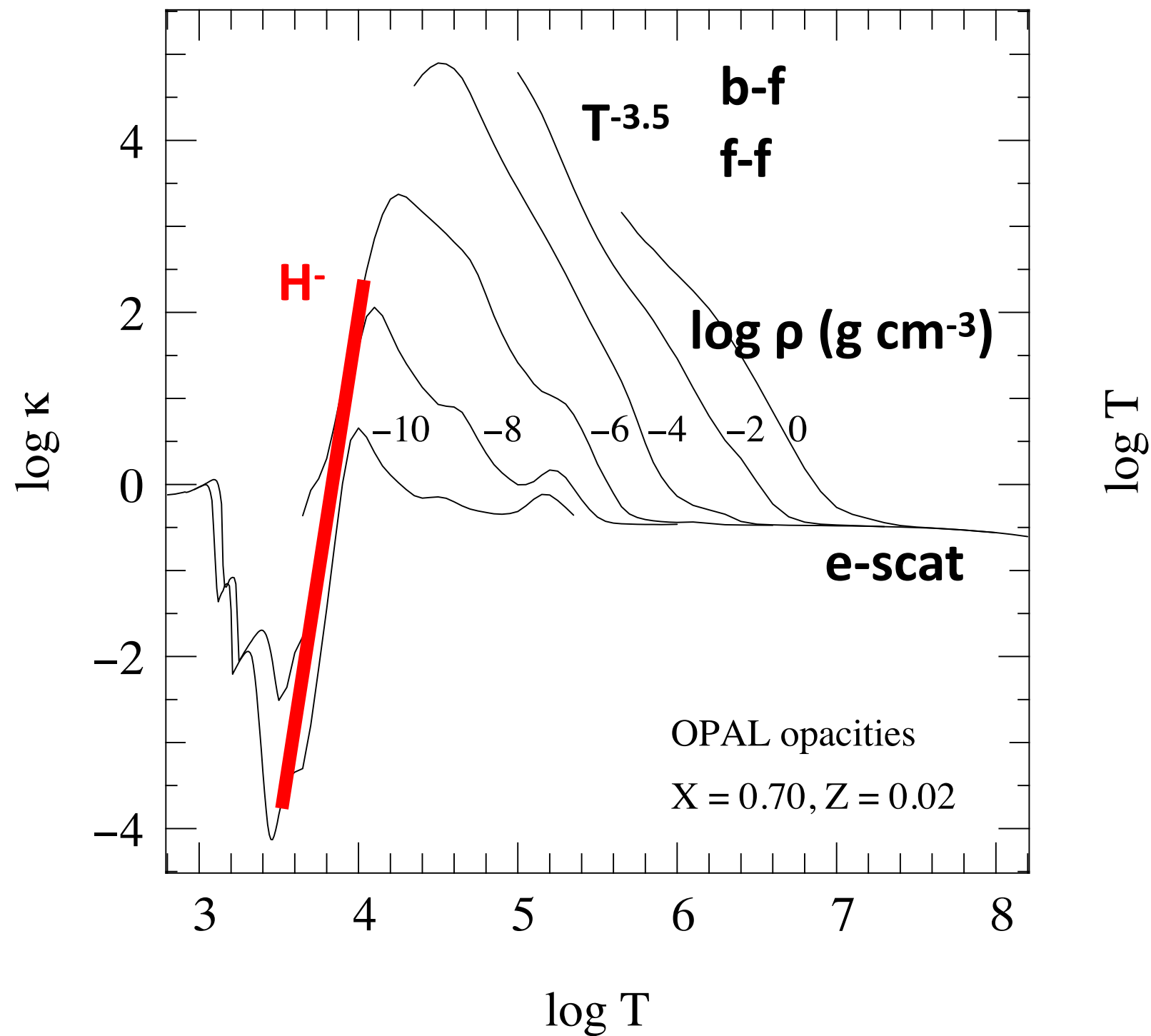




星は膨張するが、その半径には限界がある
「林の禁止領域」

なぜ低温側は「禁止」されるのか？

星の内部の不透明度



Kramers' law
 $\kappa \sim \rho T^{-3.5}$

The Outer Envelope of Giant Stars with Surface Convection Zone

Chushiro HAYASHI and Rēun HŌSHI

Department of Nuclear Science, Kyoto University, Kyoto

(Received August 28, 1961)

Abstract

The structure of a stellar envelope with a hydrogen ionization zone is calculated for a wide ranges of the stellar mass, the effective temperature, and the chemical composition in order to find the surface condition which has to be fulfilled by the solution of the internal structure of the red giant stars. The interface between the outermost radiative region and inner convective region is chosen as the place where the convective motion is just sufficient to transport the total energy flux, taking into account the uncertainty in the efficiency of the energy transport by convection. The results show that for given mass and chemical composition stars with surface convection zones lie in a relatively narrow region in the HERTZSPRUNG-RUSSEL diagram, which is in agreement with the observed locations of the red giant branches of the galactic and globular clusters.

Hayashi & Hoshi 1961

Stellar Evolution in Early Phases of Gravitational Contraction

Chushiro HAYASHI

Department of Nuclear Science, Kyoto University, Kyoto

(Received August 28, 1961)

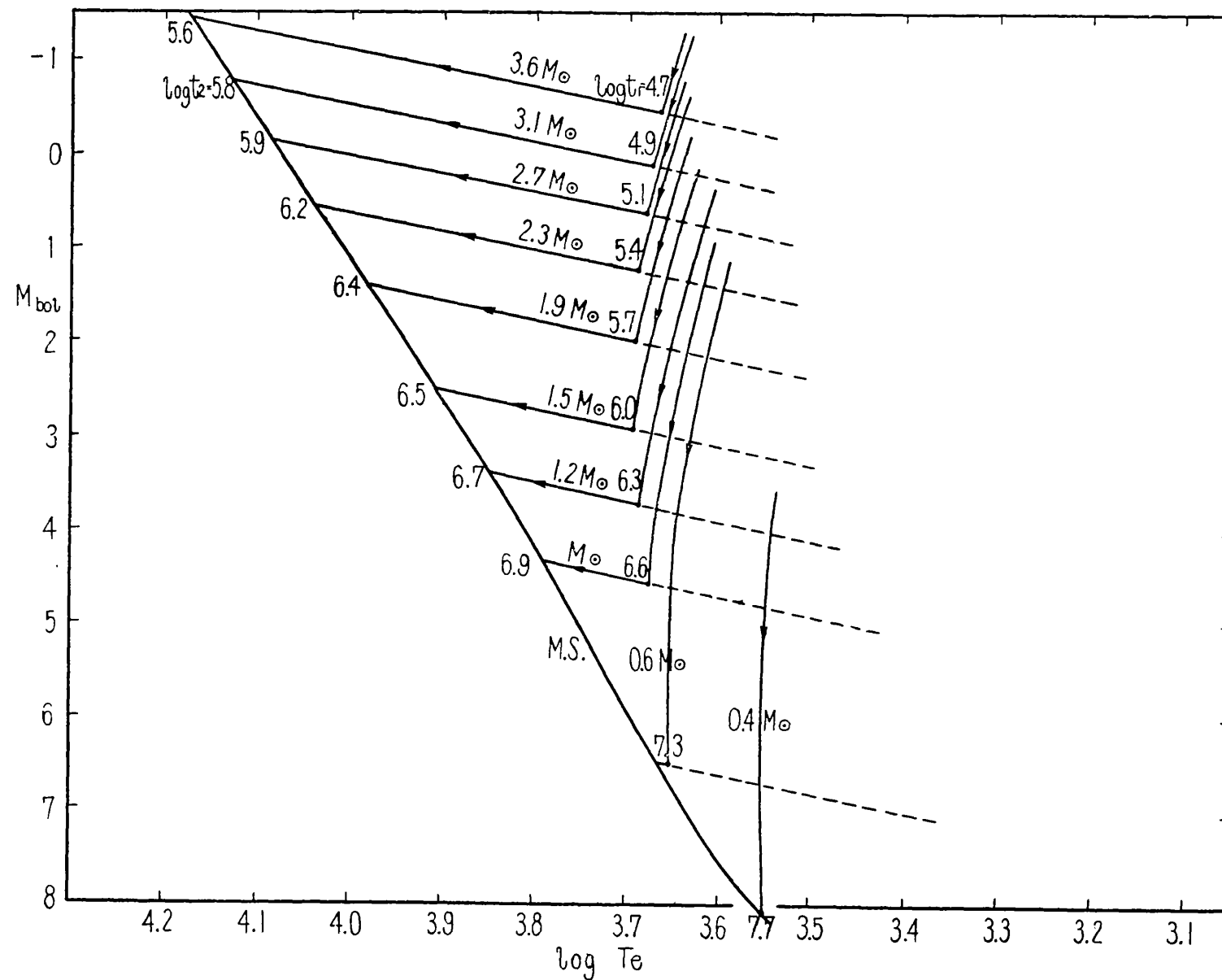
Abstract

The surface condition for red giant stars worked out in the previous paper indicates that stars lie in the low luminosity and low temperature region of the H - R diagram cannot be in equilibrium so that the evolutionary path of contracting stars in this region will be different from that calculated by HENYEU et al. The age of these stars along the loci of quasi-static solutions is calculated. The result seems to explain well the H - R diagram of a young cluster NGC 2264.

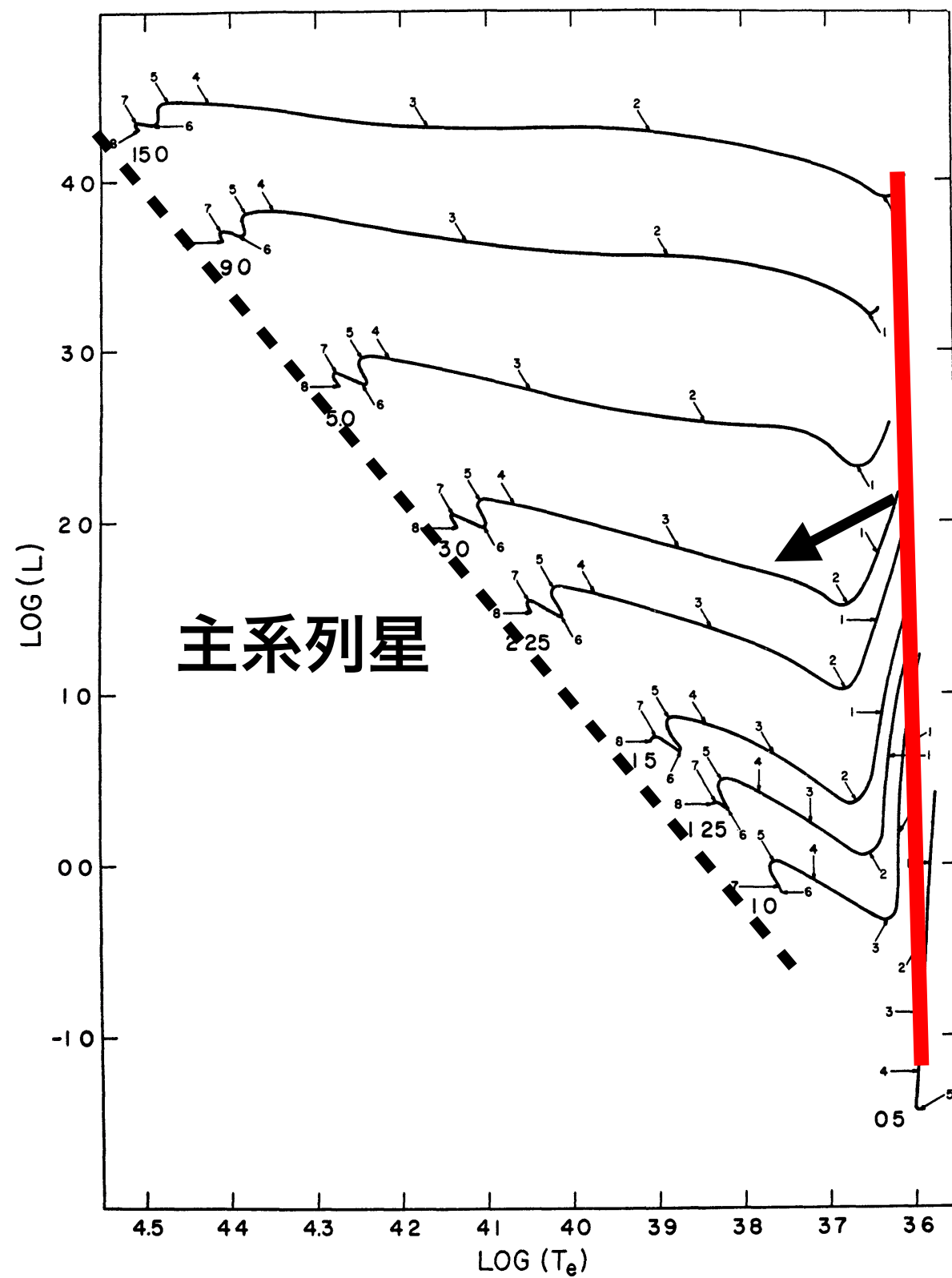
Hayashi 1961

”Hayashi track”

前主系列星の進化



前主系列星の進化



Iben 1965

まとめ

- 水素燃焼が終了

- コアの収縮・水素の殻燃焼 => 外層の膨張
- 外層が低温に => opacity増大 => 対流
- 外層が全て対流 => 林トラップ (温度の下限値)

- 赤色巨星

- コアのヘリウム燃焼

- 外層の収縮 => 林ラインから離れる

- 水平分枝星・レッドクランプ

- コアのヘリウム燃焼が終了・ヘリウム殻燃焼

- 再び林ラインへ

- 漸近巨星分枝星 (Asymptotic giant branch, AGB)