



Evolução Estelar II

Ast-202-3

Aula 6

Evolução após a Sequência Principal

Credit: NASA, ESA, P. Oesch (University of Geneva), and M. Montes (University of New South Wales)

Carlos Alexandre Wuensche
Divisão de Astrofísica
ca.wuensche@inpe.br



Leitura recomendada

- ☑ R. Kippenhahn, A. Weigert, A. Weiss. Stellar Structure and Evolution (2nd ed.). Springer (2012)
 - ✓ Caps. 31 a 33

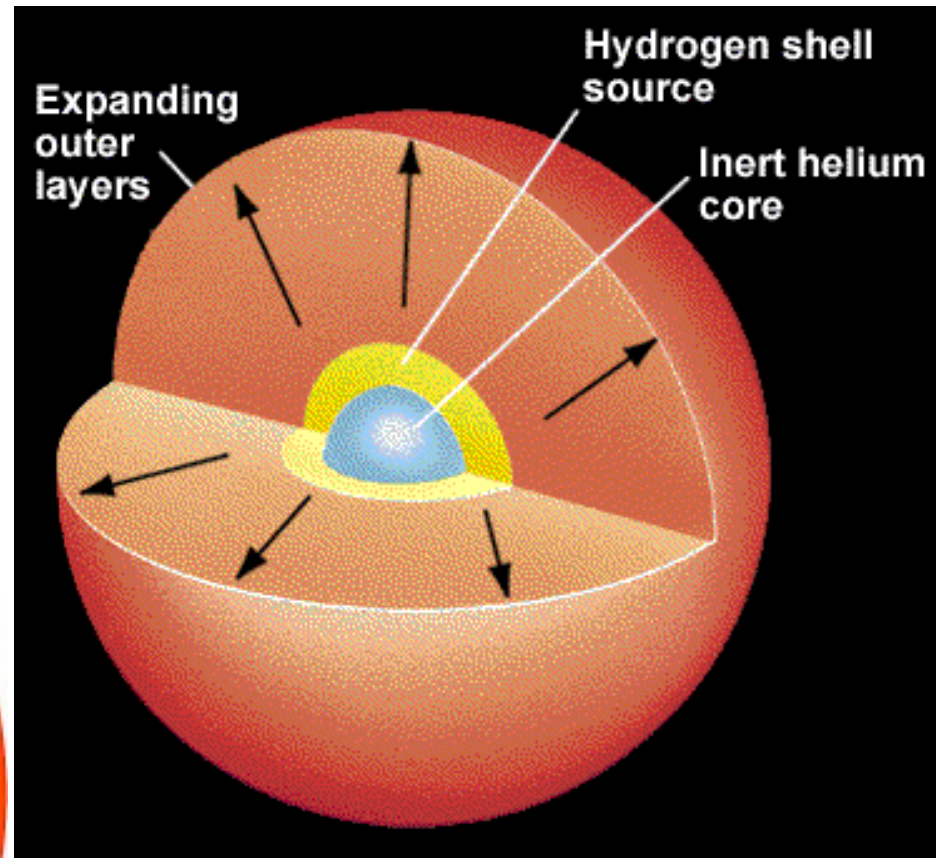
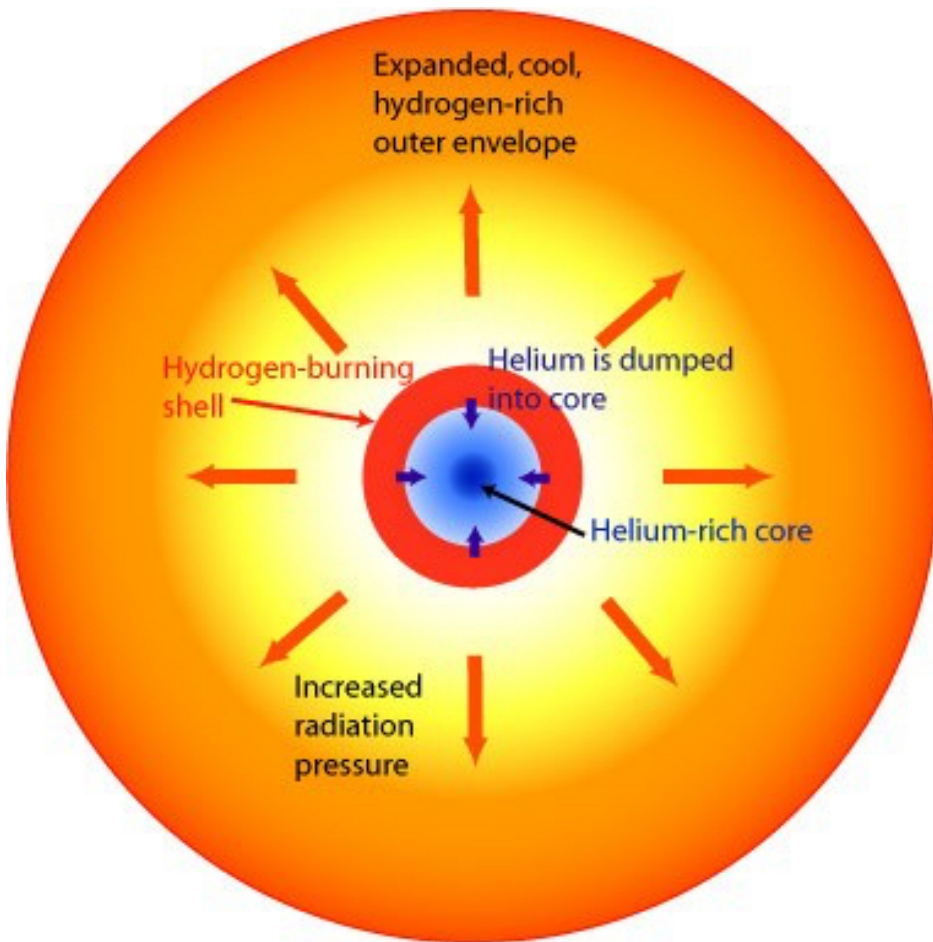
Discussão

- ❑ Gráficos representam modelos e conceitos, não reproduzindo, necessariamente, as observações. Um exemplo disso é o intervalo de Hertzsprung.
- ❑ Muitas das análises discutidas aqui se baseiam em resultados de modelos que foram criados nos anos 60 e sofreram várias implementações e aperfeiçoamentos desde então/
- ❑ Deve-se ter em mente as limitações na manipulação dos ingredientes do modelo (M , κ , ε , etc.) para gerar um resultado confiável

Um pequeno roteiro

- ☑ Diferentes trajetórias evolutivas
 - ✓ Estrelas de massas baixas, intermediárias e grandes possuem diferentes trajetórias para fora do diagrama H-R em função de sua massa e composição química (*só para não esquecer*)
- ☑ Núcleos de He:
 - ✓ $M > 1,3 M_{\text{sol}}$ - Homogeneidade e degenerados
 - ✓ $M < 1,3 M_{\text{sol}}$ - Estratificação e serão degenerados
- ☑ Diferentes trajetórias evolutivas. Discutiremos o processo considerando
- ☑ Massas grandes: $M > 8 - 10 M_{\text{sol}}$ (o núcleo jamais passará por estágio degenerado)
 - ✓ Massas intermediárias: $1,3 < M/M_{\text{sol}} < 8 - 10$ (após a queima de He, temos um núcleo de C-O degenerado)
 - ✓ Pequenas massas: $M < 1,3 M_{\text{sol}}$ (após a queima de H, temos um núcleo de He degenerado)

- ☑ Queima de H no núcleo durante a fase na SP (todas)
- ☑ As trajetórias horizontais da SP para a região do ramo das gigantes ocorre muito rapidamente (resultado da instabilidade causada pela violação do eq. hidrostático)
- ☑ Queima de H na camada externa e ramo das gigantes vermelhas (todas)
- ☑ Flash do He no núcleo (baixa massas)
- ☑ Queima de He no núcleo (todas)
- ☑ Passagem pelo ramo horizontal e "Blue Loop" ($M > 1,3 M_{\text{sol}}$)
- ☑ Subida ao ramo assintótico das gigantes ($M < 8 - 10 M_{\text{sol}}$)
- ☑ Queima de C, O, Mg, Na, Si, S ($M > 8 - 10 M_{\text{sol}}$)



- ☑ Casos evolutivos passíveis de estudo, via comparação com observações, excluem estrelas da baixa SPIZ “não-evoluída”, devido ao fato de, dentro do tempo de Hubble, elas ainda não terem saído da SP.
- ☑ Um item importante a ser lembrado, nos estágios avançados, é que tipo de equação de estado rege o núcleo, onde as reações nucleares estão acontecendo.
- ☑ Para $8 - 10 < M/M_{\text{Sol}} < \sim 100$, o destino provável da estrela é encerrar seu ciclo evolutivo como supernova.
- ☑ Não é possível definir precisamente os intervalos de massa durante estágios mais avançados da evolução estelar porque pequenas mudanças na composição química, nos processos físicos ou nos métodos de cálculos utilizados podem alterar drasticamente o resultados de modelos com massas próximas a estes limites



Massas intermediárias

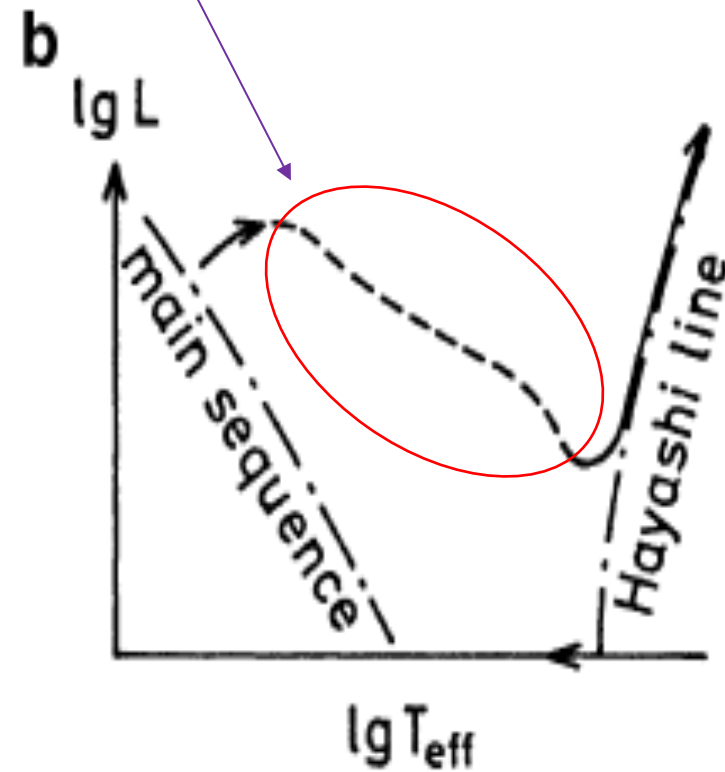
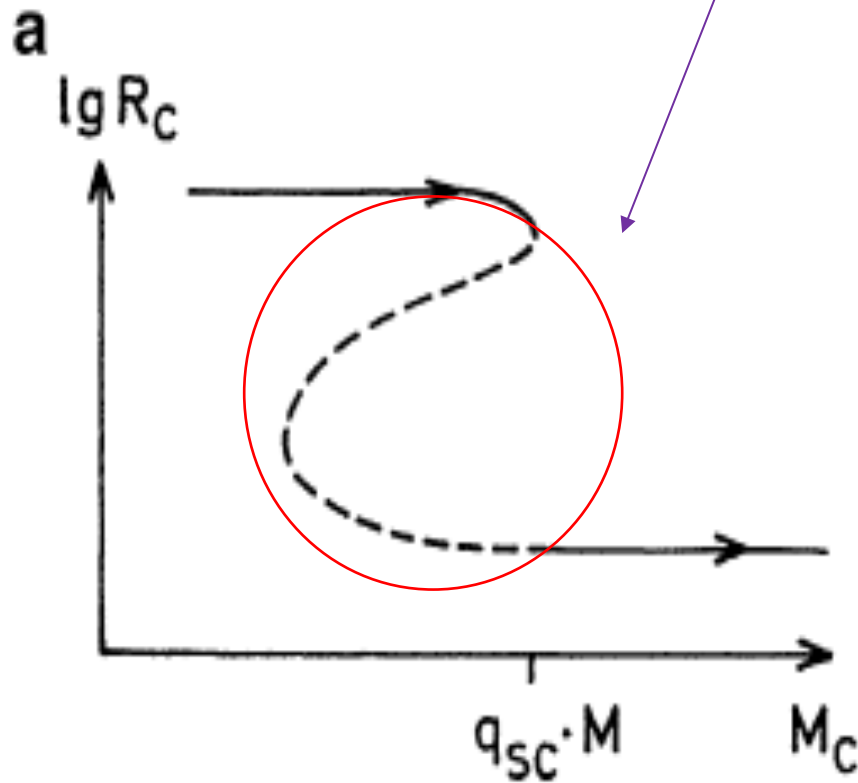
Após a queima de H

- ☑ Após a queima de H, estrelas de massa intermediária apresentam as seguintes características:
 - ✓ Núcleo de He **homogêneo e isotérmico**
 - ✓ Queima de H na casca externa ao núcleo de He
 - ✓ Matéria no núcleo **não degenerada**
 - ✓ Possibilidade de contração rápida devido a ausência de reações nucleares
 - ✓ Evolução para fora da SP!

$M=3 M_{\text{Sol}}$

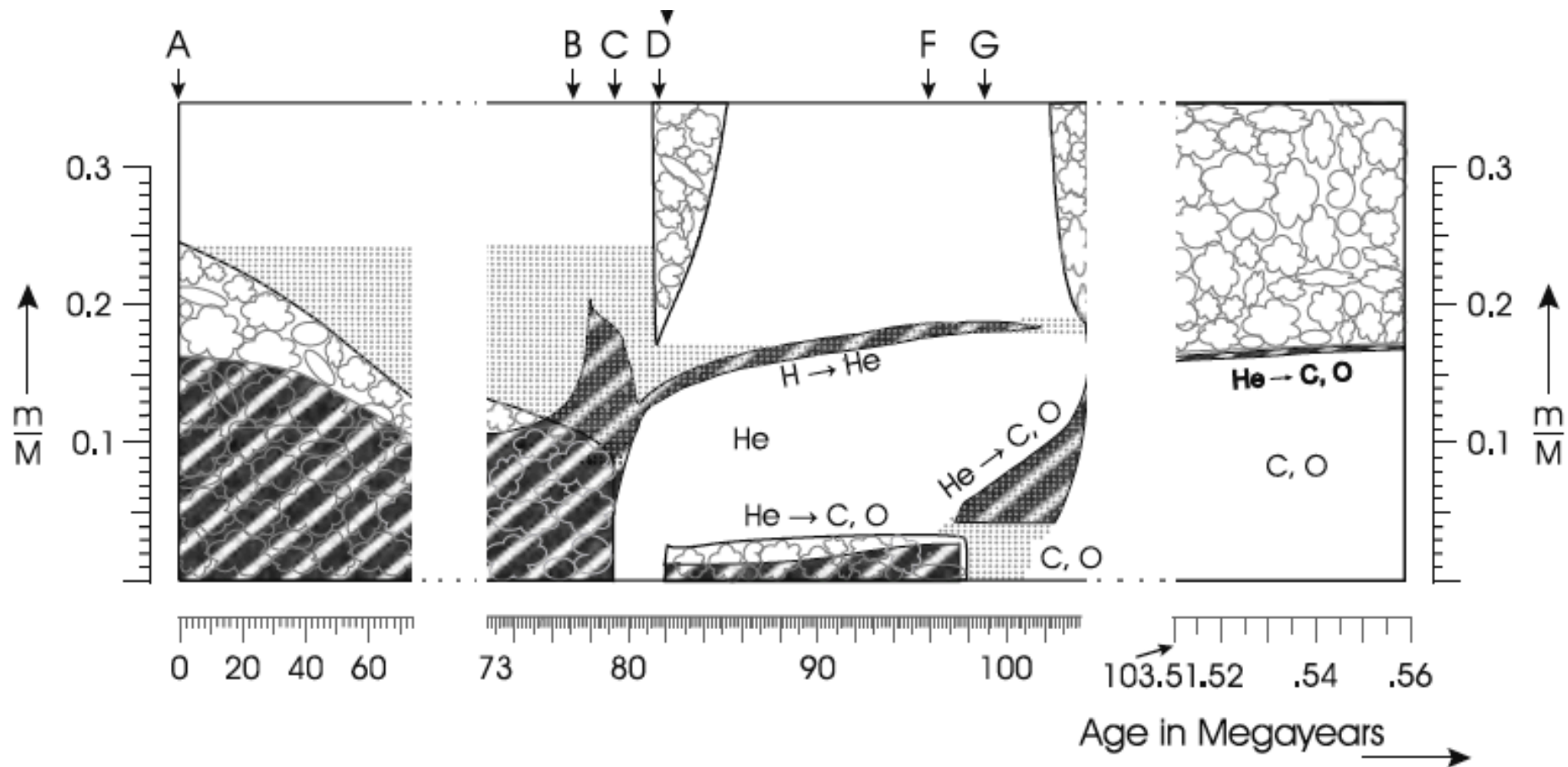
Após a queima de H

Condição fora do equilíbrio

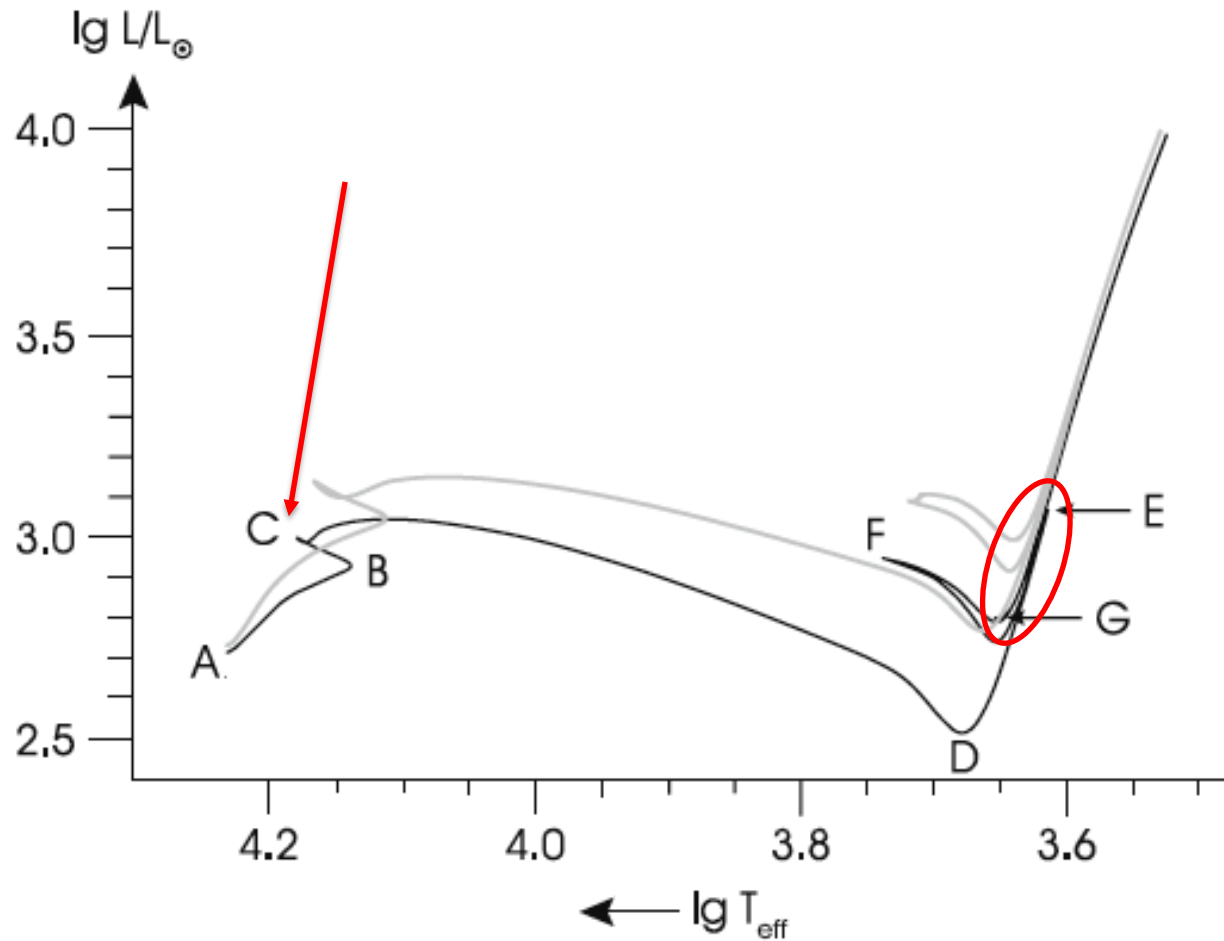


Transição descontínua...

☑ Sequência evolutiva para uma estrela de $5 M_{\text{sol}}$.



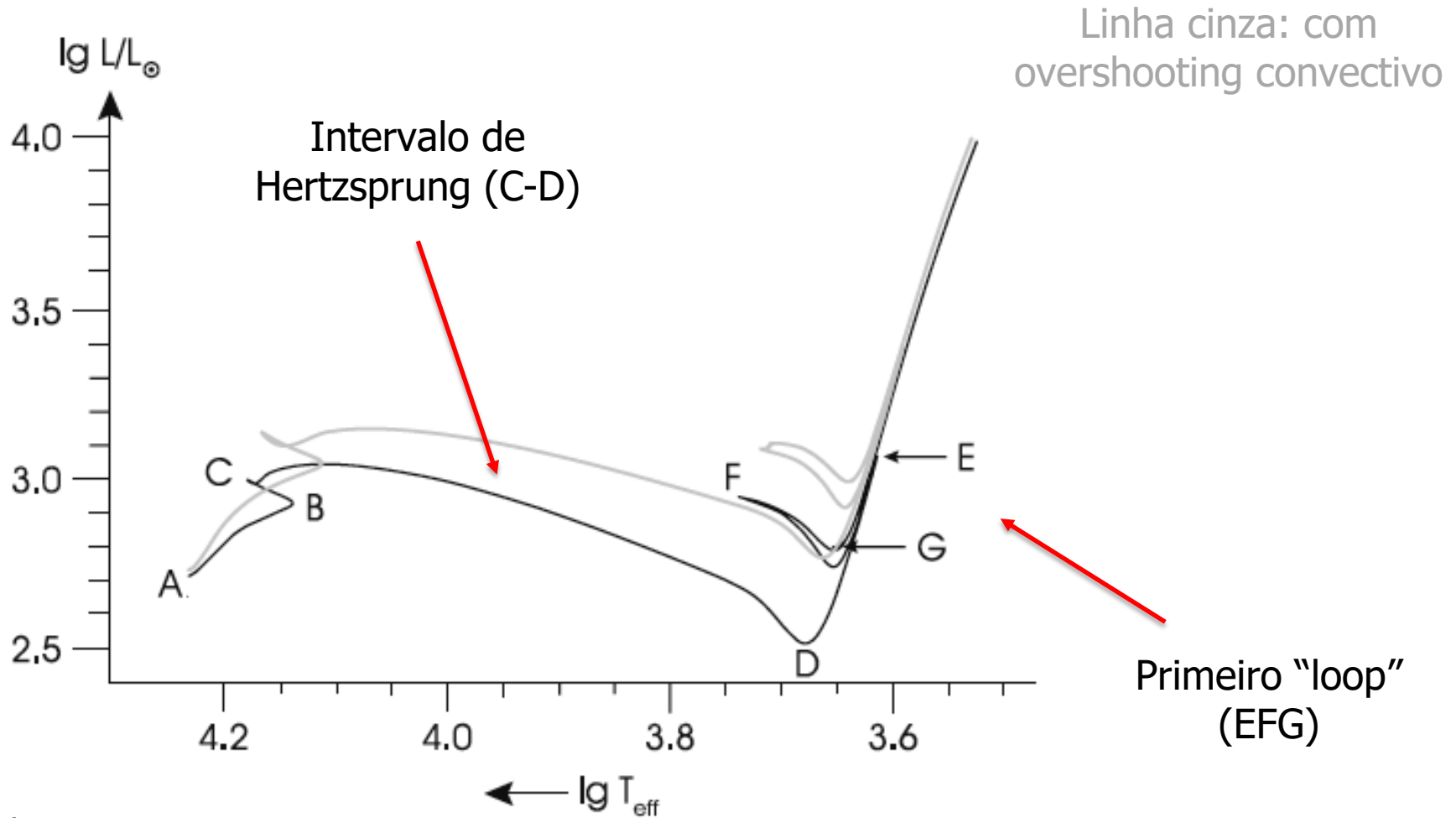
- Sequência evolutiva para uma estrela de $5 M_{\text{sol}}$ após a saída da SP (partindo de A).



Linha cinza: com 'shooting convectivo

Início da queima de He

- Sequência evolutiva para uma estrela de $5 M_{\text{sol}}$ após a saída da SP (partindo de A).



Referência: Kippenhanhn, Weigert, Weiss (2012)

Carlos Alexandre Wuensche (2021)

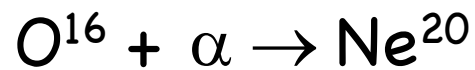
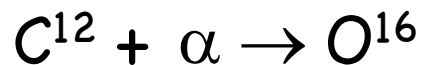
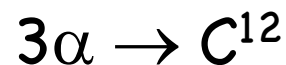
Intervalo de Hertzsprung

- ❑ Expansão rápida do envelope faz com a trajetória C-D seja extremamente rápida, da ordem de milhares a dezenas de milhares de anos
- ❑ A estrela busca recuperar o eq. hidrostático
- ❑ O caminho para a fase de gigante vermelha ocorre em poucos milhares de anos => pouco provável encontrar uma estrela nessa fase
- ❑ A ausência notável de estrelas nesse caminho é conhecida como "intervalo de Hertzsprung"
- ❑ Consequência direta dos núcleos atingirem a instabilidade de S-C após a exaustão da queima de H.



A queima de He central

- ☑ Reação dominantes, na sequência de acontecimento:



- ☑ Curta duração (cerca de 10^7 anos).
- ☑ Pequena contribuição para a saída total de energia (entre 6% e 48% nos pontos E, F, G no slide 6).
- ☑ **Contribuição principal:** queima de H na casca acima do núcleo de He.

- ☑ Envelope convectivo estende-se até regiões centrais, transportando elementos mais pesados (C, O) distribuindo-os nas camadas externas do envelope, podendo levá-los à fotosfera
- ☑ Processo conhecido como 1a. Dragagem (**1st dredge-up**)
- ☑ Concentração da produção da energia no centro ($H \Rightarrow He$) produz um envelope convectivo

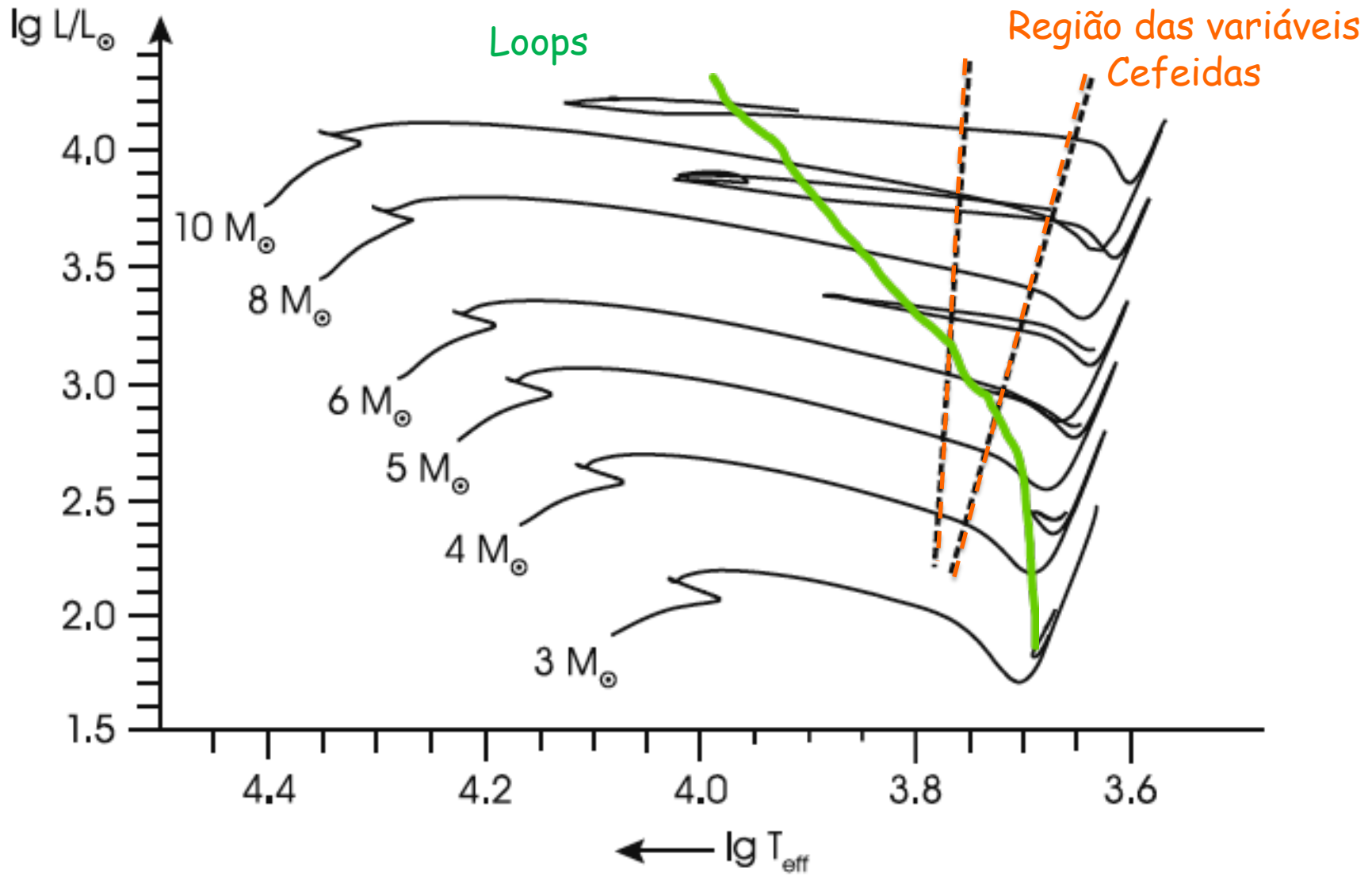


Table 31.1 Characteristic points and the time elapsed after the zero-age main-sequence stage in the evolutionary tracks of the models shown in Fig. 31.4

	t (in 10^6 a)	$\lg L/L_{\odot}$	$\lg T_{\text{eff}}$ (K)
$3M_{\odot}$	E 319.95	2.459	3.633
	E' 327.24	1.809	3.692
	F 337.69	1.810	3.692
	G' 409.83	2.012	3.672
$4M_{\odot}$	E 145.71	2.787	3.626
	E' 158.74	2.343	3.674
	F 163.48	2.439	3.695
	G' 176.65	2.437	3.661
$5M_{\odot}$	E 82.62	3.082	3.615
	E' 91.92	2.758	3.654
	F 96.05	2.963	3.739
	G' 98.32	2.816	3.648
$6M_{\odot}$	E 52.97	3.344	3.605
	E' 58.82	3.069	3.640
	F 61.51	3.369	3.886
	G' 63.21	3.138	3.635
$8M_{\odot}$	E 28.82	3.787	3.585
	E' 31.50	3.532	3.617
	F 32.54	3.869	4.024
	G' 34.40	3.739	3.676
$10M_{\odot}$	E 19.09	4.126	3.569
	E' 20.31	3.854	3.603
	F 20.85	4.198	4.125
	G' 22.00	4.165	3.909

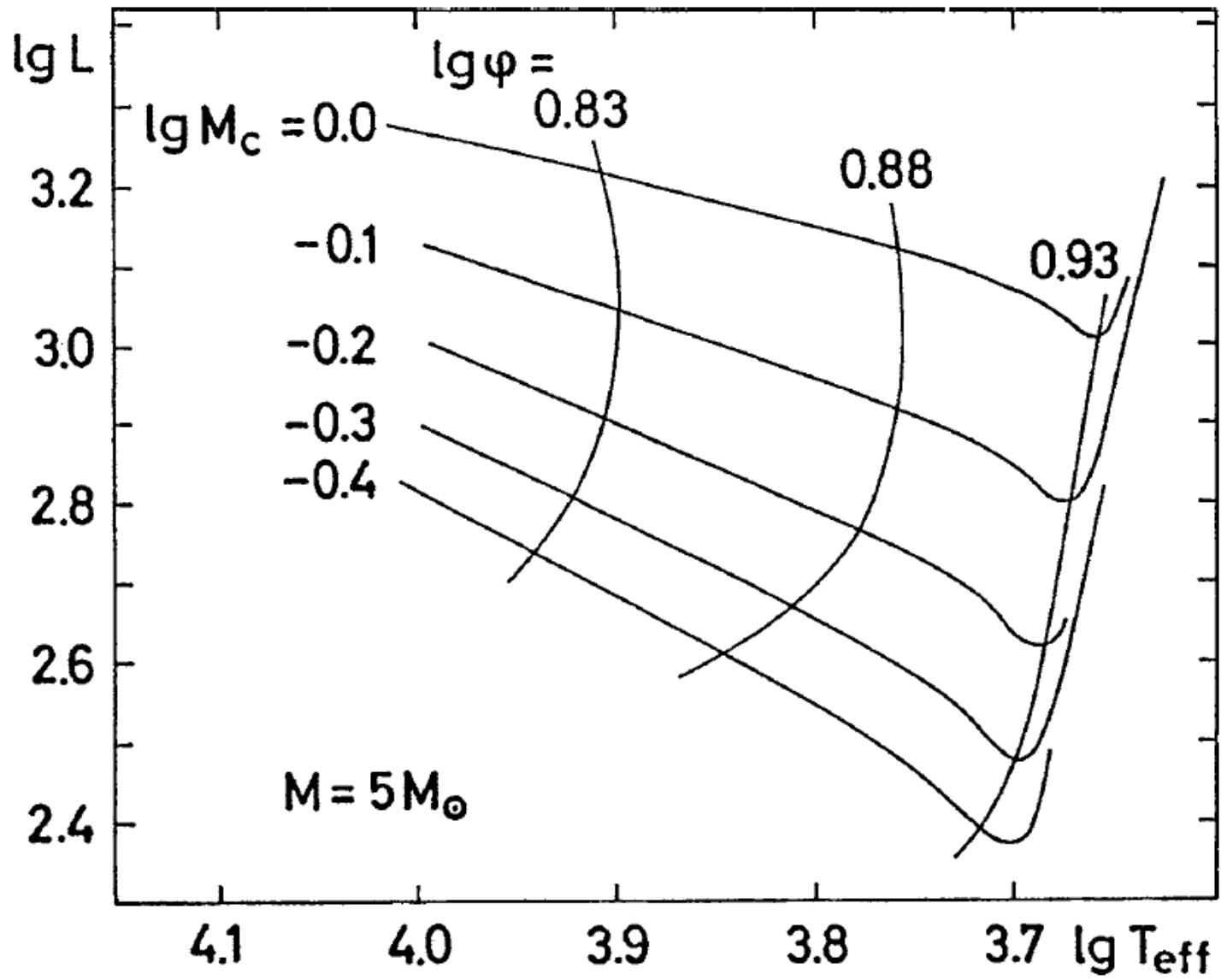
Os "loops"

- ✓ São a parte da trajetória que vai de E a G no slide 6 (e aparece também no slide 13)
- ✓ Ocorrem somente para estrelas de massa maior que $1,3 M_{\text{Sol}}$, com o tamanho do loop dependendo da massa.
- ✓ As estrelas do tipo solar (ou com menos massa) ficam confinadas a subir e descer numa trajetória paralela à linha de Hayashi.
- ✓ Ocorrem durante a fase mais lenta da queima nuclear do He na parte interna do caroço estelar.
- ✓ Queima de He → Gigantes vermelhas!

- ☑ Consequência do processo de queima de He e busca do equilíbrio térmico
- ☑ Para massas intermediárias, os modelos preveem uma separação clara entre o núcleo de He e o envelope de H
- ☑ Processos convectivos podem afetar a “ponta azul” (região mais quente do loop)
- ☑ Soluções produzidas por modelos em equilíbrio completo reproduzem bem os loops.
- ☑ Soluções separadas para envelope e caroço.
- ☑ Posições separadas, mas próximas da linha de Hayashi.
- ☑ Quantificação da proximidade com a linha de Hayashi via um “potencial do caroço”, $\phi = hM_c/R_c$

- ✓ O potencial φ_{crit} define a posição tal que, para $\varphi > \varphi_{\text{crit}}$ as estrelas sobem no diagrama HR, aumentando a luminosidade, praticamente sobre a linha de Hayashi
- ✓ Definimos uma função h , tal que modelos com diferentes perfis mas à mesma distância da linha de Hayashi possuem o mesmo φ .

$$h = e^{\text{const.} \cdot \Delta m \cdot \Delta X}$$
- ✓ Variação de X , devido à queima, muda $\varphi - R_c$ diminui, M_c aumenta \rightarrow desvio da trajetória para a direita do diagrama HR, terminando o loop.





Variáveis Cefeidas

- ✓ Estrelas no ramo das gigantes
- ✓ Localizadas na chamada “faixa de instabilidade”
- ✓ Região estreita (cerca 100 K de largura), quase paralela à linha de Hayashi
- ✓ Variabilidade na luminosidade ocorre devido à forma que o envelope de H reage a pequenas instabilidades → pulsações radiais
- ✓ Fisicamente, o termo de inércia, desprezado na solução da eq. de movimento da SP, passa a ser considerado!

- ✓ Par (L,R) define Π
- ✓ Relação $\Pi - L$ é uma dos padrões básicos de indicadores de distância extragalácticos!!!
- ✓ Relação de variabilidade: $\Pi\sqrt{\bar{\rho}} = const, \bar{\rho} \propto \frac{M}{R^3}$
- ✓ Variação no período pode ser obtida de (1) e da relação L-M

1

$$\frac{d \log \Pi}{dt} = \frac{3}{4} \frac{d \log L}{dt} - 3 \frac{d \log T_{eff}}{dt}$$

2

- ✓ Passagens nos dois sentidos dos loops possuem tempos diferentes, pois possuem processos vibracionais diferentes!
- ✓ Tempos típicos: da ordem de dezenas a centenas de horas
- ✓ Variações da ordem de 10^{-2} s/ano

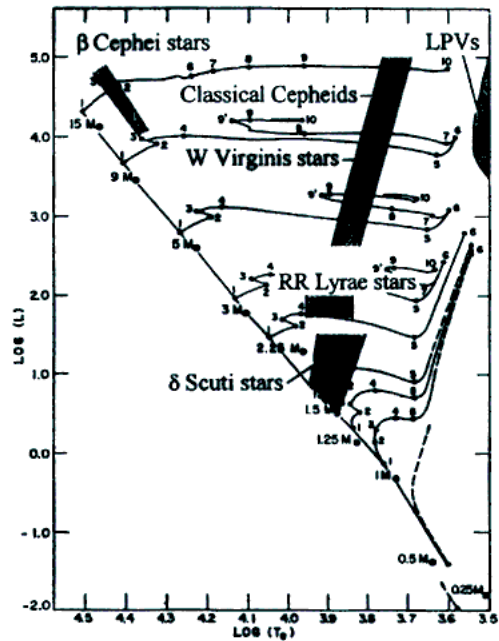
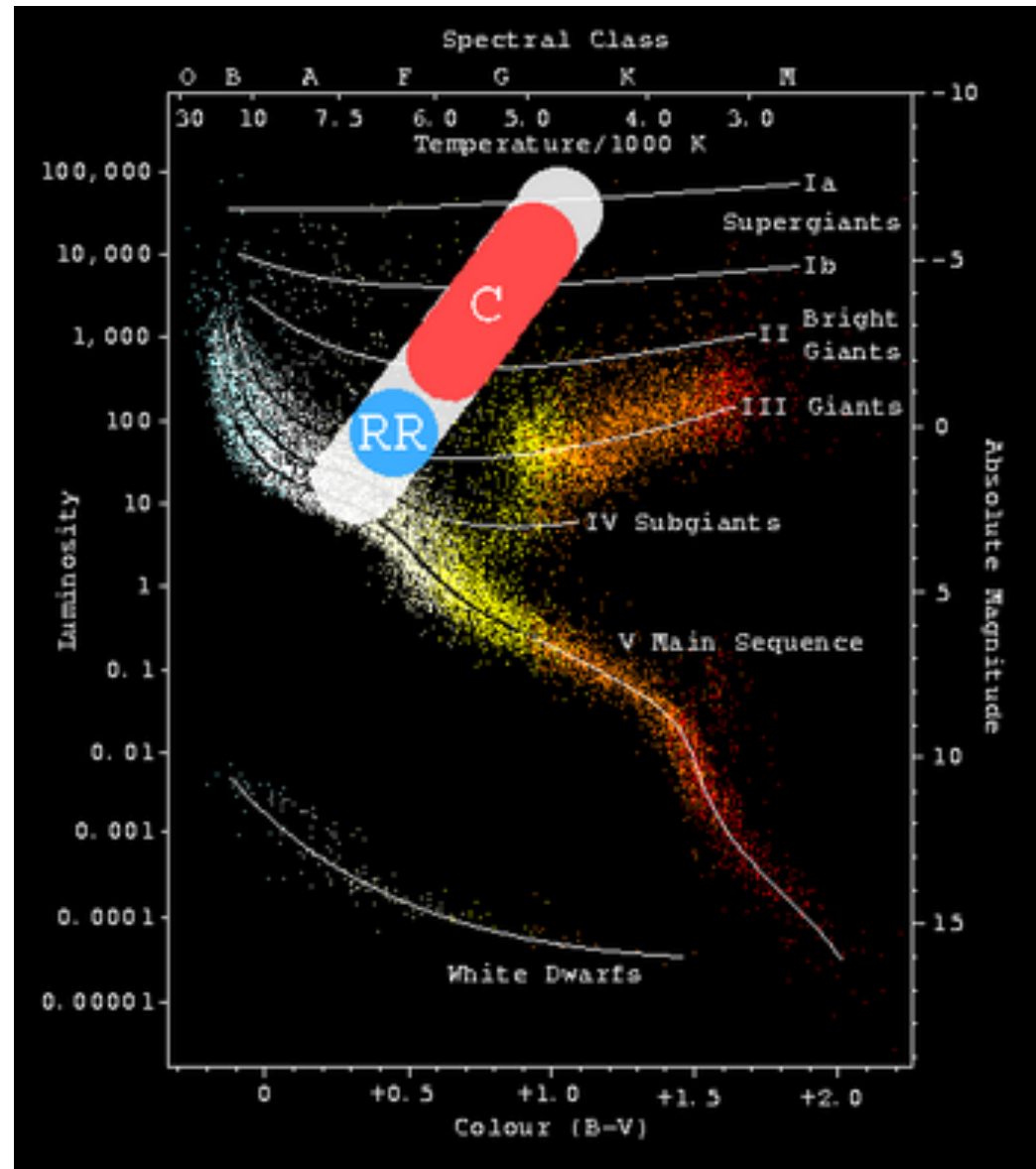
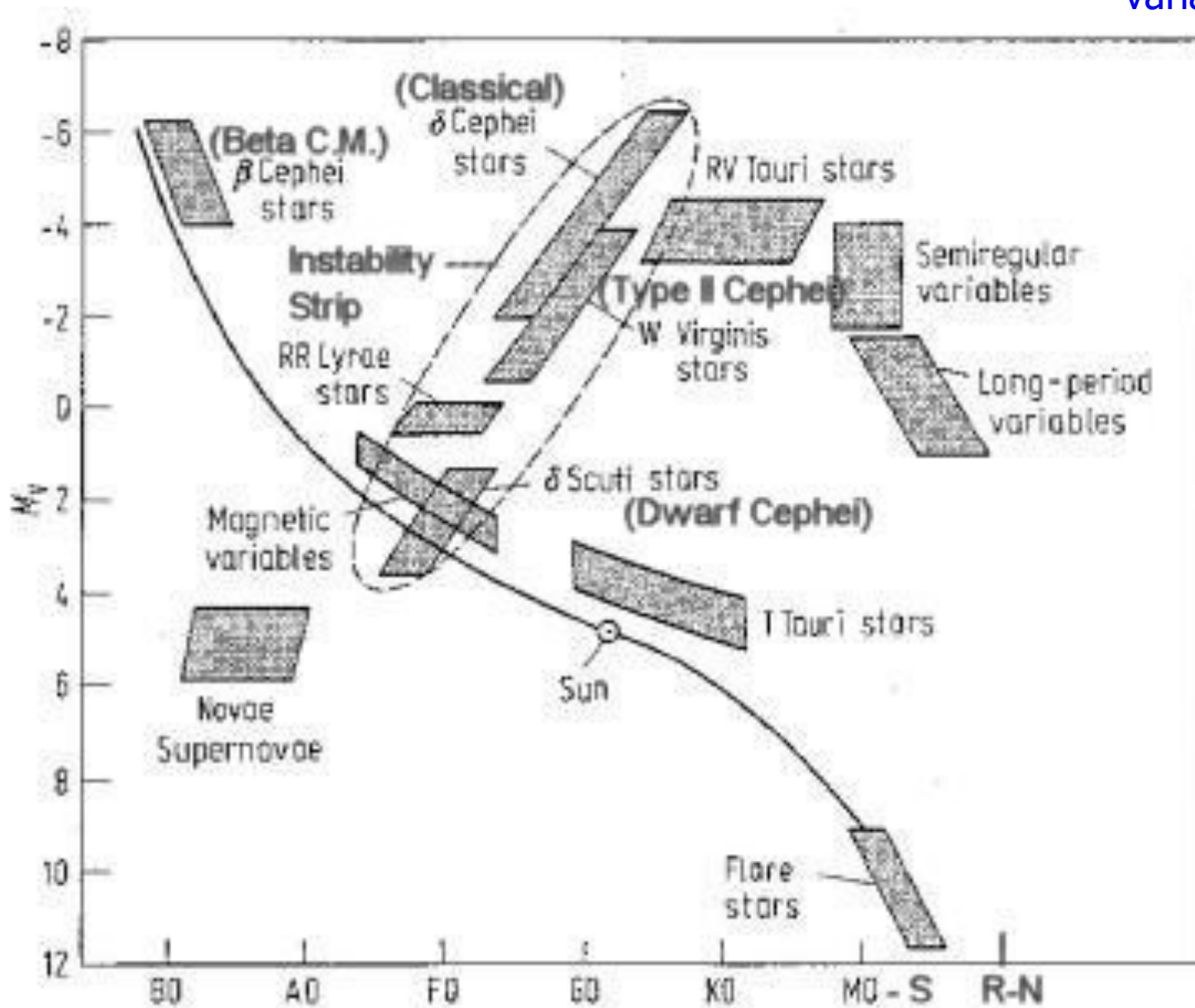


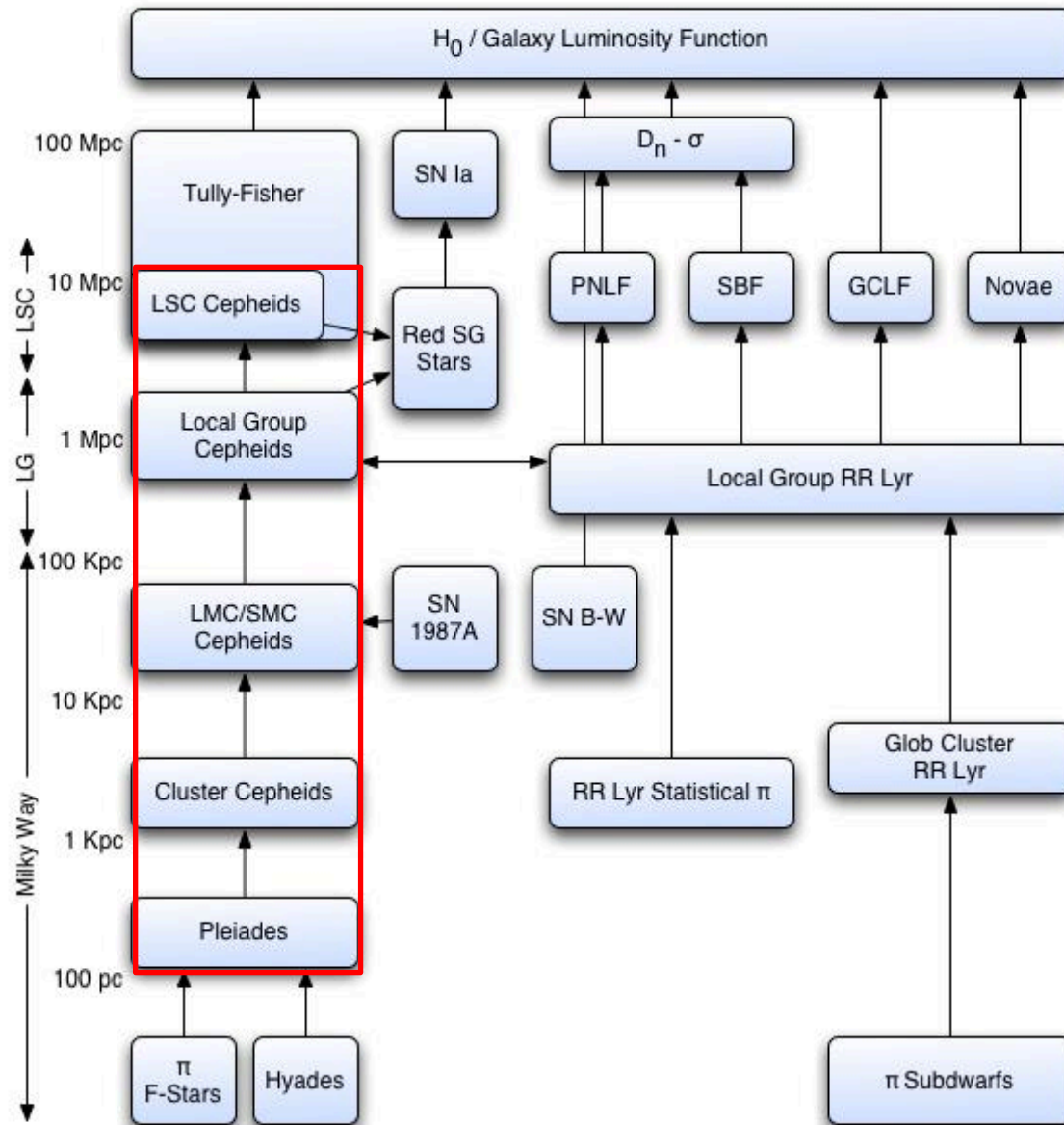
Figure 14.6 Pulsating stars on the H-R diagram. The evolutionary tracks are incomplete, and those of the lower-mass stars extend into the LPV (long-period variable) region. (The evolutionary tracks are from Iben, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 5, 571, 1967. Reproduced with permission from the *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Volume 5, ©1967 by Annual Reviews Inc.)



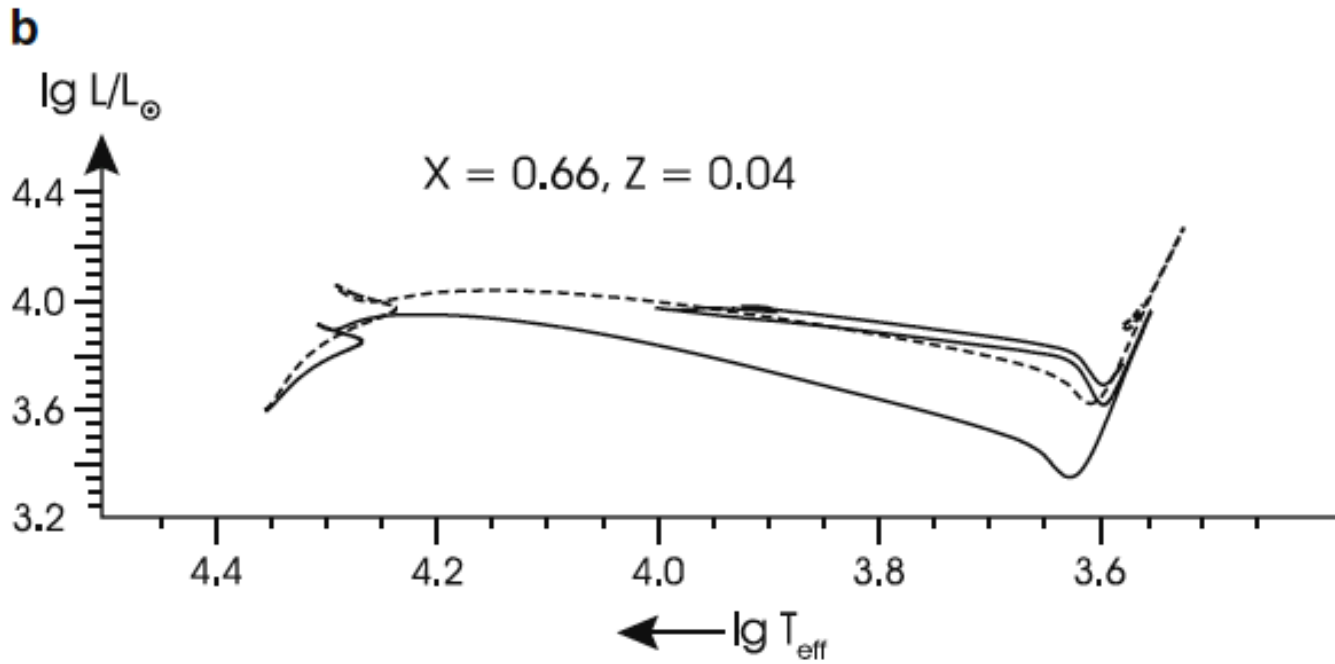
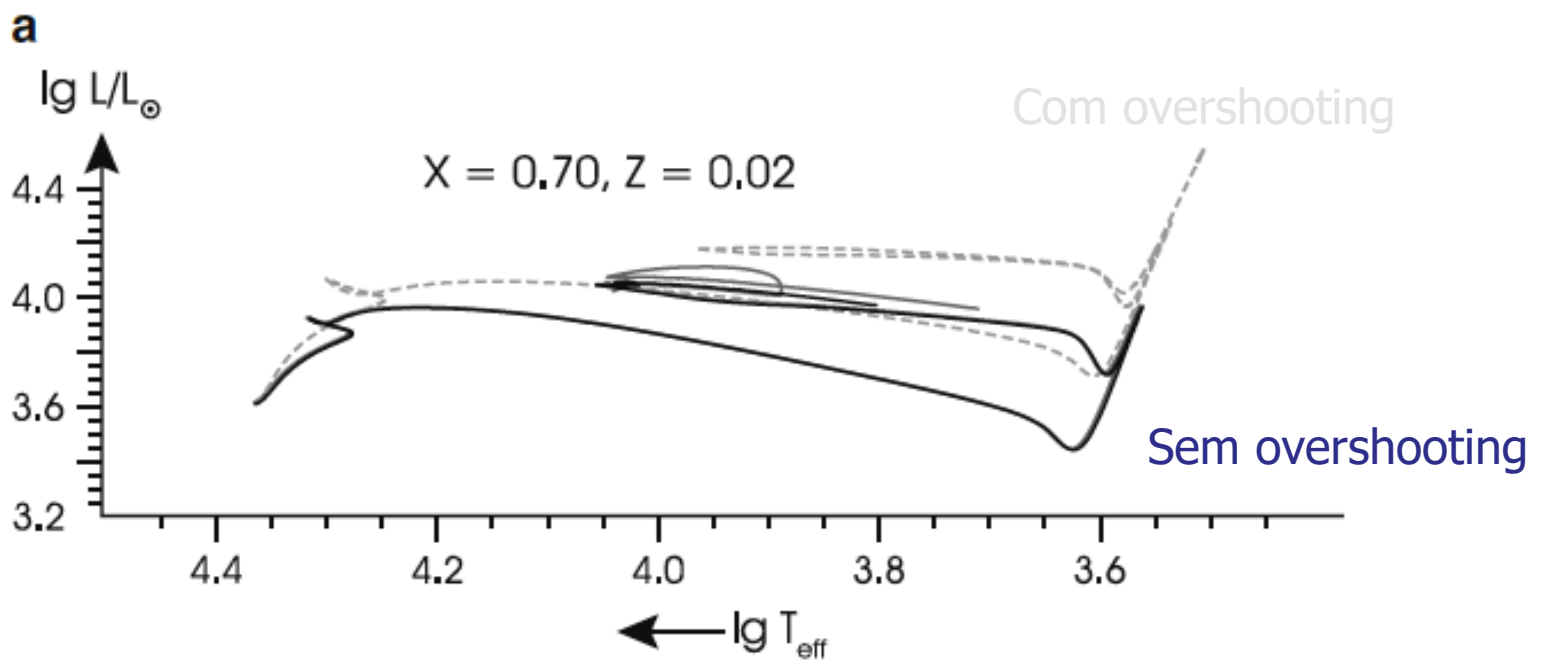


Estrelas variáveis

Type	Period Range	Mag. Range	Spectral Types	Mean Abs. Mag.	Spatial Distribution
Classical Cepheids	2 - 8 d	1	F, G superg.	-3	Dust-filled galactic plane
RR Lyrae	0.1 - 1 d	1	A, F giants	0	Dust-free galactic nucleus
Type II Cepheids (W Vir, RV Tau)	1 - 100 d	1	F-G, G-K	-2	High galactic latitude, halo
Long Period	90 - 600 d	3 - 6	M,S,R,N (em)	-1, 0	Dust-free galactic plane
Semiregular	~ 100 d	1	M,S,R,N	-2	Dust-filled galactic nucleus
Irregular		0.1	M,S,R,N	-2	Dust-filled galactic nucleus
Beta Cepheids (CM)	3 - 6 h	0.1	B	-3	Dust-Filled regions
Dwarf Cepheids	1 - 3 h	0.2 - 1	A - F	+2	Dust-filled regions
Magnetic or Spectrum	0.5 - 1 d	0.1	A	0	
R Coronae Borealis Stars	irrg. (fading)	6	G, K, R (em)	-3	Low galactic lat., carbon stars
Flare Stars	irrg.	6	K, M (em)	+10	Lower main sequence stars
T Tauri Stars	irrg.	1 - 3	G, K - M	+5, +2	Dark clouds of dust & gas



Adapted by Stuart Robbins from: Jacoby et al. *A Critical Review of Selected Techniques for Measuring Extragalactic Distances*. PASP, **104** (1992).

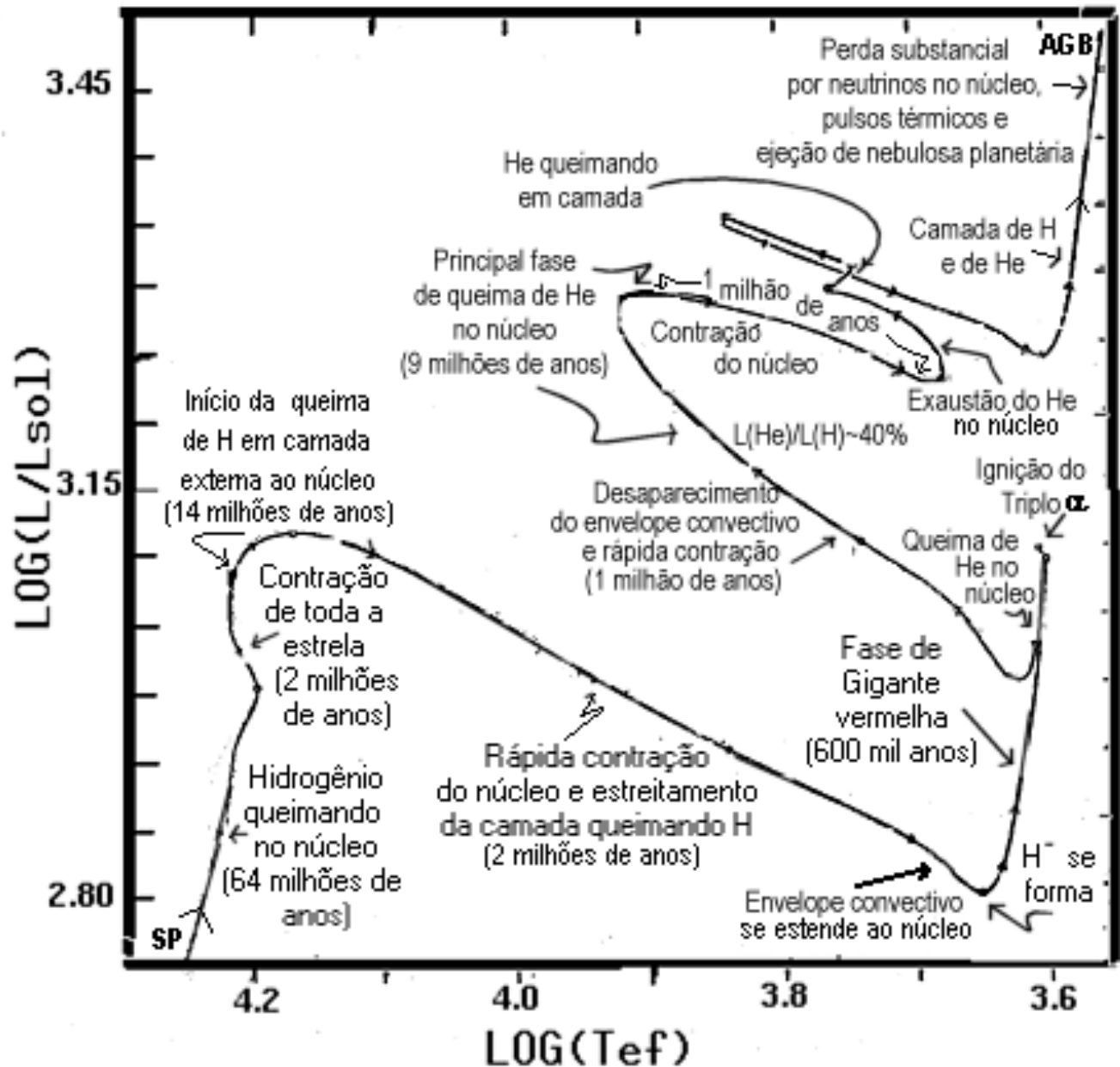




Após a queima de H no núcleo

- ☑ Processamento de ${}^4\text{He}$ em ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$
- ☑ Queima continua em camadas superiores ao núcleo
- ☑ Duas fontes de energia!!
 - ✓ He na camada superior ao núcleo
 - ✓ H na camada externa

Diagrama HR teórico mostrando as diversas fases evolutivas de uma estrela de $5 M_{\text{sol}}$ (Icko Iben Jr.)



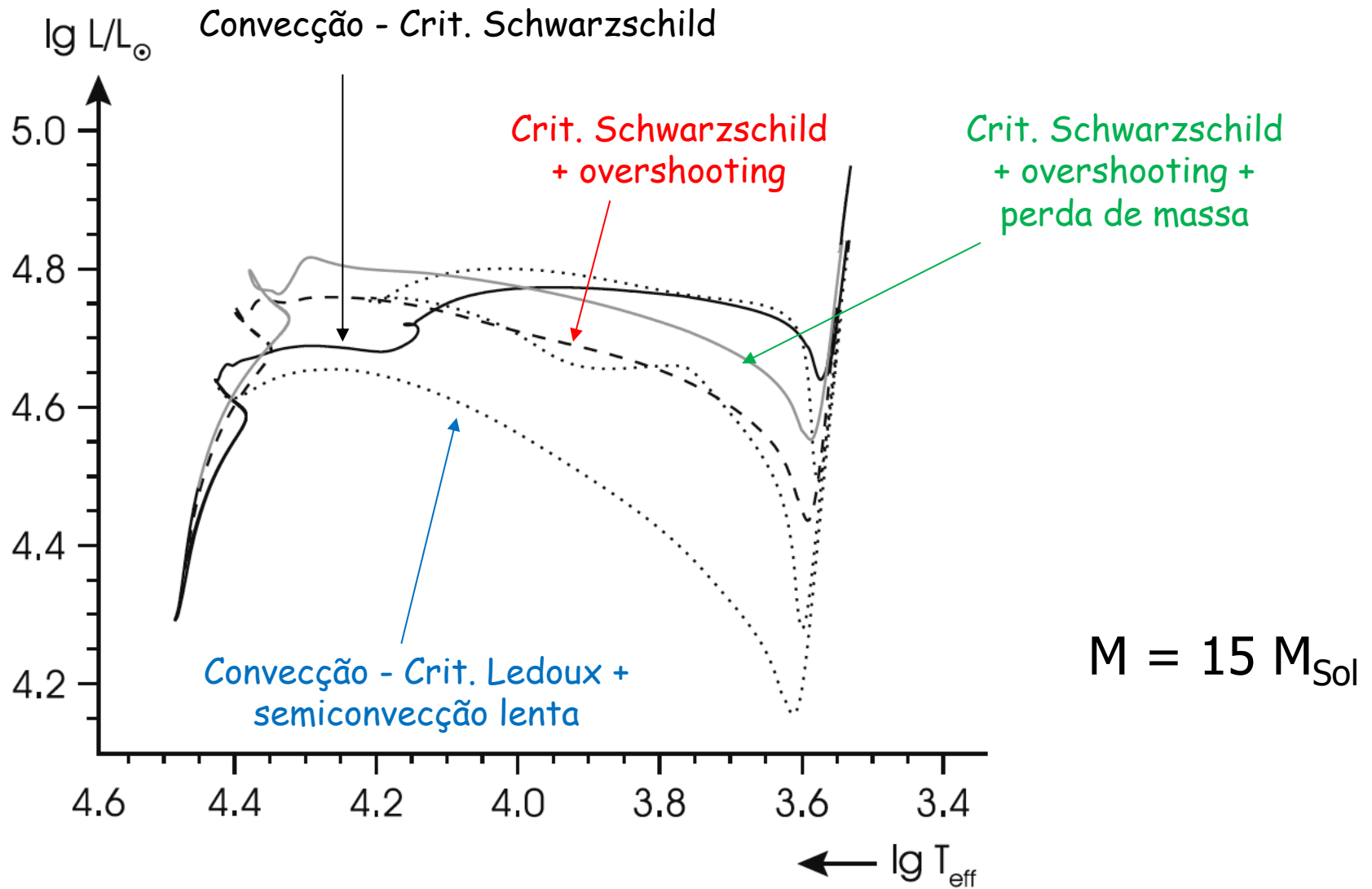


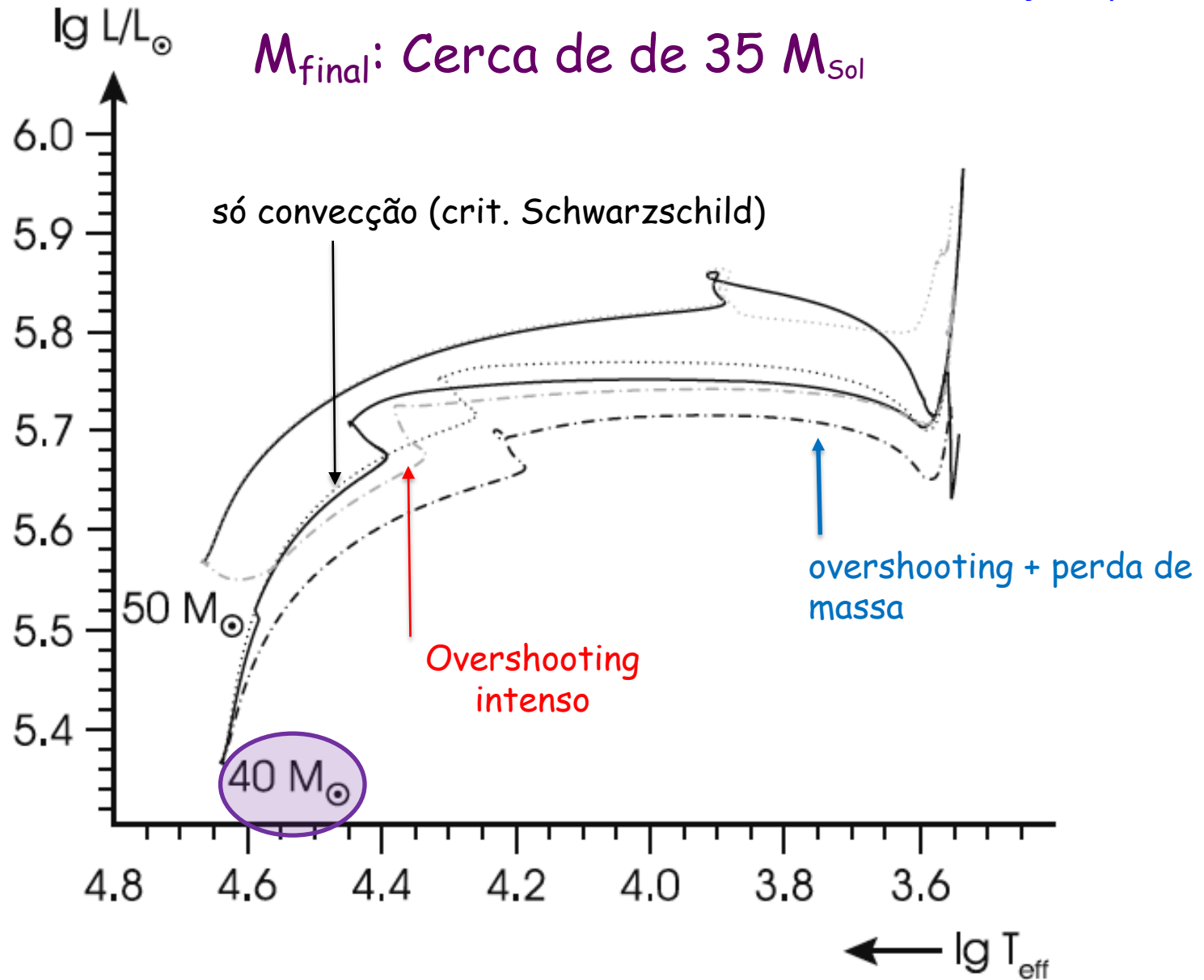
Estrelas massivas

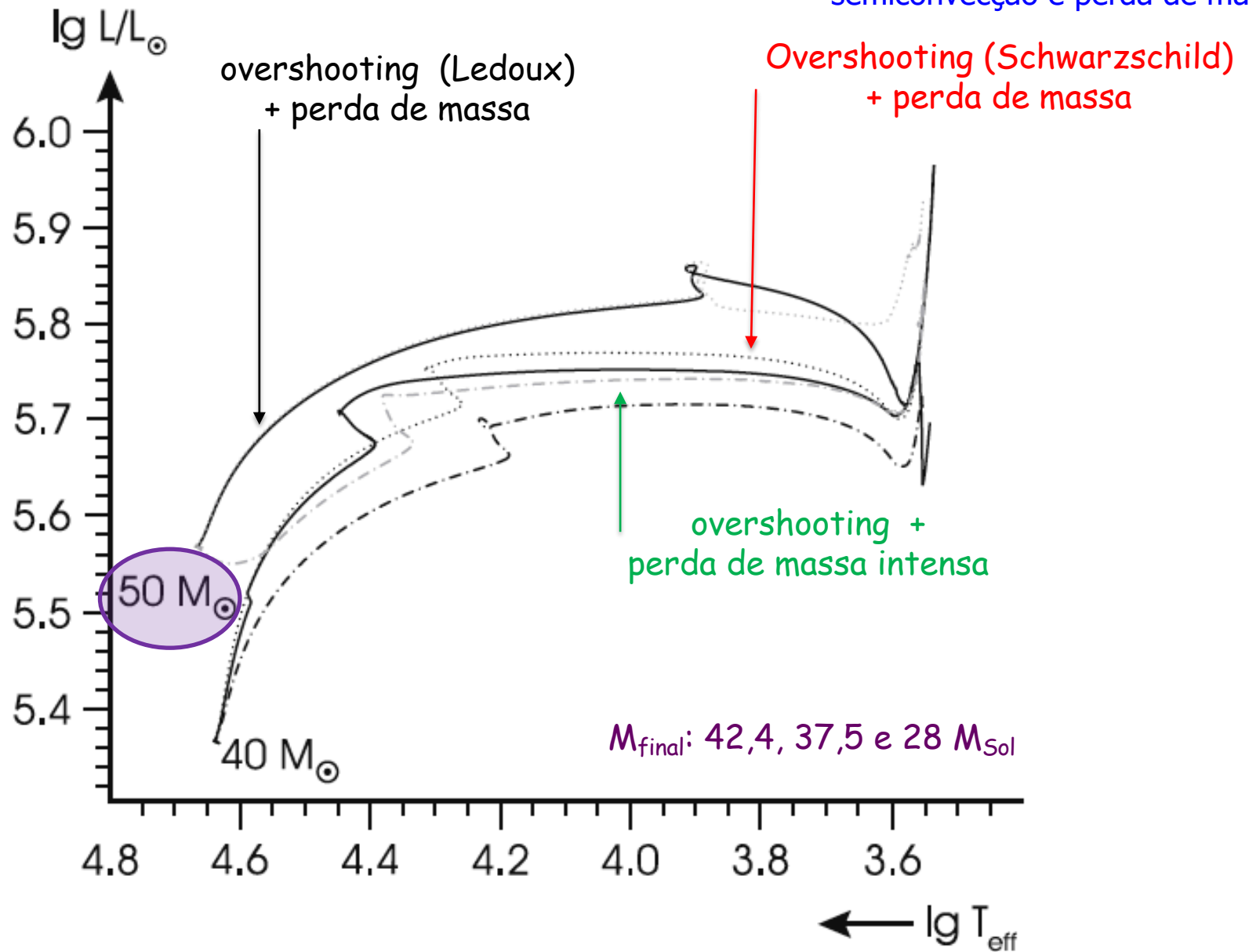
Estrelas massivas

- ☑ O processo de perda de massa influencia significativamente a evolução durante a queima de He e nas etapas posteriores.
- ☑ Estrelas Wolf-Rayet: estrelas em que as partes mais internas são expostas, mostrando a composição química modificada na superfície (que corresponderia a alguma camada interna)
- ☑ Rotação também altera significativamente o processo de mistura no interior estelar

- ☑ O tratamento da convecção (e suas variações) afetam significativamente a evolução pós-SP
- ☑ Principais fenômenos que requerem modelagem mais precisa
 - ✓ Semi-convecção
 - ✓ Overshooting (mais importante quanto maior a massa)
 - ✓ Perda de massa
 - pressão de radiação intensa e envelopes de pequena densidade causada por ventos estelares => ejeção de matéria









- ☑ Tempos típicos para perda de massa: $\sim 10^{-6} M_{\text{Sol}}/\text{ano}$
- ☑ Esse processo de perda de massa é mais relevante durante a fase na SP



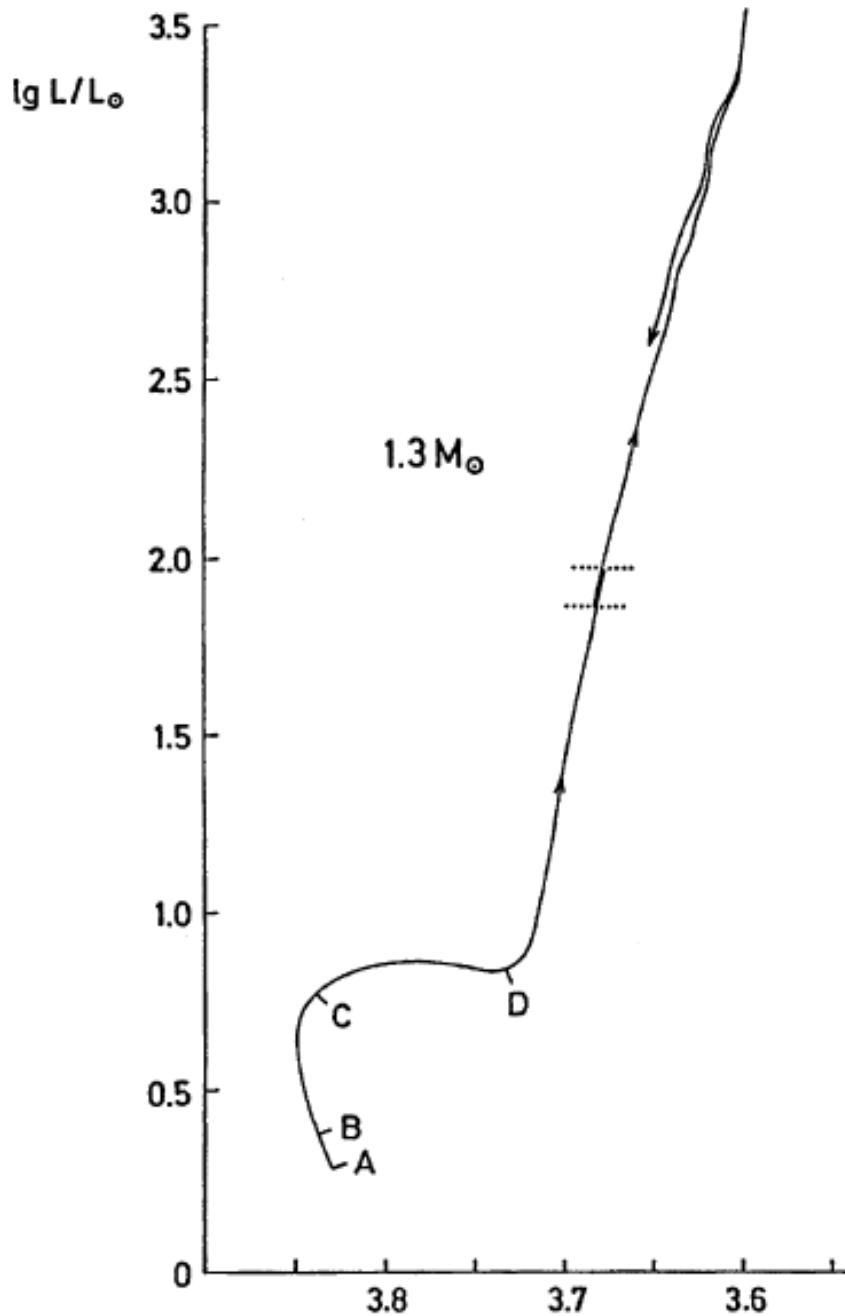
Estrelas de pequena massa

- ☑ Estrelas com massas $M/M_{\text{Sol}} < 1,3$
 - ✓ Núcleos radiativos impedem misturas eficientes
 - ✓ Pressão externa torna o **núcleo degenerado** após o final da queima de H
 - ✓ Não existe margem (devido à alta densidade) para a instabilidade causada pelo limite de S-C (o intervalo de Hertzsprung não acontece)
 - ✓ Estrelas conseguem manter o equilíbrio térmico mesmo na presença de um núcleo degenerado (contração posterior não gera aquecimento!)



O Ramo das Gigantes Vermelhas

- ☑ Todas as estrelas que saem da SP passarão pela fase de gigantes vermelhas, independente de suas massas.
- ☑ Luminosidade mantida pela queima de H na camada externa ao núcleo.
- ☑ Contração do núcleo isotérmico, já que não há mais reações nucleares.
- ☑ Estrelas de baixa massa saem verticalmente, e estrelas massivas saem horizontalmente (trajetória também é função da massa).



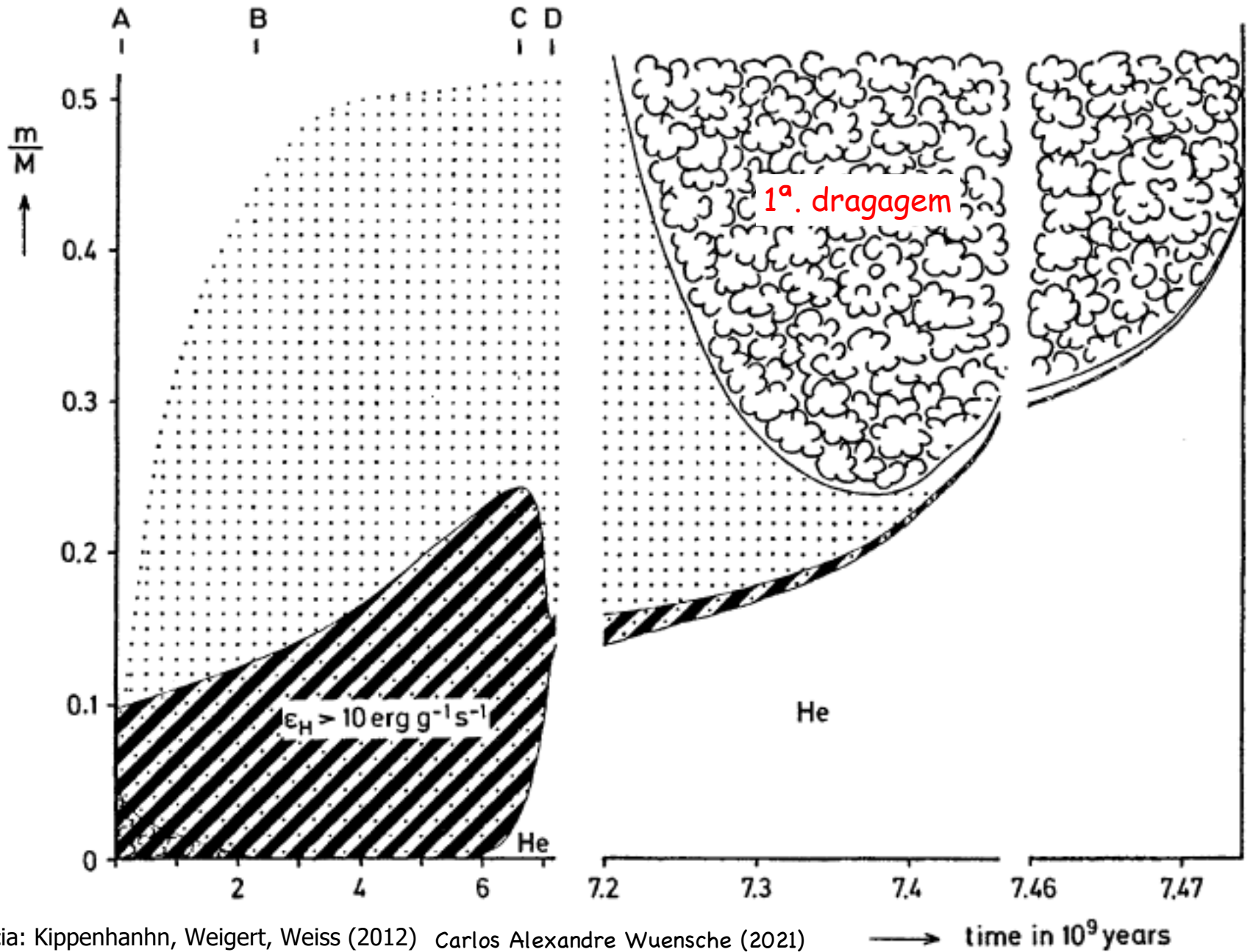
Trajétória de uma estrela
 com 1,3 M_{Sol}

$$X_{\text{H}} = 0,9$$

$$X_{\text{He}} = 0,099$$

$$Z = X_{\text{H}} - X_{\text{He}} - 1 = 0,001$$

- O sentido evolutivo reverte por curto período de tempo entre as linhas tracejadas horizontais.



Flash do He

☑ Condições prévias

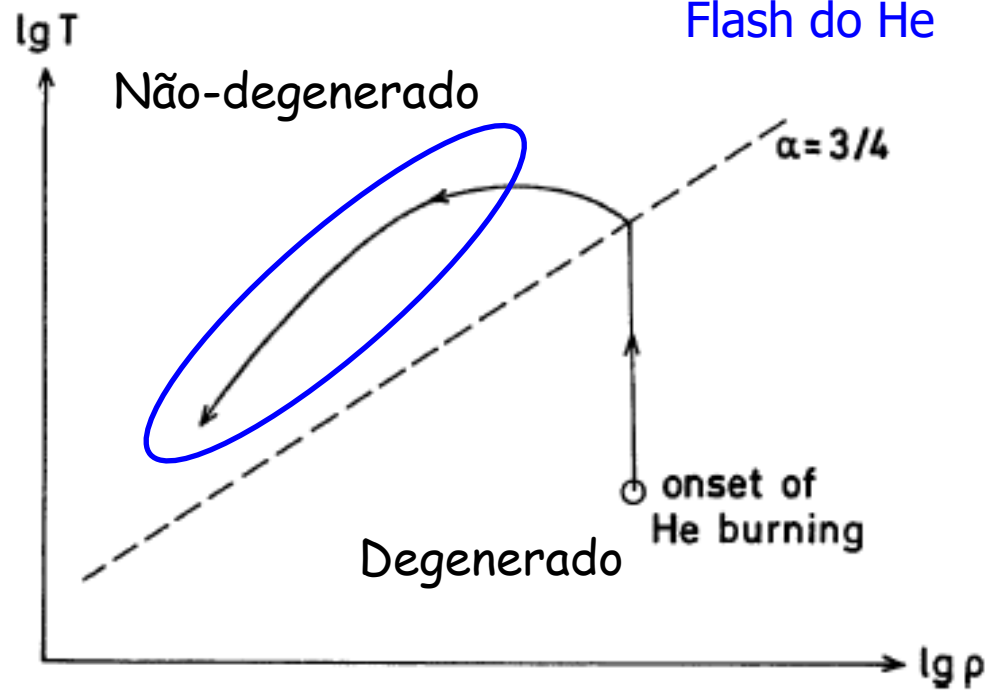
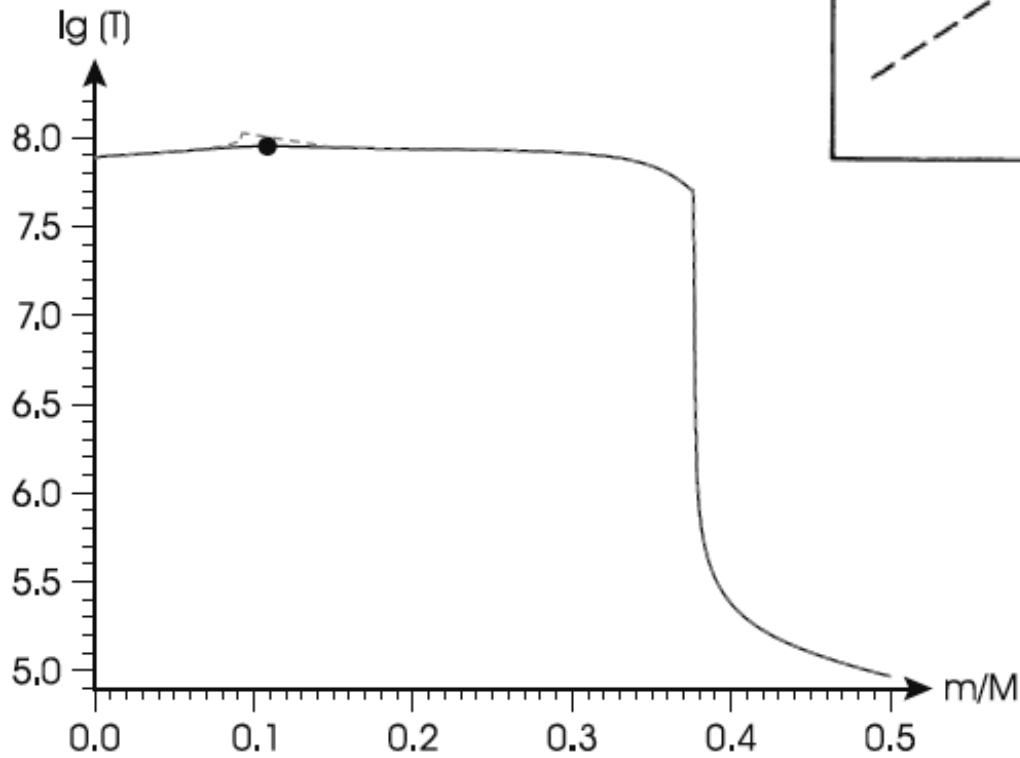
- ✓ mudança do locus de queima nuclear do centro para a camada externa ao núcleo (somente H)
- ✓ Núcleo inerte de He
- ✓ Subida no ramo das gigantes (paralelo a linha de Hayashi), com correspondente aumento de luminosidade, devido ao aumento da quantidade de He (lembrar que $L \propto \mu$)
- ✓ Convecção no envelope altera a distribuição química - primeira dragagem ("dredge-up").

- ✓ Pequena descontinuidade no peso molecular causa uma interrupção no aumento contínuo de luminosidade (núcleo de He, envelope de H – gap na figura do slide 43).
- ✓ Ignição causada pela deposição de matéria sobre o núcleo degenerado de He inerte (aumento de temperatura).
- ✓ Um gradiente de temperatura é gerado na direção do centro

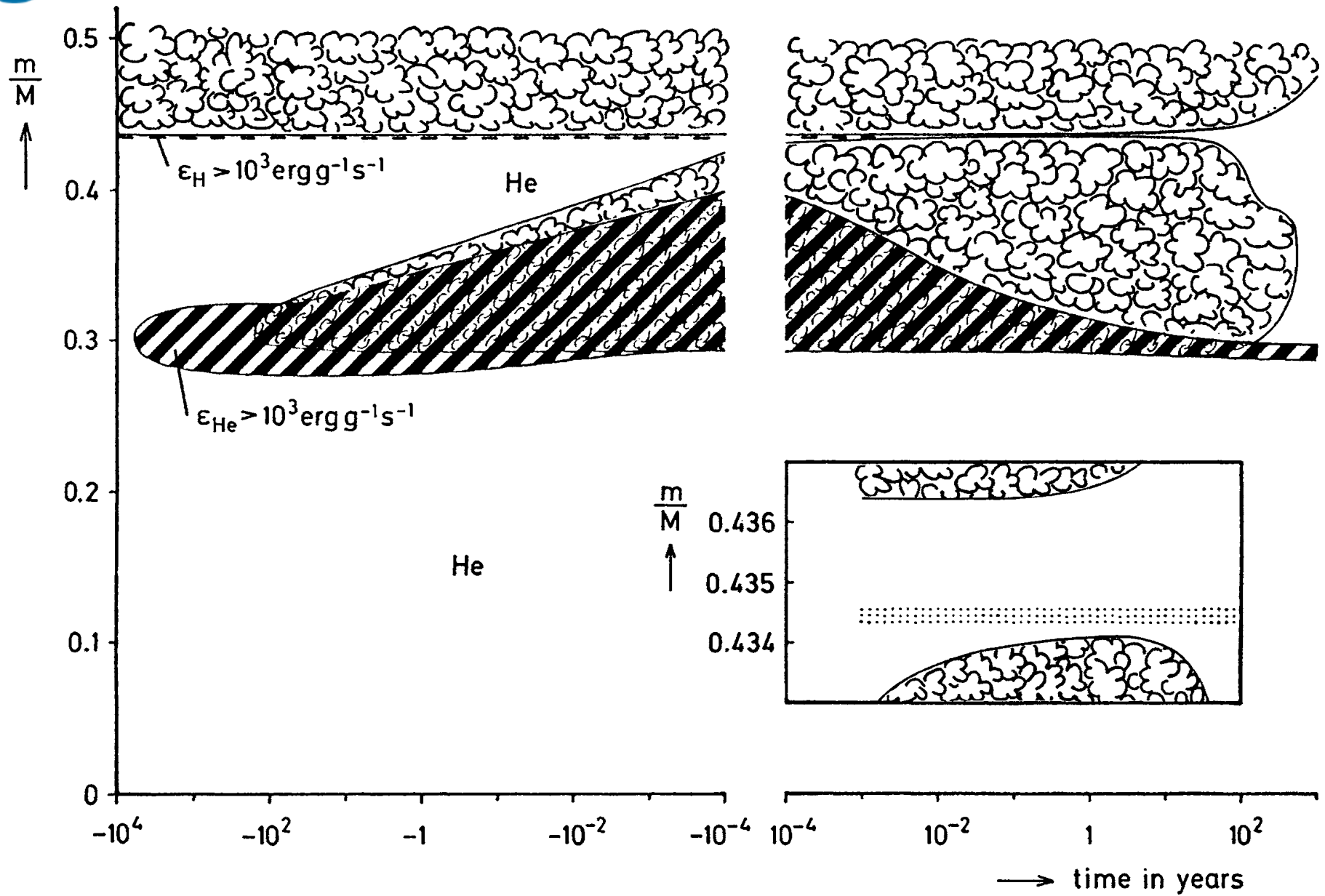
$$L \propto dM_c/dt$$

3

- ✓ A perda de neutrinos resfria o núcleo e aumenta o ∇
- ✓ Variação de L e aumento de ∇ por perda de neutrinos realimenta o processo, que torna-se instável
- ✓ Quando $T \sim 10^8$ K ($M_c \approx 0,48 M_{\text{Sol}}$) ocorre um “thermal runaway” => **FLASH DO HE**



- ☑ O processo:
 - ✓ aumento de temperatura no núcleo degenerado ($W = -p.dV = 0$, já que não há expansão do núcleo degenerado)
 - ✓ Toda a energia produzida na reação nuclear é armazenada como energia interna do sistema
 - ✓ Durante o flash, a energia produzida gera uma luminosidade equivalente a $10^{11} L_{\text{Sol}}$ (luminosidade de uma galáxia!!!!!!!) durante alguns segundos...
 - ✓ Não visível na superfície, porque a energia gerada durante o "thermal runaway" é convertida para a expansão da matéria degenerada
 - ✓ Consequência: remoção da degenescência, expansão do núcleo e resfriamento interno.
 - ✓ Não se sabe se há ejeção de matéria na superfície durante o flash do He
 - ✓ Início do processo 3- α (queima controlada). A estrela "desce" do ramo das gigantes vermelhas, indo para o ramo horizontal.





Após o Flash do He

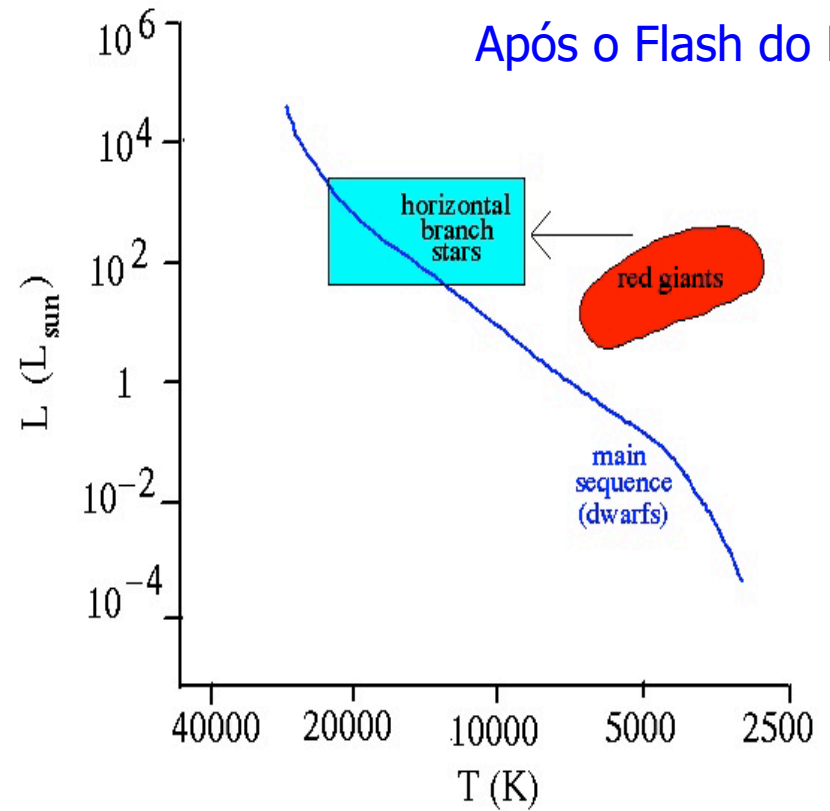
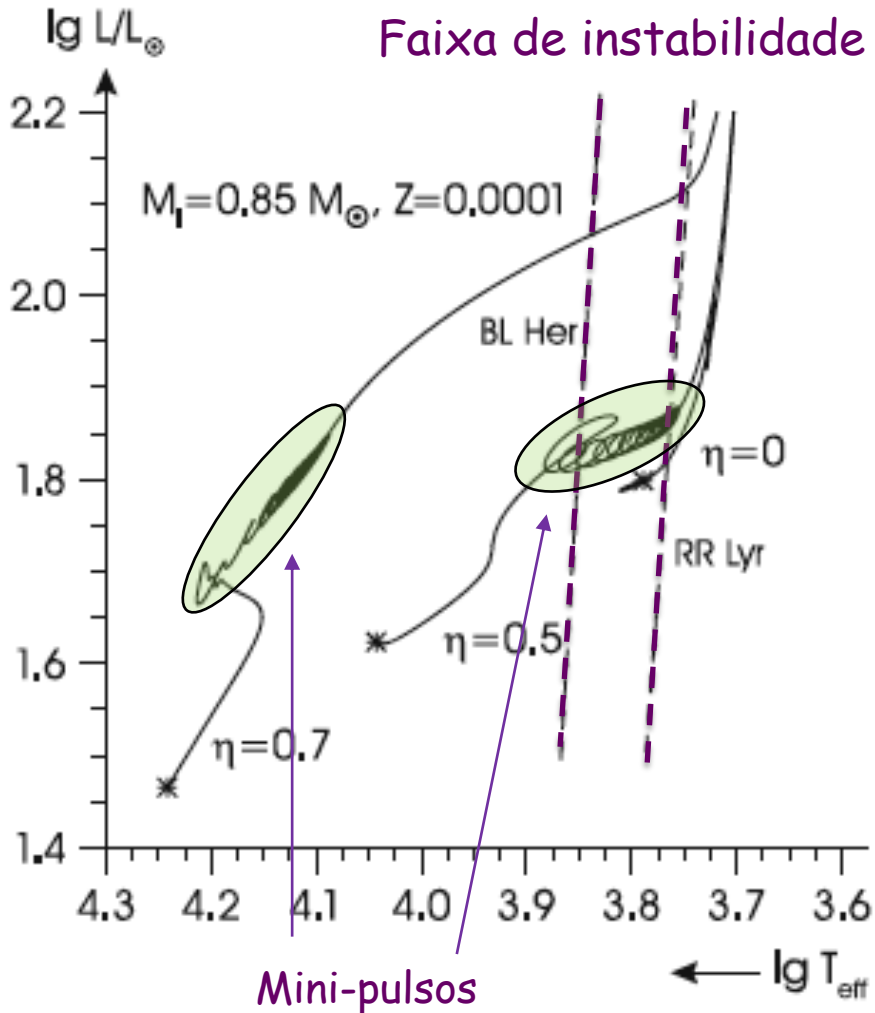
- ☑ Fase comportada, com a geração de energia alimentada pelo ciclo 3- α , consumindo o He agora não mais degenerado.
- ☑ Fase não coberta adequadamente pelos modelos de evolução estelar.
- ☑ Massa do núcleo após o flash (independente da massa total): $0,45 M_{\text{Sol}}$.
- ☑ Próximo passo: o Ramo Horizontal (HB)

Ramo Horizontal

- ✓ Após o flash do He, a estrela realiza fusão do He no núcleo e fusão do H numa casca em volta do núcleo.
- ✓ O núcleo da estrela produz C e O, a temperatura superficial cresce e a estrela desloca-se para o ramo horizontal.
- ✓ Estrelas com $M \geq 1,3 M_{\text{Sol}}$ encolhem e esquentam, com luminosidade constante, Elas “chegam” no **Ramo Horizontal (RH) movendo-se para esquerda e para baixo no diagrama HR**
- ✓ Pode-se entender o ramo horizontal em termos de **perda de massa** durante o flash do He (linha sólida) ou em **termos evolutivos** (existiria então um RHIZ).
- ✓ Ao entrar no RH, estrelas tem, tipicamente, um núcleo de He não-degenerado de massa $M_c = 0,45 - 0,5 M_{\text{Sol}}$, e um envelope de H com massa $M_H = M - M_c$

- ☑ Convecção (semi-convecção e overshooting) continuam sendo um elemento importante na homogeneização química estelar durante a etapa no Ramo Horizontal
 - ✓ no interior do caroço convectivo, distribuindo C e O homogeneamente no interior
 - ✓ Em regiões externas ao núcleo, com o transporte de C e O, a opacidade aumenta
- ☑ A queima de He no núcleo convectivo gera uma região de C e O
- ☑ Após a interrupção da queima de He no centro, ela continua na casca externa ao caroço, que não foi totalmente processada.
- ☑ As reações nucleares continuam na borda do núcleo de C, O inerte (queima de He) e na borda do núcleo de He inerte (queima de H)

Efeito da perda de massa pré flash do He ($\eta=0$, sem perda)



$$\dot{M}_R = -4 \times 10^{-13} \eta \left(\frac{L}{gR} \right) \left(\frac{g_{\odot} R_{\odot}}{L_{\odot}} \right)$$

Massas finais

- $0,85 M_{\text{Sol}} (\eta=0)$
- $0,66 M_{\text{Sol}} (\eta=0,5)$
- $0,56 M_{\text{Sol}} (\eta=0,7)$



Evolução após o Ramo Horizontal

- ✓ Após a exaustão do He no núcleo, uma camada com queima de He desenvolve-se na borda do núcleo (embaixo da camada de queima de H)
- ✓ A maior parte da energia ainda vem da camada de queima de H.
- ✓ Entretanto, a camada de H vai depositando o He produzido na camada inferior. Após algum tempo acumula-se He suficiente para haver um evento explosivo ali.
- ✓ O envelope da estrela desenvolve um vento que ejeta as camadas externas.
- ✓ Trajetória evolutiva para o **Ramo Assintótico das Gigantes**
- ✓ Envelopes convectivos transportam os elementos produzidos no núcleo até sua superfície.
- ✓ O aprofundamento do envelope convectivo leva a borda contendo H para perto do centro, em que $T \sim 2 \times 10^8$ K, causando um novo início de queima de H na base do envelope.



O Ramo Assintótico das Gigantes (AGB)

- ☑ Diferenças grandes são encontradas nos modelos quando são incluídas perda de massa e variações na composição química
- ☑ Não confundir com o **Ramo das Gigantes Vermelhas**
 - ✓ RGV => antes da queima de He no núcleo (movimento ascendente no diagrama HR)
 - ✓ RAG => após a queima de He no núcleo (movimento ascendente no diagrama HR)
- ☑ Região de instabilidade interna:
 - ✓ Variabilidade em L (BL Her, W Virginis, Cefeidas II)
 - ✓ duas cascas (instabilidade) => **série longa de pulsos térmicos**

- ☑ Luminosidade é determinada somente pela massa do caroço, independente de sua massa total
- ☑ Vento estelar intenso aparece, devido à enorme pressão do envelope radiativo => PERDA DE MASSA!
- ☑ Quanto mais avançados os estágios evolutivos, menos tratáveis analiticamente são os modelos
- ☑ Alguns dos processos físicos nessa fase são pouco conhecidos e se somam à semi-convecção e ao overshooting
- ☑ Região pós queima de He no núcleo!!!

- ☑ Luminosidade é determinada somente pela massa do caroço, independente de sua massa total
- ☑ Vento estelar intenso aparece, devido à alta pressão do envelope radiativo
- ☑ Quanto mais avançados os modelos, menos tratáveis analiticam
- ☑ Alguns dos processos nessa fase são pouco conhecidos
- ☑ overshooting semi-convecção e ao
- ☑ **Reação de He no núcleo!!!**

Pulsos: fenômeno essencialmente causado por processos no envelope, não influenciando em nada os processos no caroço

MASSA!

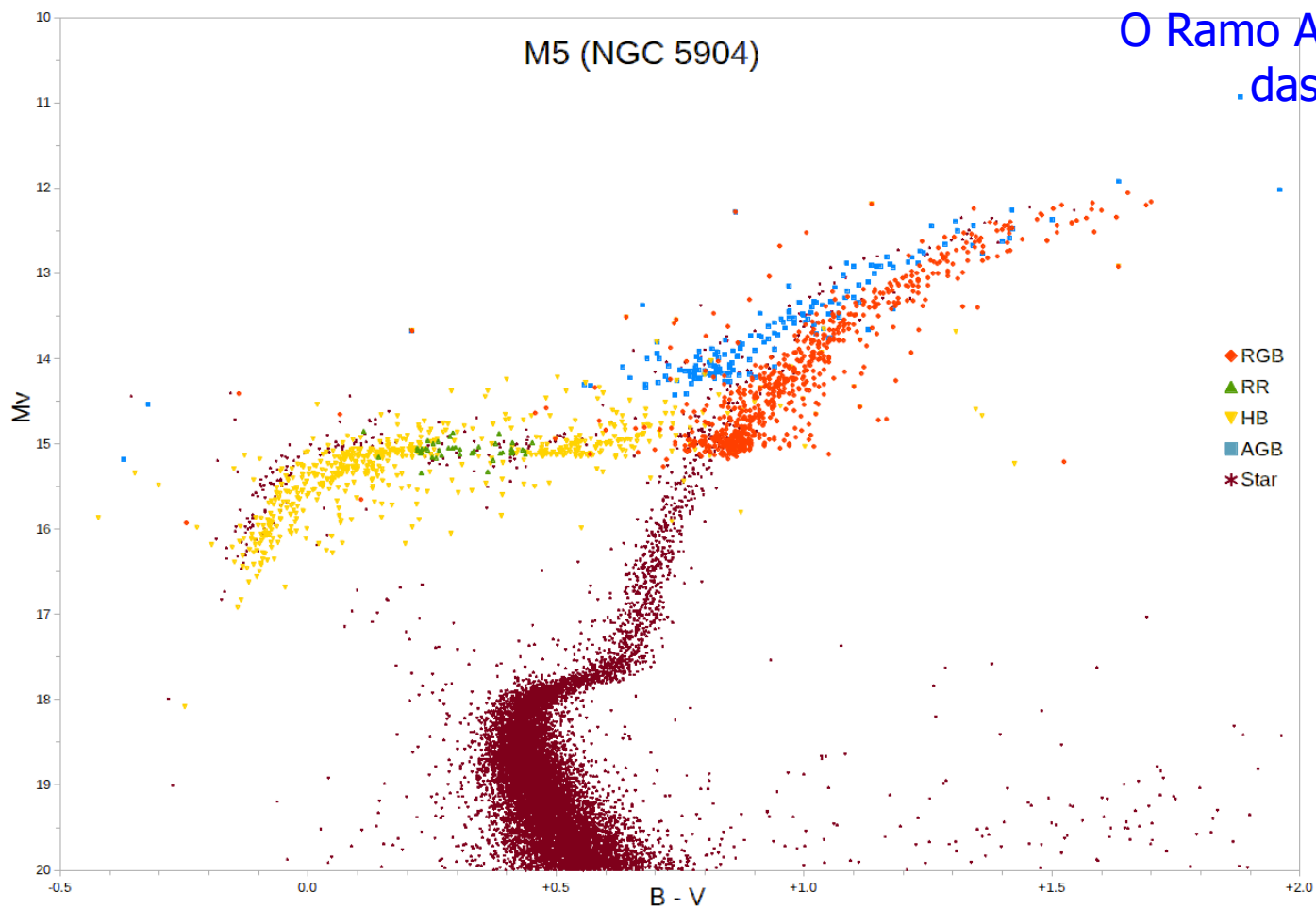
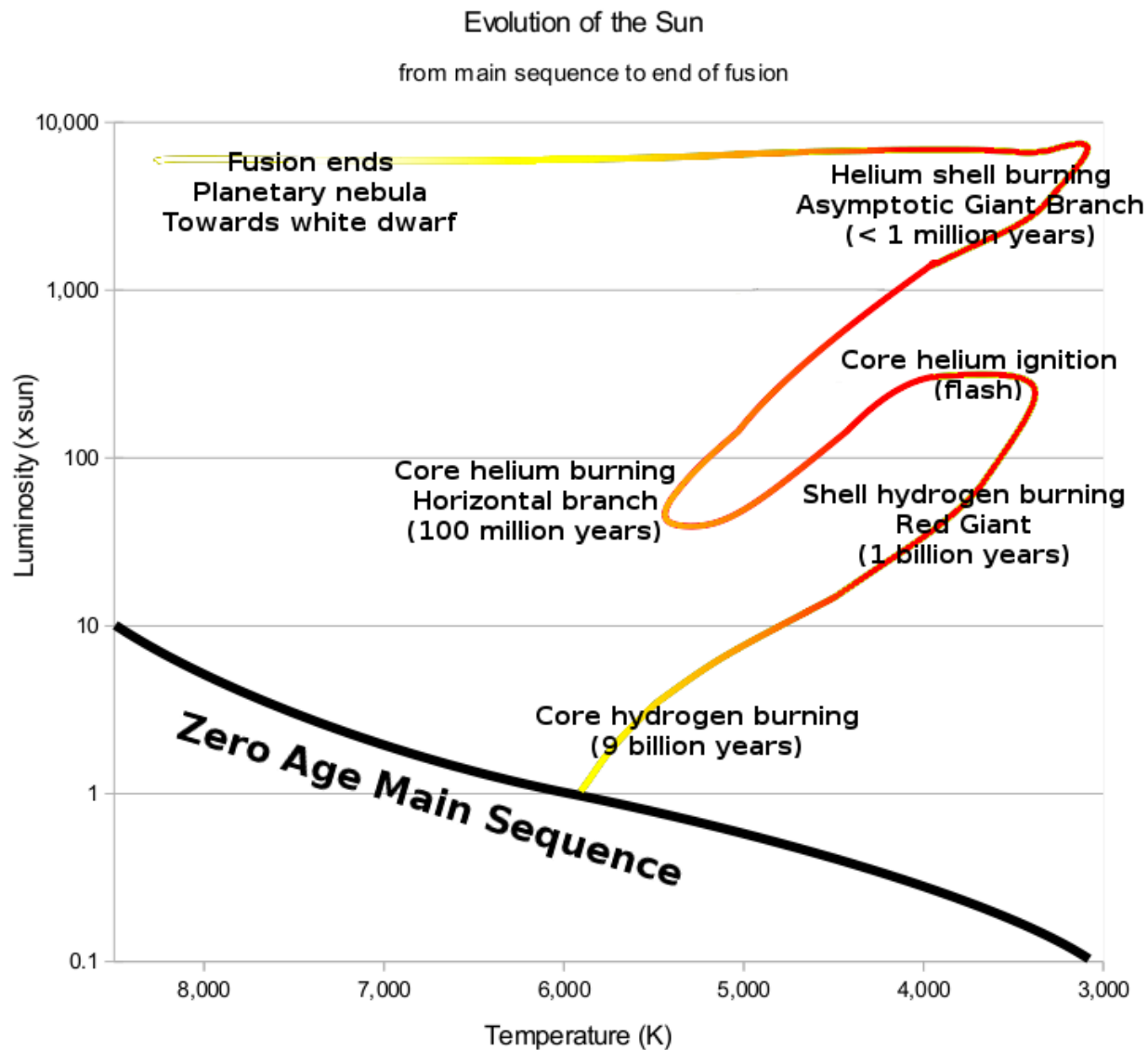
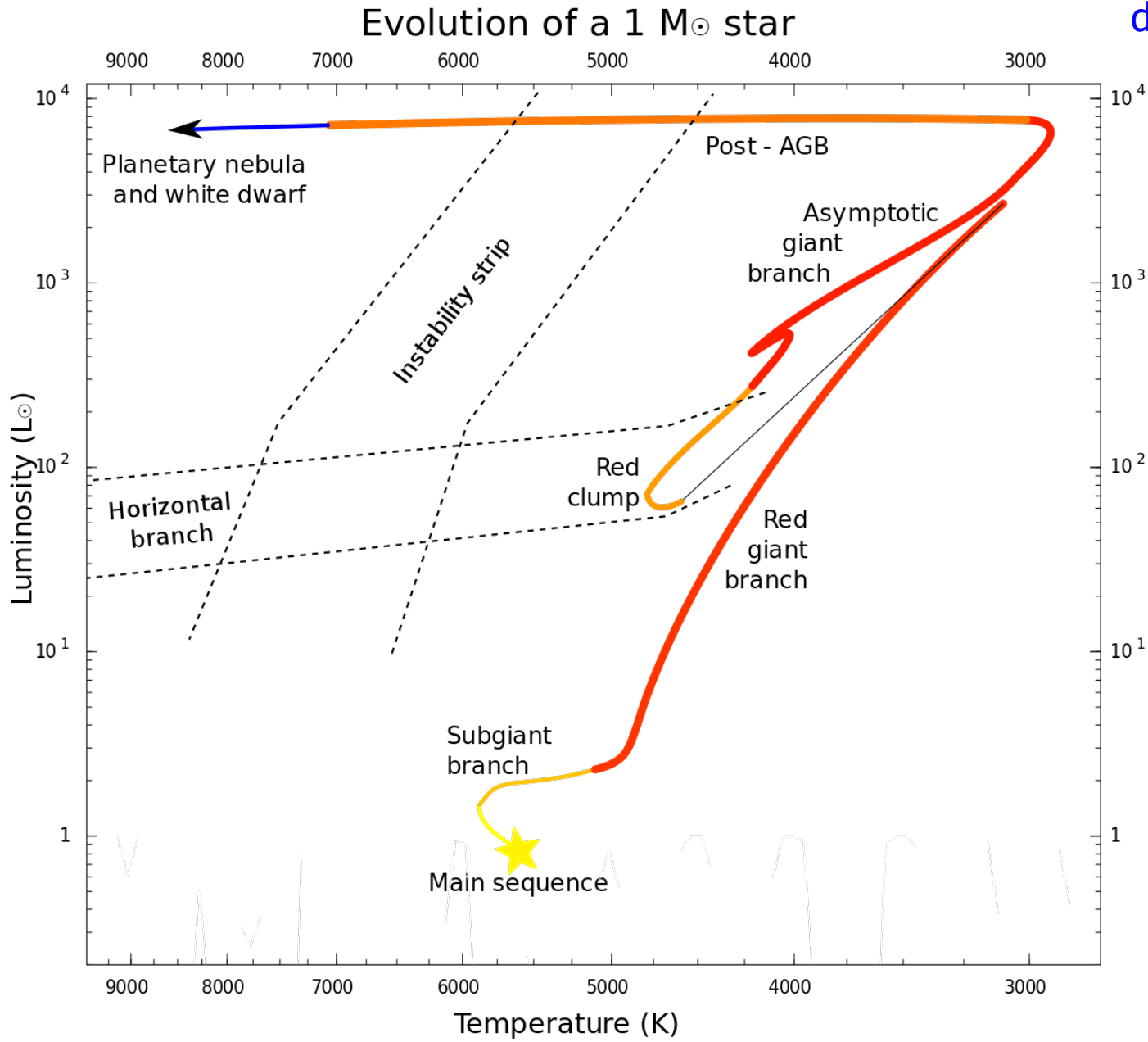


Diagrama H - R para o aglomerado globular M5, com estrelas AGB conhecidas marcadas a azul, ladeadas por algumas das estrelas do ramo vermelho-gigante mais luminosas, mostradas em laranja

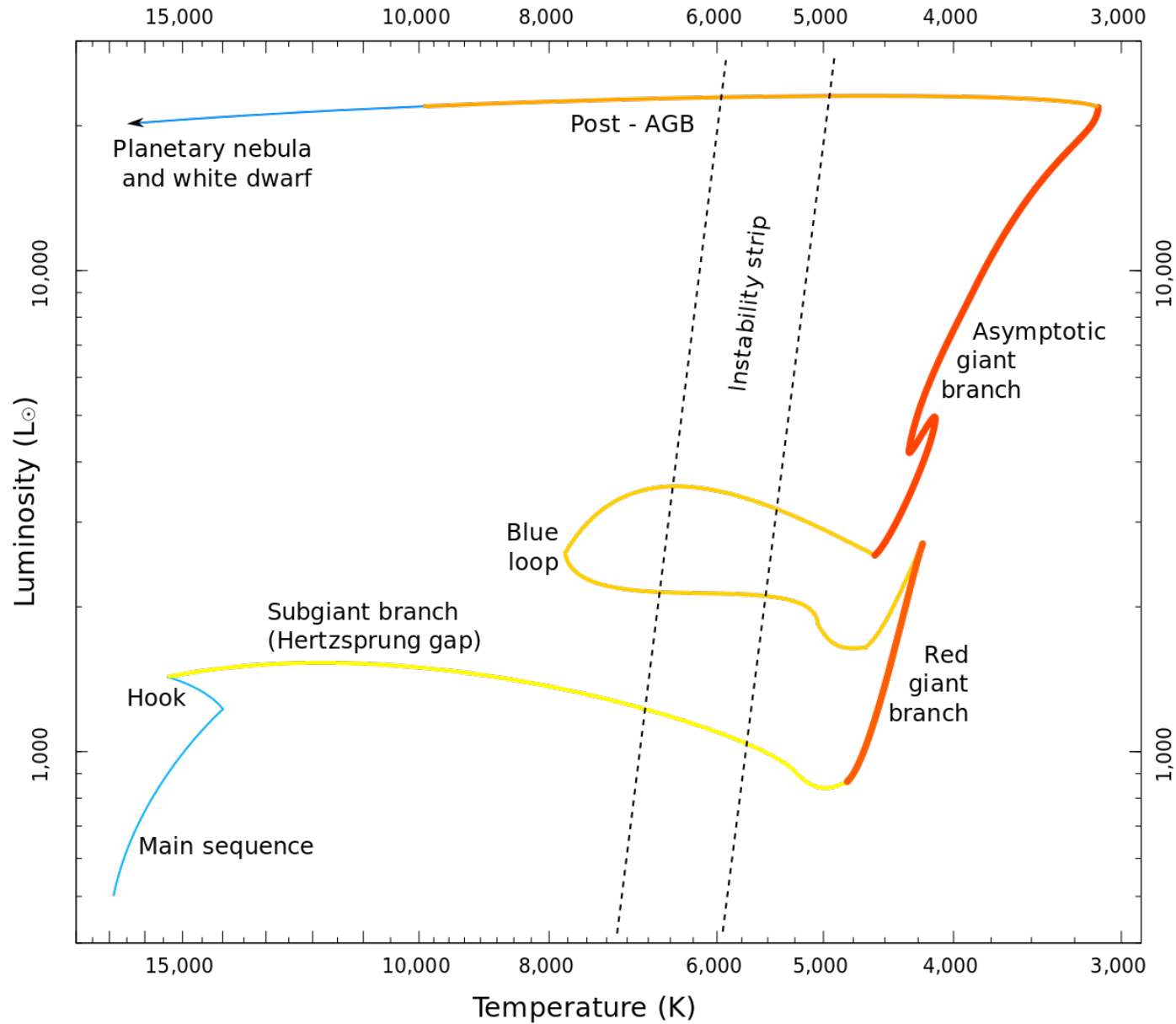
- Ramo Assintótico das Gigantes (AGB)
- Ramo das Gigantes Vermelhas superior (RGB)
- Ramo horizontal (HB)
- Variável RR Lyrae (RR)
- Fim da sequência principal, ramificação subgigante e RGB inferior



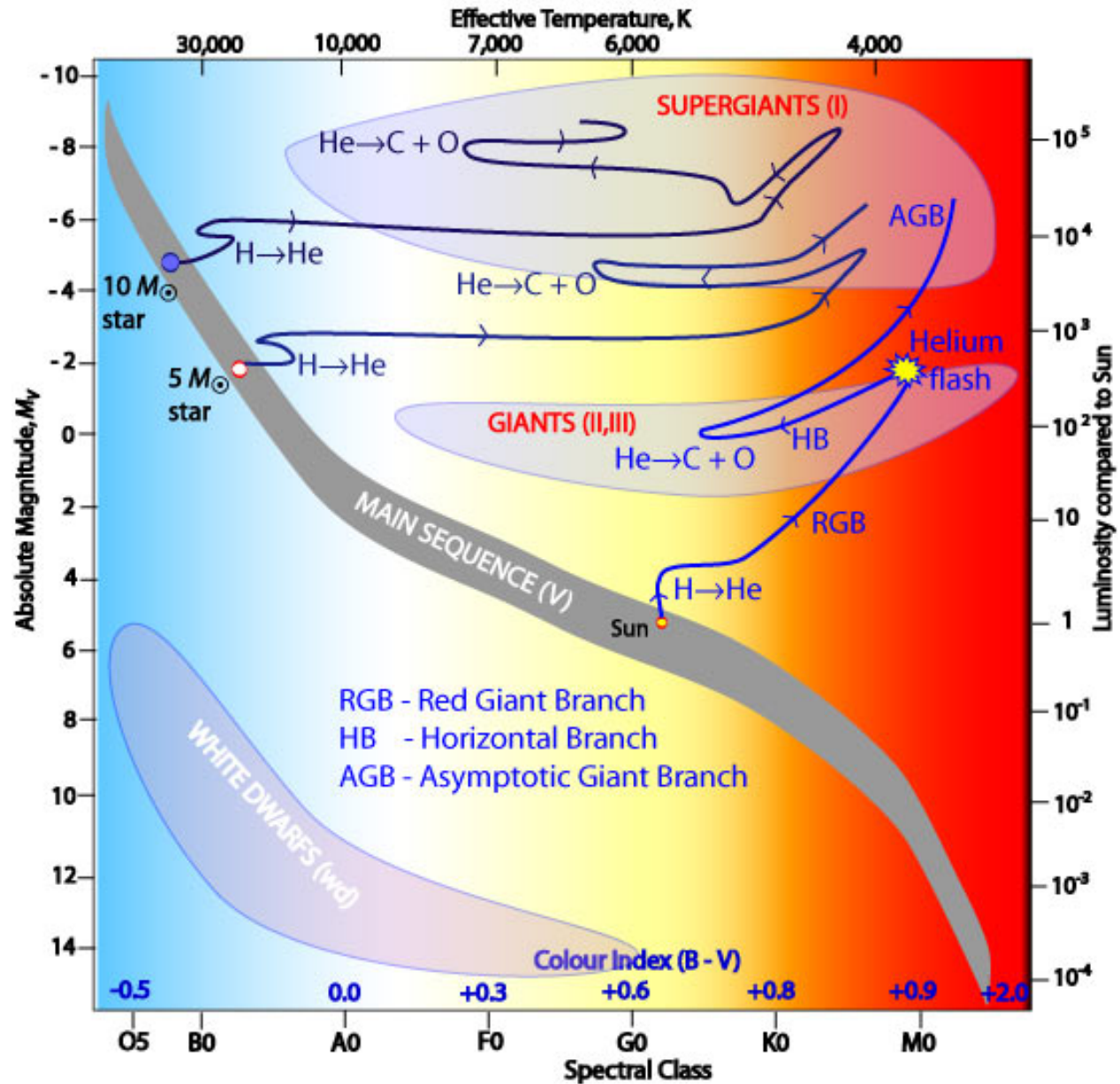




Evolution of a $5 M_{\odot}$ star



Evolutionary Tracks off the Main Sequence



Ref: <https://scienceatyourdoorstep.com/2020/04/02/how-a-star-expands/>



FIM DA AULA 6