



REVISÃO DE CONCEITOS DE EVOLUÇÃO ESTELAR

AGA0299

DEFINIÇÕES

.....

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4,$$

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}.$$

$$\alpha \text{ (in radians)} = D/d.$$

$$m_x = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_x}{F_{x,0}} \right),$$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(F_1/F_2).$$

$$M = m - 5 \log_{10}(d/10 \text{ pc}).$$

- Fluxo e Luminosidade
- Distâncias no céu
- Magnitudes ($F_{x,0}$ é o fluxo de referência (zero-point) para um dado *filtro fotométrico*)
- Módulo de distância

ESPECTROS ESTELARES

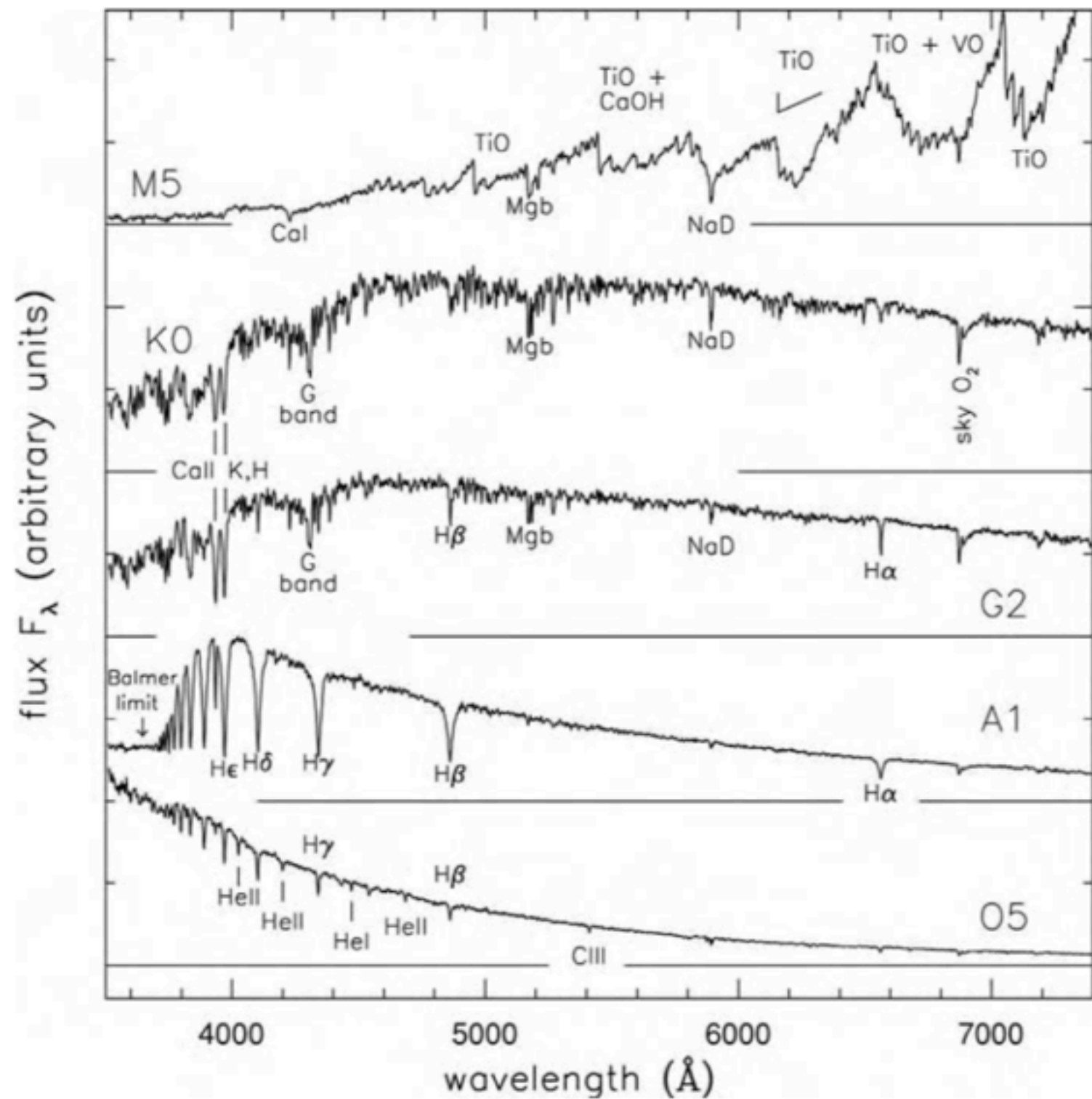


Fig. 1.1. Optical spectra of main-sequence stars with roughly the solar chemical composition. From the top in order of increasing surface temperature, the stars have spectral classes M5, K0, G2, A1, and O5 – G. Jacoby *et al.*, spectral library.

FILTROS FOTOMÉTRICOS

$$F_{BP} \equiv \int_0^\infty T_{BP}(\lambda) F_\lambda(\lambda) d\lambda \approx F_\lambda(\lambda_{\text{eff}}) \Delta\lambda,$$

T_{BP} :
transmissão na 'band pass'

F_λ : fluxo

$F_\lambda(\lambda_{\text{eff}})$:
fluxo no comprimento de onda efetivo

$\Delta\lambda$:
largura do filtro

Índice de cor:

diferença entre
magnitudes em bandas
diferentes, a banda
mais azul menos a
banda mais vermelha.

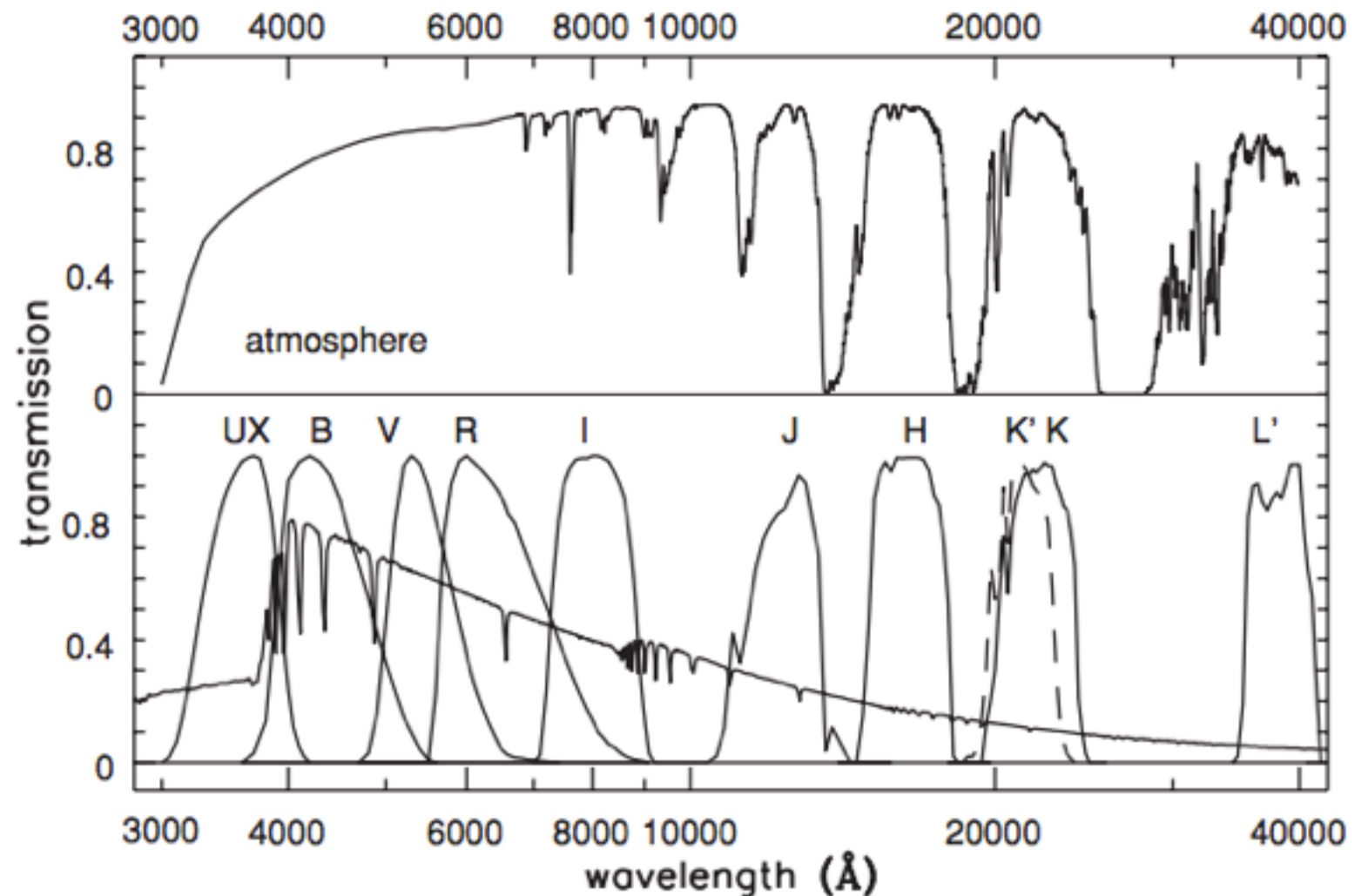
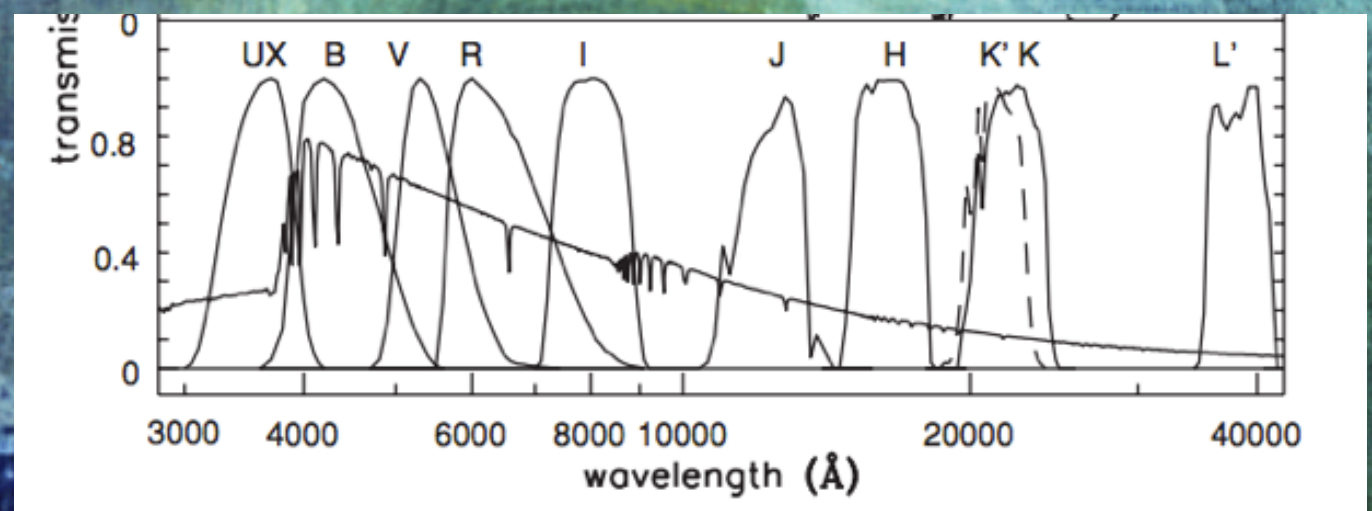
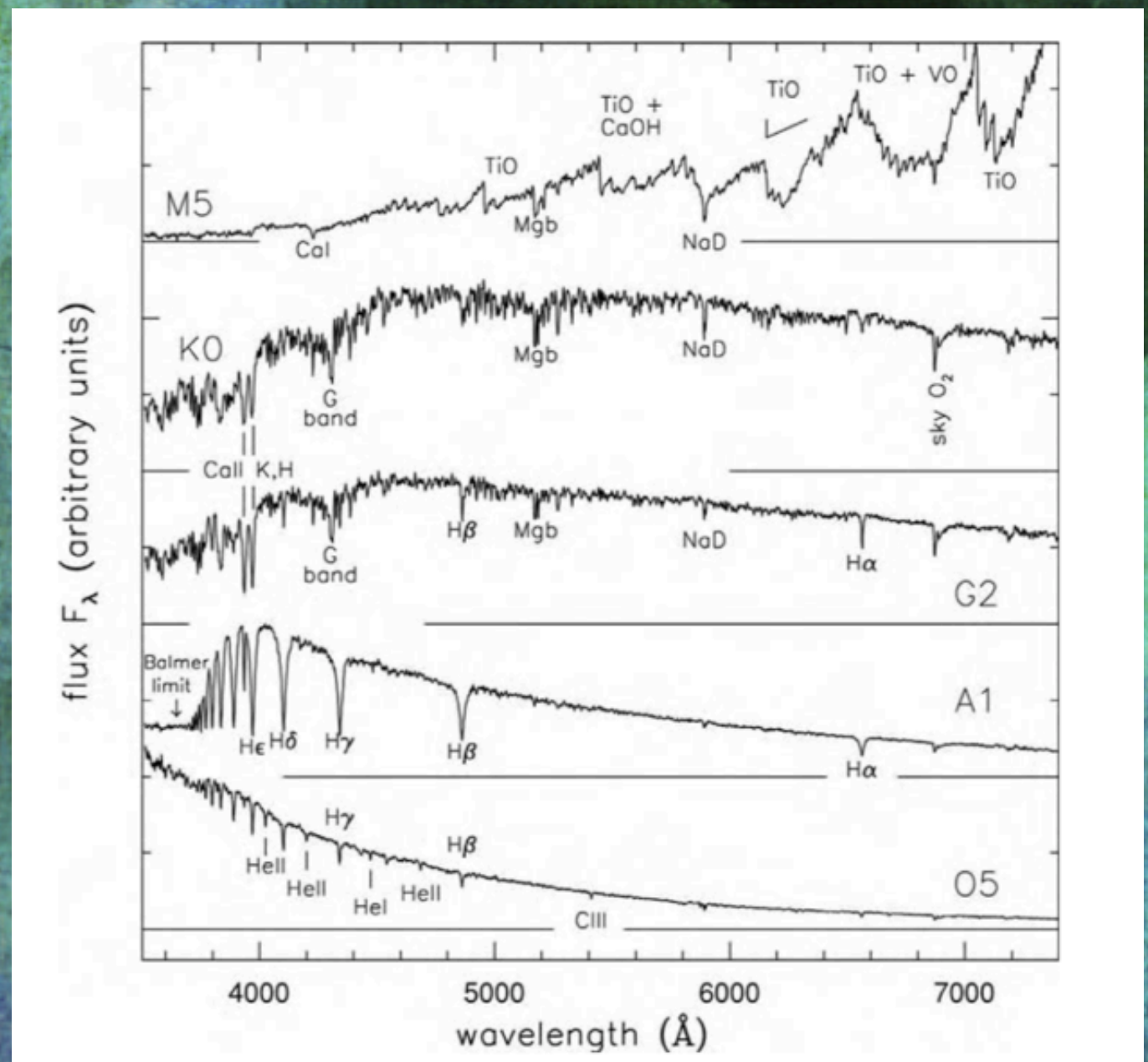


Fig. 1.7. Above, atmospheric transmission in the optical and near-infrared. Below, flux F_λ of a model A0 star, with transmission curves $T(\lambda)$ for standard filters (from Bessell 1990 *PASP* **102**, 1181). *UX* is a version of the *U* filter that takes account of atmospheric absorption. For *JHK'KL'*, $T(\lambda)$ describes transmission through the atmosphere and subsequently through the filter.

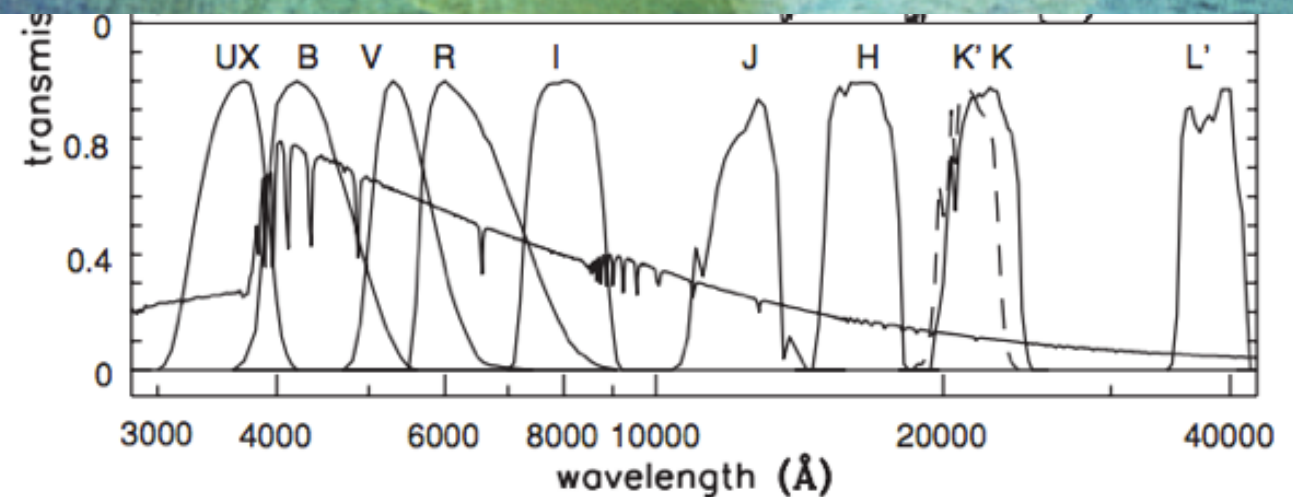
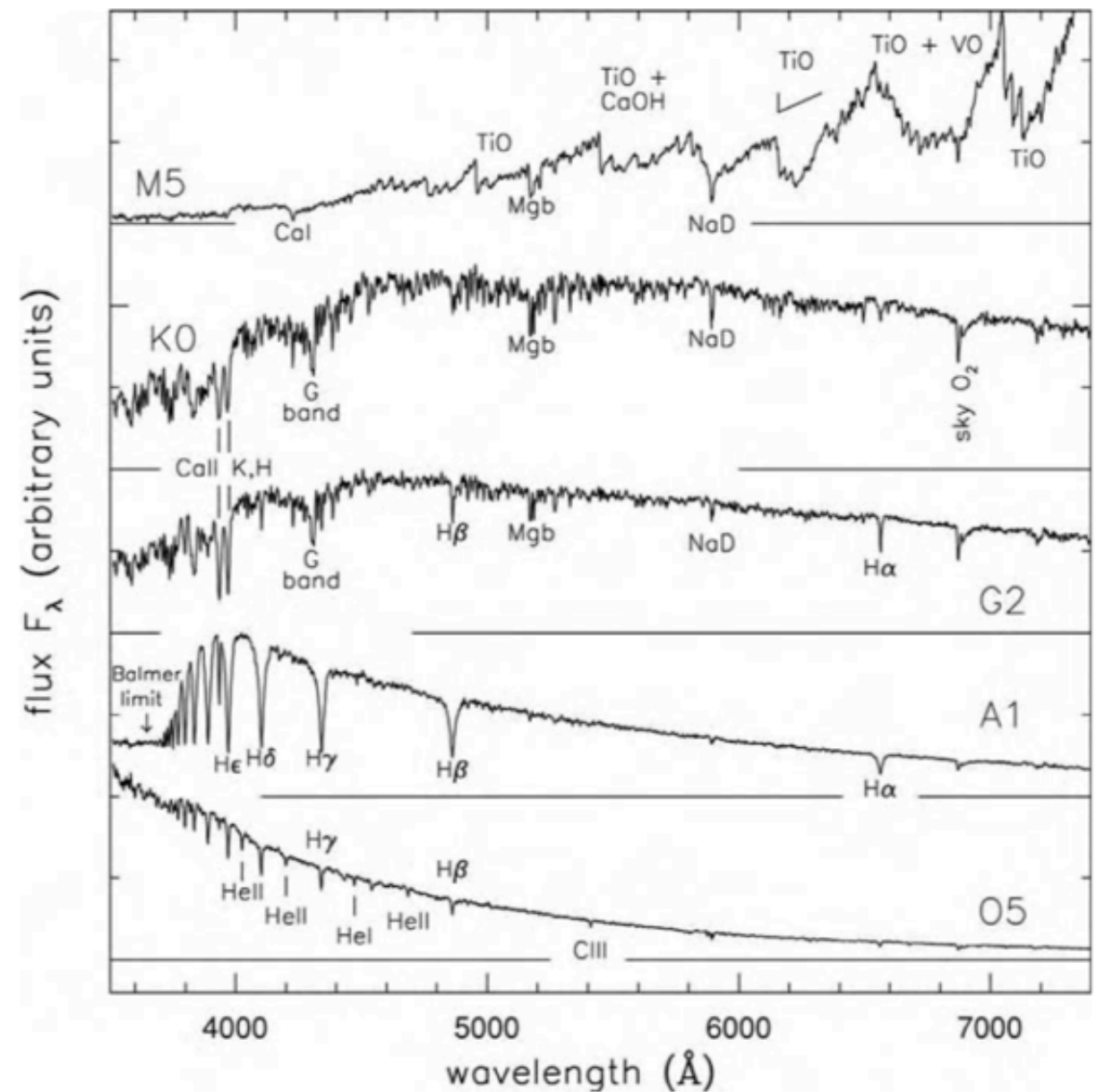
Uma estrela de tipo espectral B tem cor B-V menor ou maior do que uma estrela de tipo espectral K?



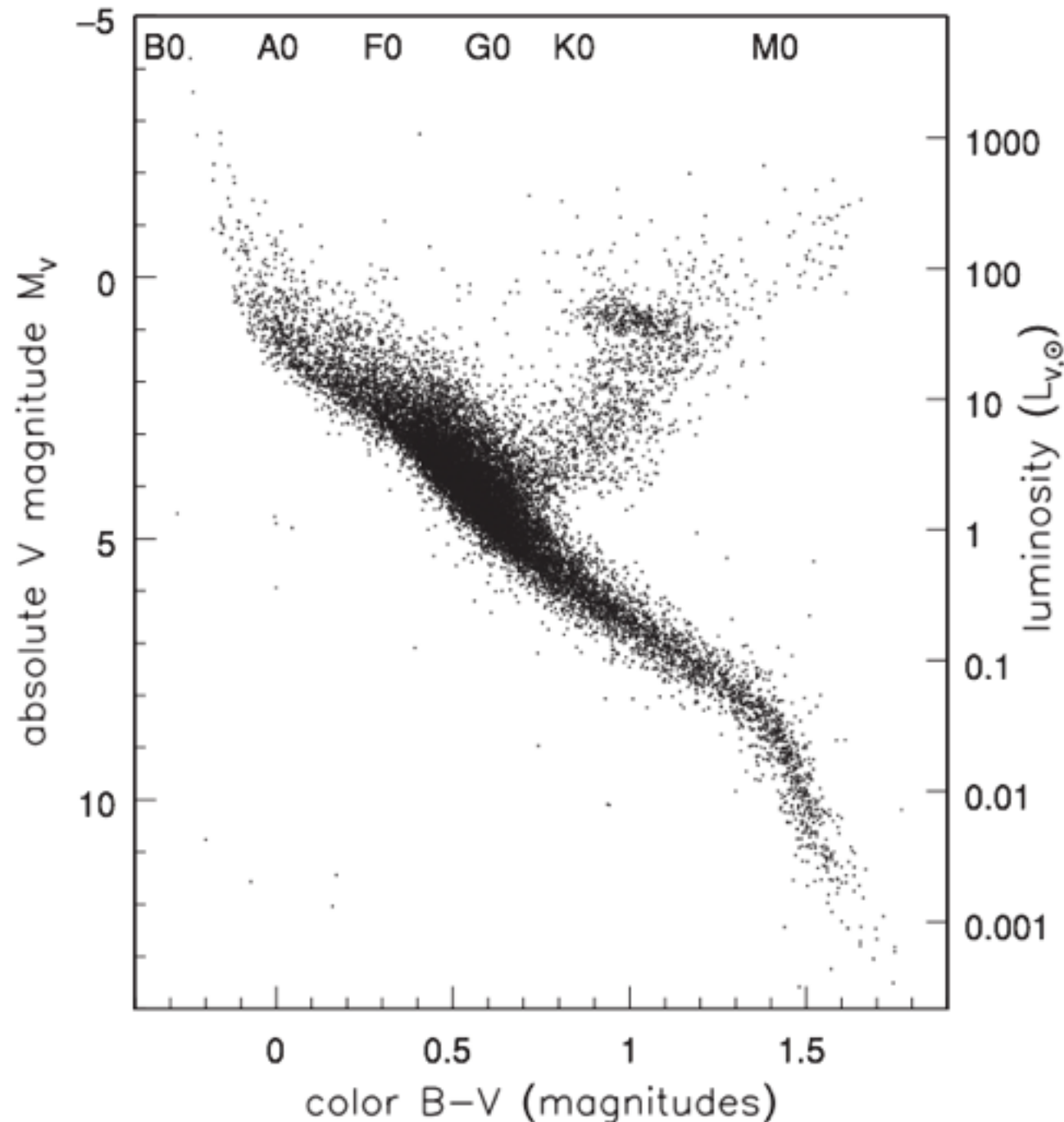
Considere uma
estrela tipo A a 1 pc
de distância e outra
estrela tipo A a
100pc de distância.
Elas são observadas
com cores B-V e V-I
iguais ou diferentes?
Por que?

$$M = m - 5 \log_{10}(d/10 \text{ pc}).$$

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{observed}} - (B - V)_{\text{intrinsic}}$$



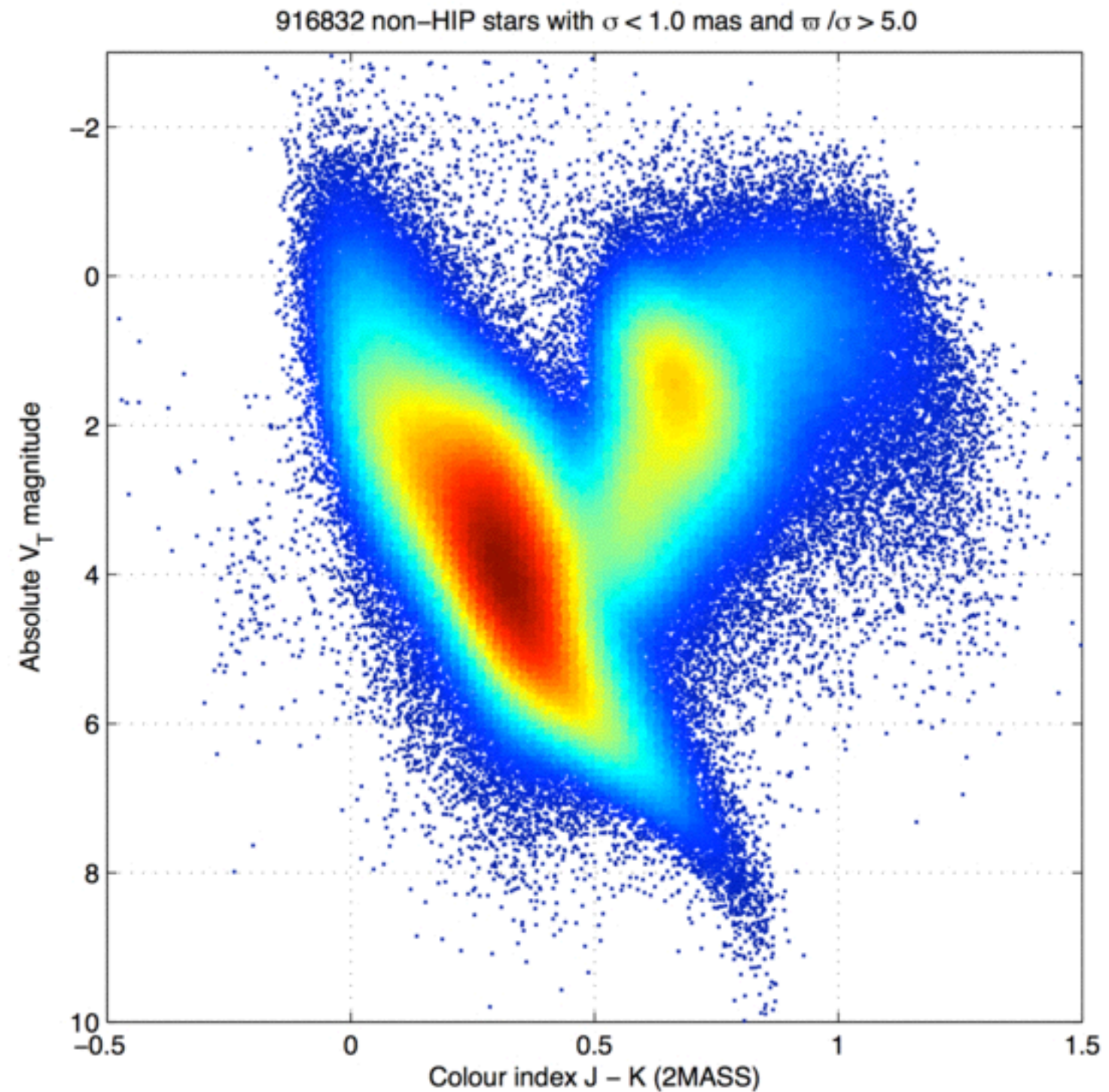
OBSERVANDO A EVOLUÇÃO ESTELAR



Quais (outros)
parâmetros
possíveis que
podem ser
representados
nos eixos x e y?

Fig. 2.2. A color–magnitude diagram and approximate spectral types for 15 630 stars within 100 pc of the Sun, for which Hipparcos measured the trigonometric parallax to $<10\%$, and the color $B - V$ to within 0.025 magnitudes – M. Perryman.

OBSERVANDO A EVOLUÇÃO ESTELAR

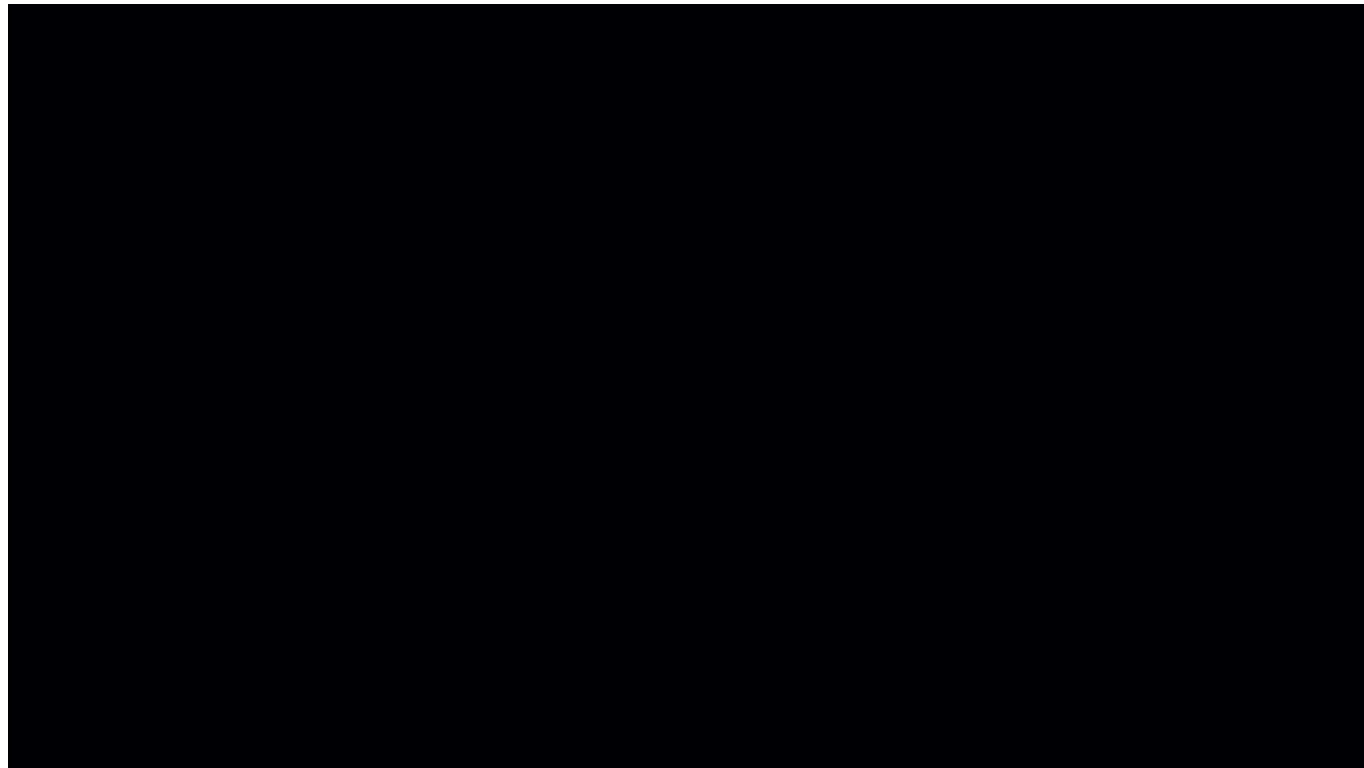


<http://sci.esa.int/gaia/56388-gaia-first-hertzprung-russell-diagram/>

PROJETO GAIA

- Missão astrométrica da ESA (2013 — 2019)
- <http://sci.esa.int/gaia>

“The main goal of the Gaia mission is to make the largest, most precise three-dimensional map of our Galaxy by surveying an unprecedented one per cent of the galaxy's population of 100 billion stars.”



MEDINDO DISTÂNCIAS: PARALAXE TRIGONOMÉTRICA

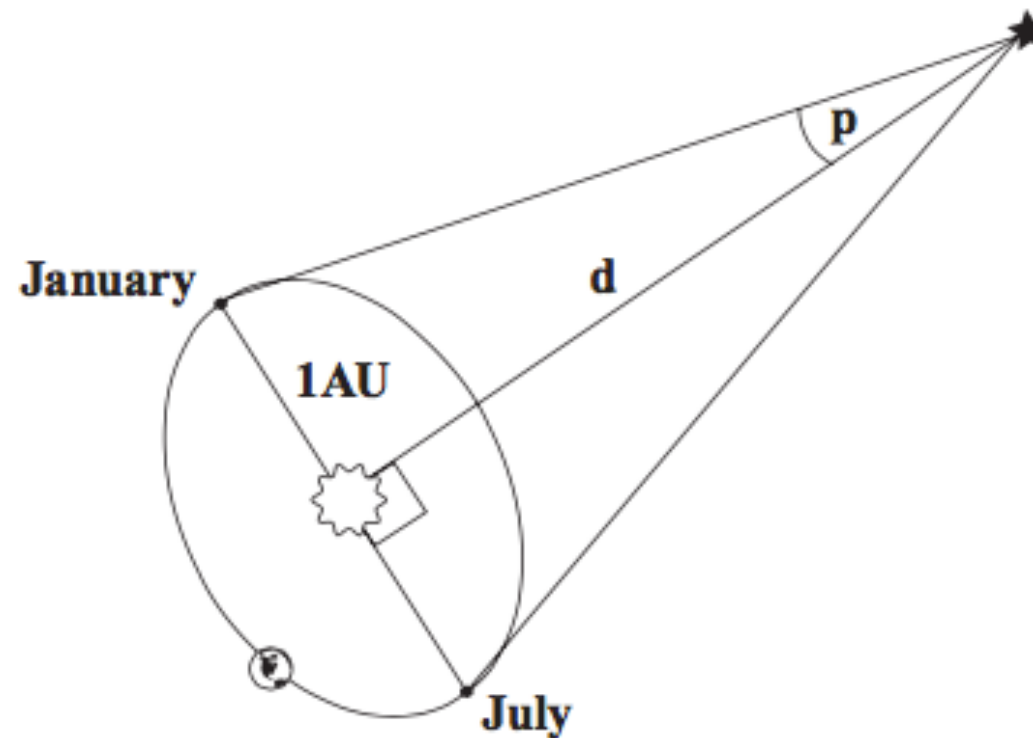
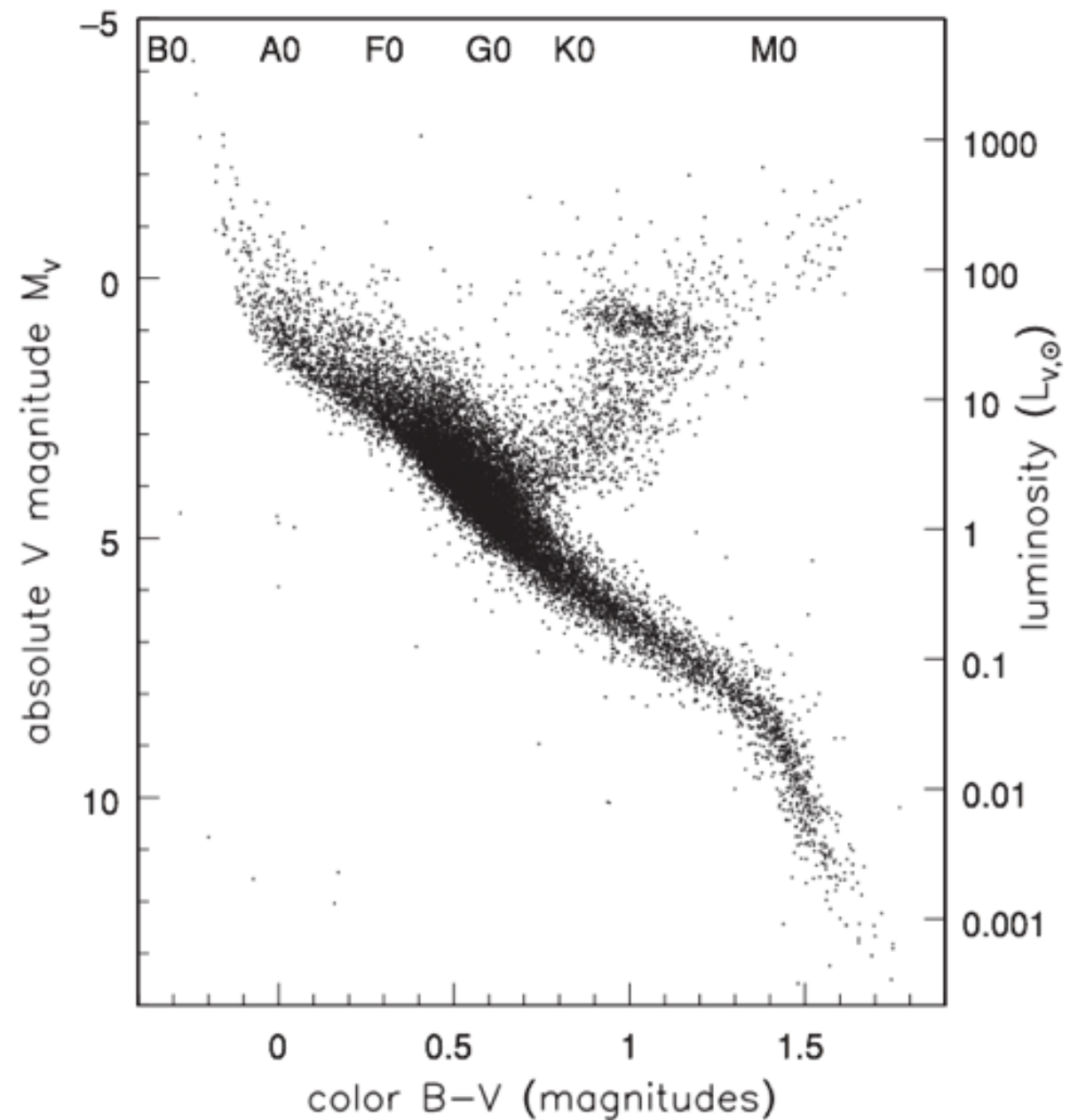


Fig. 2.1. Trigonometric parallax: in the course of a year, the star appears to move in an ellipse with a major axis of $2p$.

$$\frac{1 \text{ AU}}{d} = \tan p \approx p \text{ (in radians).}$$

Paralaxe fotométrica ou espectroscópica



$$(m - M)_0 = 5 \log_{10} d - 5$$

Fig. 2.2. A color-magnitude diagram and approximate spectral types for 15 630 stars within 100 pc of the Sun, for which Hipparcos measured the trigonometric parallax to $<10\%$, and the color $B - V$ to within 0.025 magnitudes – M. Perryman.

Quais as fases evolutivas estão sendo observadas?

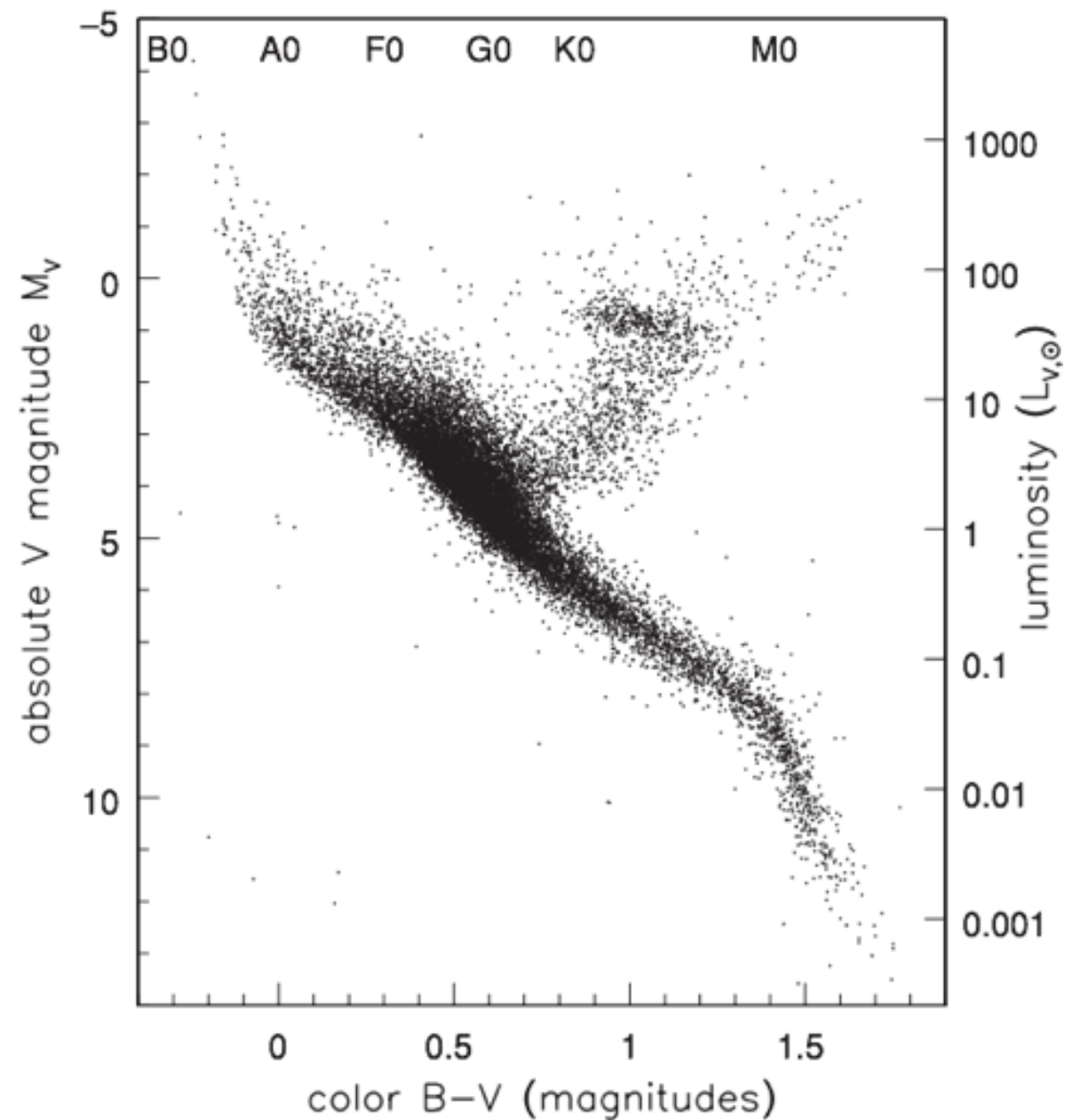
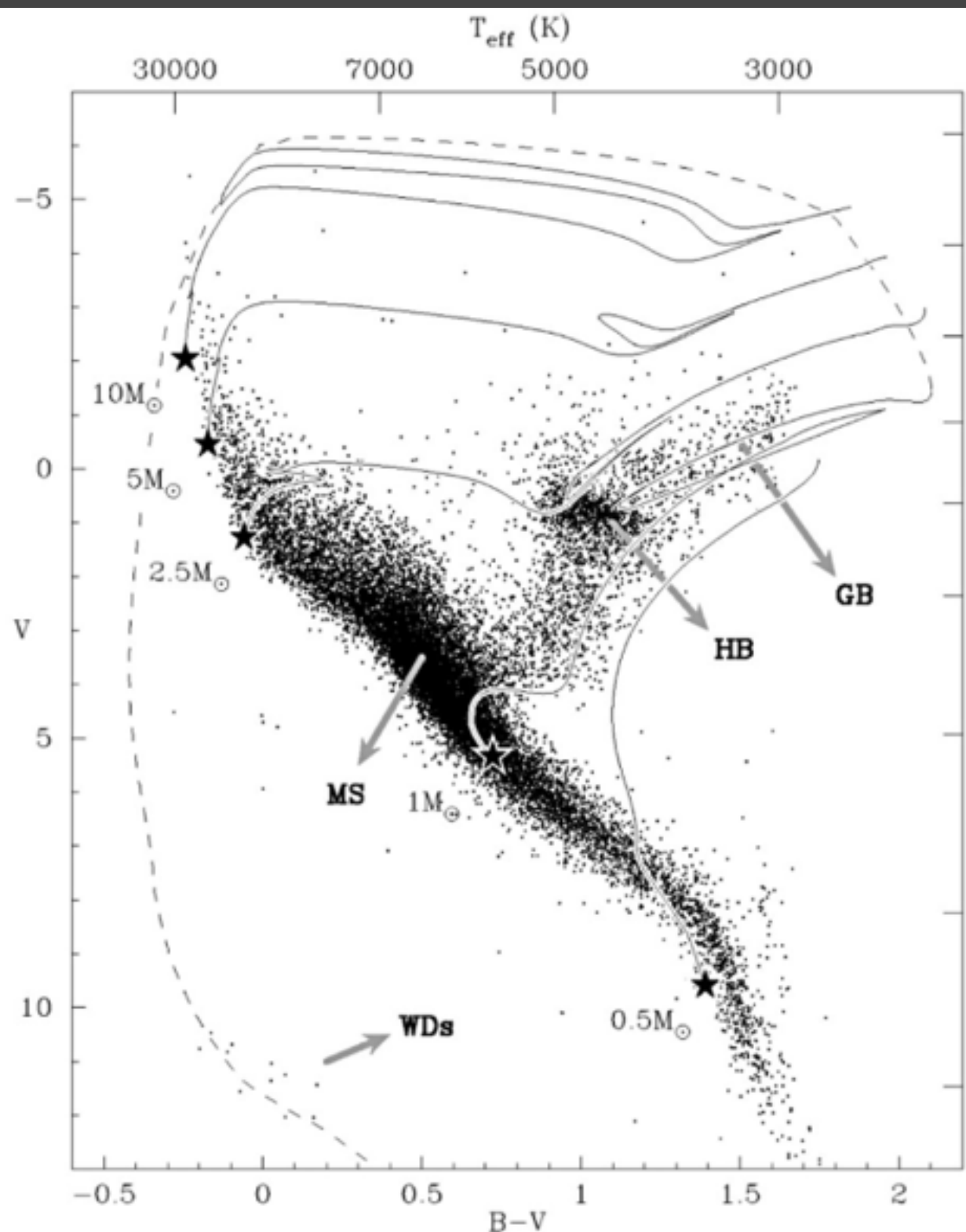


Fig. 2.2. A color-magnitude diagram and approximate spectral types for 15 630 stars within 100 pc of the Sun, for which Hipparcos measured the trigonometric parallax to $<10\%$, and the color $B - V$ to within 0.025 magnitudes – M. Perryman.



Porque algumas regiões do diagrama são mais “densas” (tem mais estrelas) do que outras?

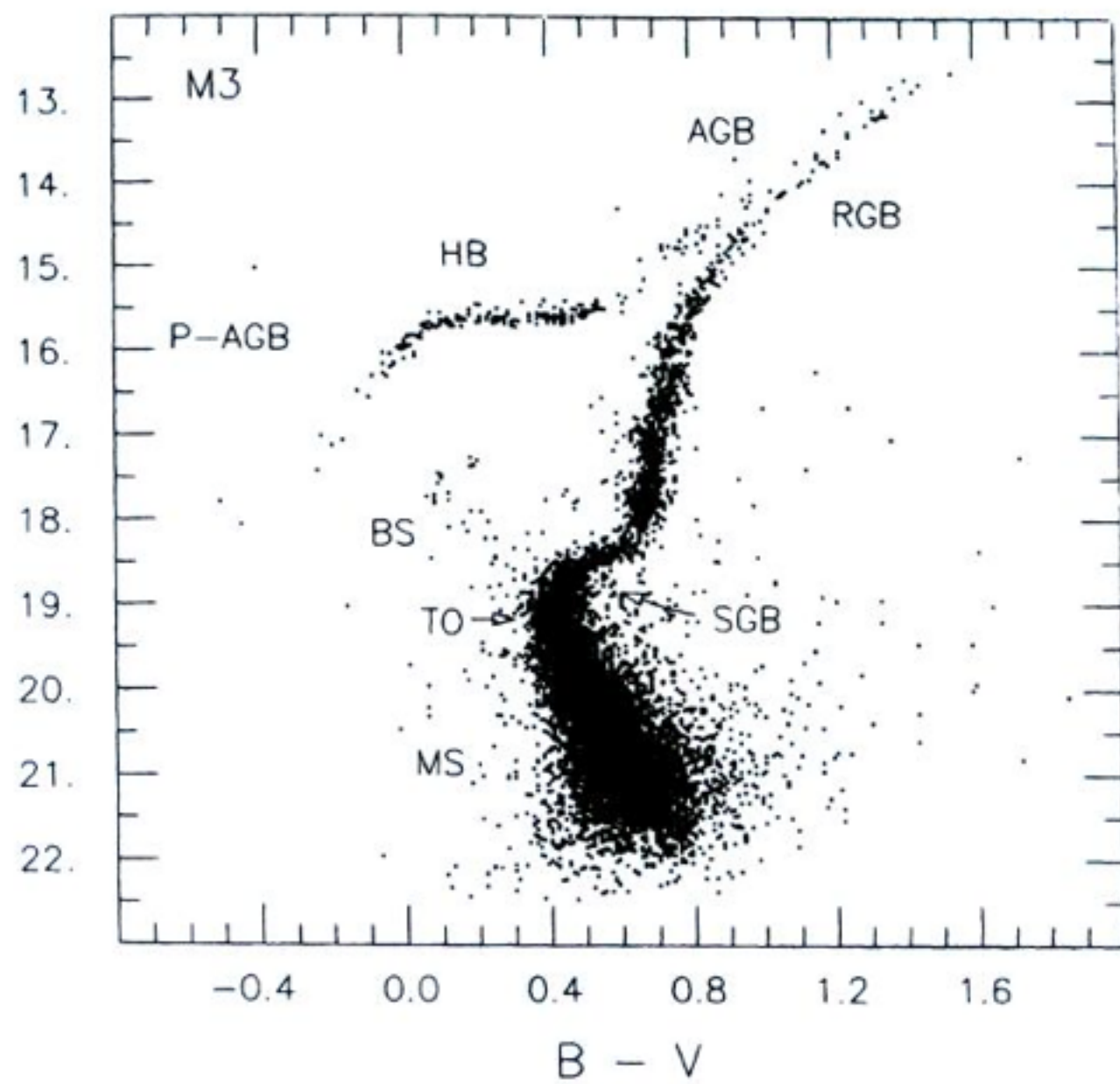
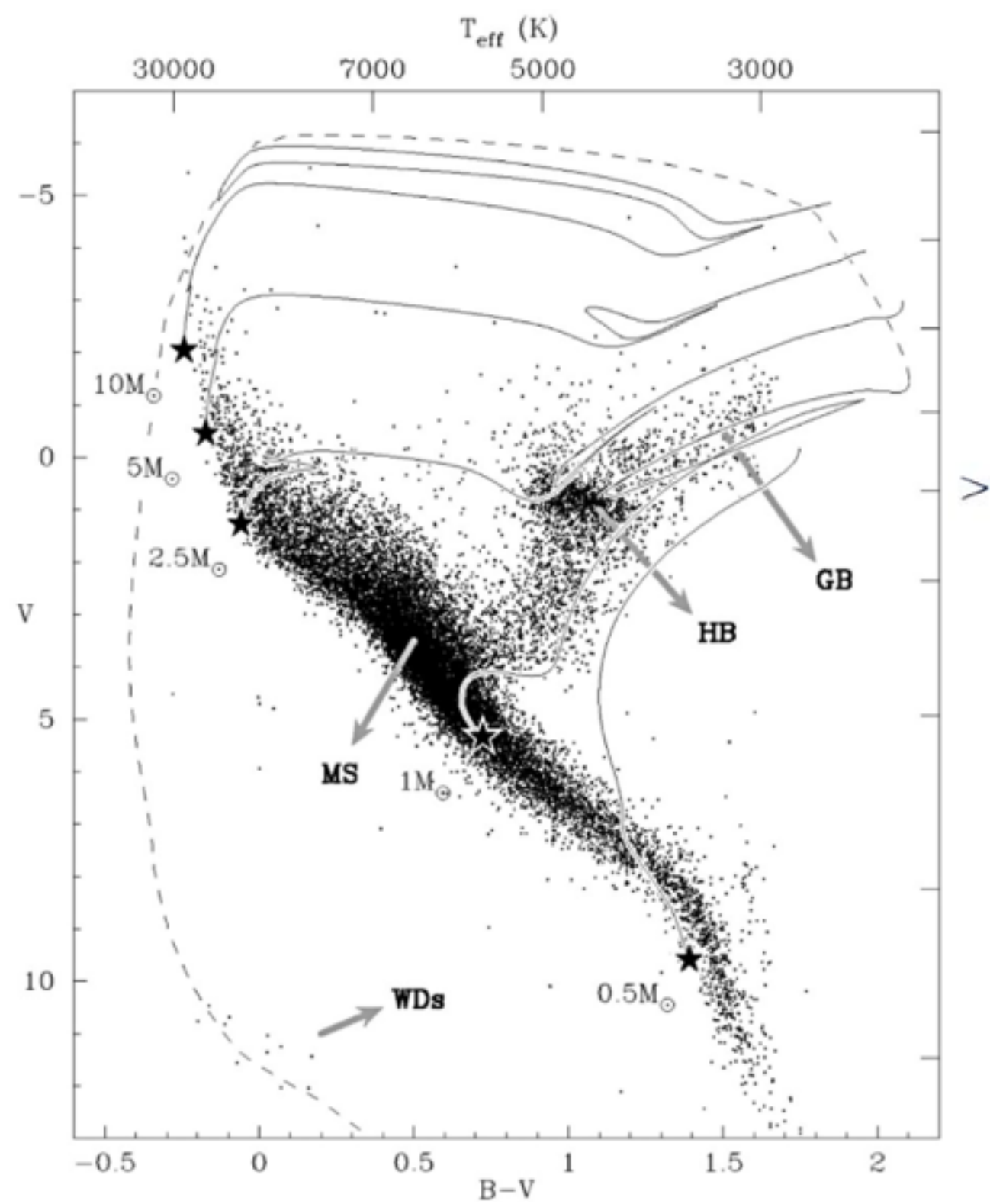
Revisando
Evolução Estelar

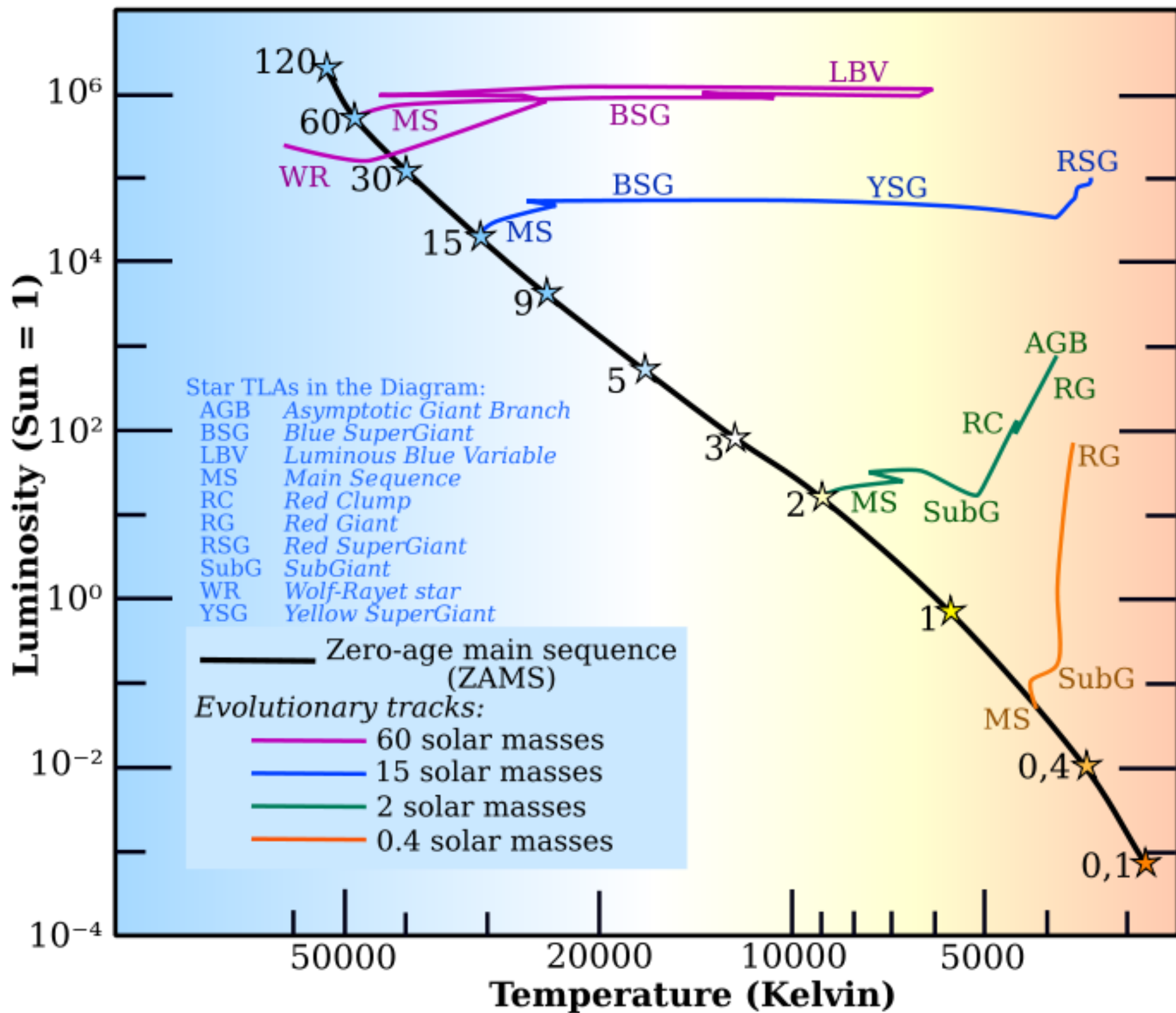
Annual Review of Astronomy
And Astrophysics, Vol 26, 1988

Quando podemos usar
magnitude aparente no eixo y ?

quando a distância entre as estrelas do aglomerado (ou galáxia) é muito menor do que a distância entre o aglomerado e o observador, podemos usar cor versus magnitude aparente







Evolução Estelar

- $M < \sim 0.075 M_{\text{sun}}$: Brown Dwarfs. Não queimam H.
- **Sequência Principal (MS de Main Sequence)**
 - $M \sim 0.075 M_{\text{sun}}$: Massa mínima para queima de H (metallicidade solar!)
 - $M < \sim 0.3\text{-}0.4 M_{\text{sun}}$: Very Low Mass Stars (VLM). Inteiramente convectivas. Energia por cadeia pp1 apenas. Fase de queima de H maior do que o tempo de Hubble.
 - $0.4 < M < 1.3 M_{\text{sun}}$: Low Main Sequence. Produção de energia dominante é cadeia pp.
 - $> \sim 1.2 - 1.3 M_{\text{sun}}$: Upper Main Sequence. Produção de energia dominante é ciclo CNO.

Evolução Estelar

- **Pós-sequência Principal (PMS de Pos Main Sequence)**
 - $M < \sim 2.3 M_{\text{sun}}$: Low Mass Stars. Inicia a queima de He em núcleo degenerado. Flash do Hélio.
 - $\sim 2.3 < M < \sim 8 M_{\text{sun}}$: Intermediate-mass. Não desenvolve núcleo degenerado de He mas desenvolve núcleo degenerado de CO.
 - $M > \sim 8 M_{\text{sun}}$: Massive stars. Não passa por fases com núcleo degenerado.
- SGB: Sub Giant Branch. Transição entre MS e RGB.
- GB: Giant Branch (RGB de Red para massas baixas e intermediárias). Principal fonte de energia é queima de H em camadas. Primeiro dredge-up.

Evolução Estelar

- **Pós-sequência Principal (cont.)**
- HB: Horizontal Branch. Queima de He no núcleo e queima de H em camadas. Fase mais longa depois da MS. *Instability trip*, RR Lyrae e Cefeidas clássicas.
- AGB: Asymptotic Giant Branch. Queima de He e H em camadas.
 - $M < \sim 2.5 M_{\text{sun}}$: low mass AGB stars (para estrelas mais massivas o termo “asymptotic” não tem significado morfológico).
 - Segundo dredge-up para AGB mais massivas que 3-5 M_{sun} .
 - TP-AGB: Thermally pulsing AGB. AGBs que desenvolvem núcleos degenerados passam por uma fase de importantes pulsações. Terceiro dredge-up em estrelas mais massivas que 1.2-1.5 M_{sun} .
- Após a fase AGB, a estrela evolve para PN e WD (massas baixas e intermediárias) ou SN II (massivas)

Transporte de energia em estrelas da MS

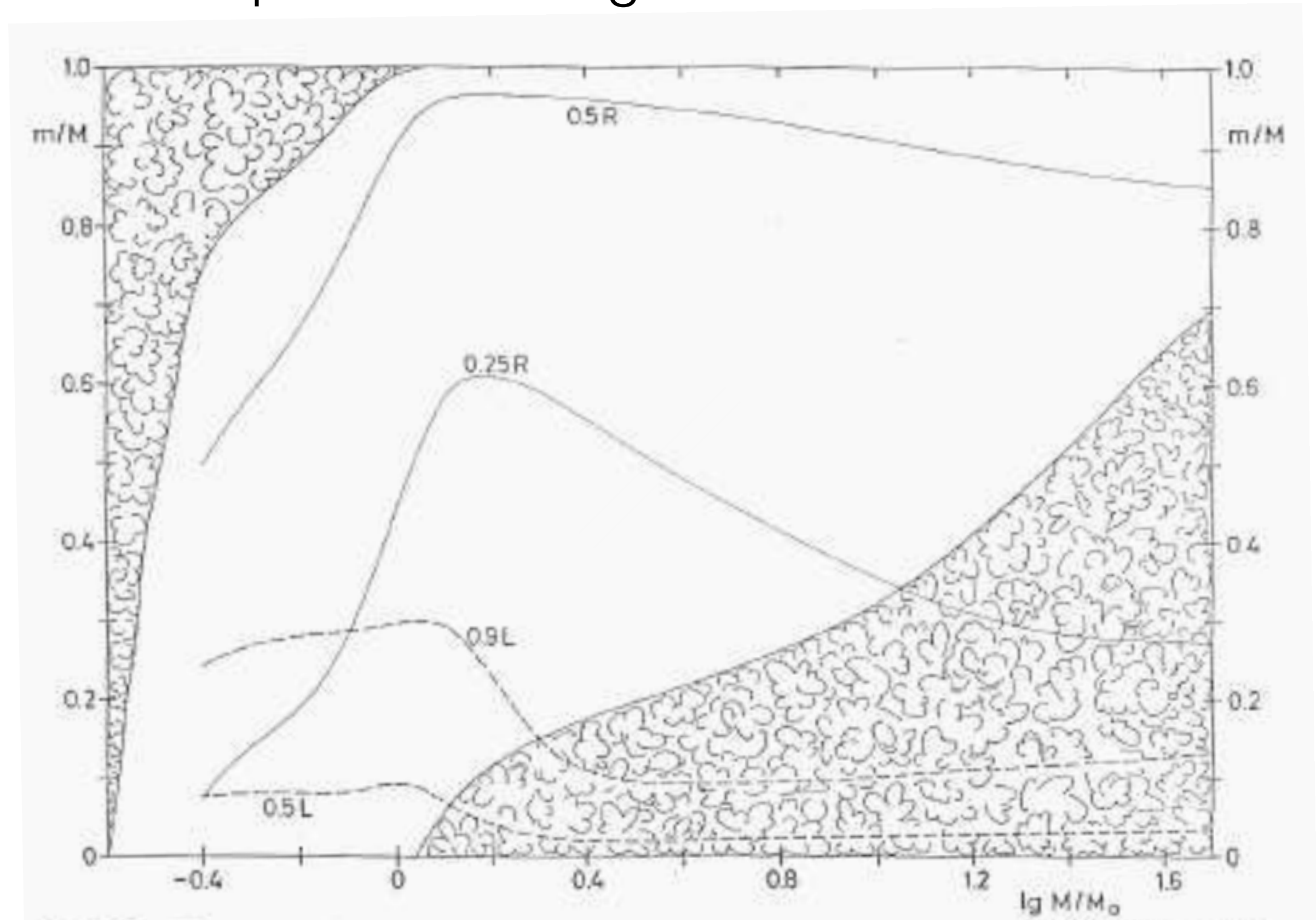
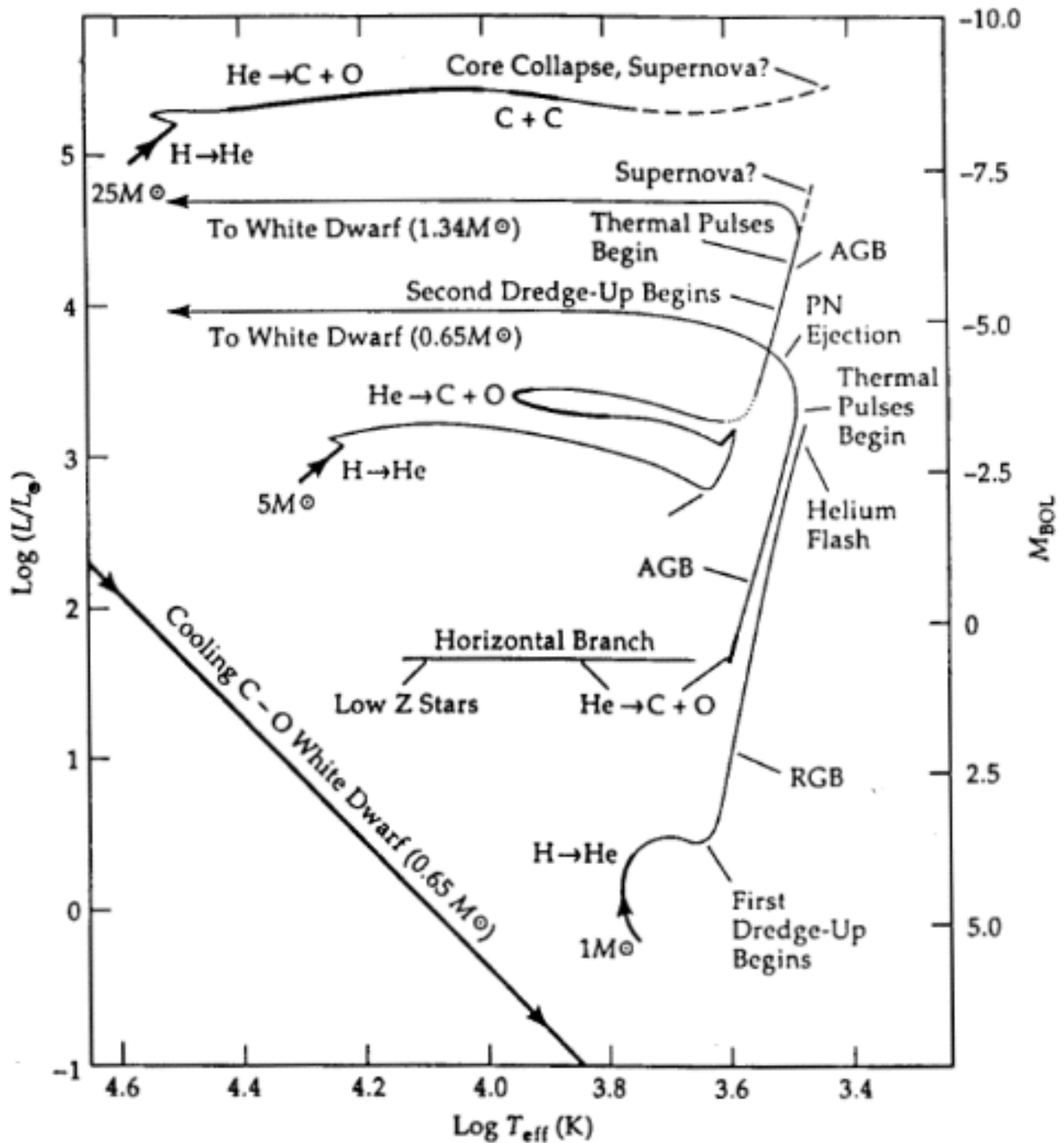


Fig. 22.7 de Kippenhahn & Weigert

Dredge up

- **Primeiro:** durante a fase de RGB, a camada convectiva aumenta em direção ao centro; em sua máxima profundidade, mistura elementos da queima de H durante a MS com a superfície, ^3He , CNO; conforme a camada de queima de H sobe, a base da camada convectiva recede, sem overlap (seção 5.9.2 em Salaris & Cassisi 2005)
- **Segundo:** early-AGB de estrelas mais massivas que $\sim 4M_{\text{sun}}$, conforme a camada de queima de He avança, o envelope de H esfria e expande, e a camada convectiva novamente aumenta de profundidade (seção 7.2)
- **Terceiro:** durante os pulsos térmicos da fase Thermally Pulsing da AGB (TP-AGB; camadas de queima de He são “ligados” e “desligados”; seção 7.2.1)



Modelos de Evolução Estelar

FUNDAMENTAL STELLAR STRUCTURE EQUATIONS (FSSE) IN TIME-INDEPENDENT (STATIC) FORM

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2}$$

HYDROSTATIC EQUILIBRIUM

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

MASS CONSERVATION

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon$$

ENERGY EQUATION

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{rad} = - \frac{3}{4ac} \frac{\bar{\kappa} \rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}$$

RADIATIVE TRANSPORT

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{ad} = - \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\mu m_H}{k} \frac{GM_r}{r^2}$$

ADIABATIC
CONVECTION

TRAJETÓRIAS EVOLUTIVAS

.....

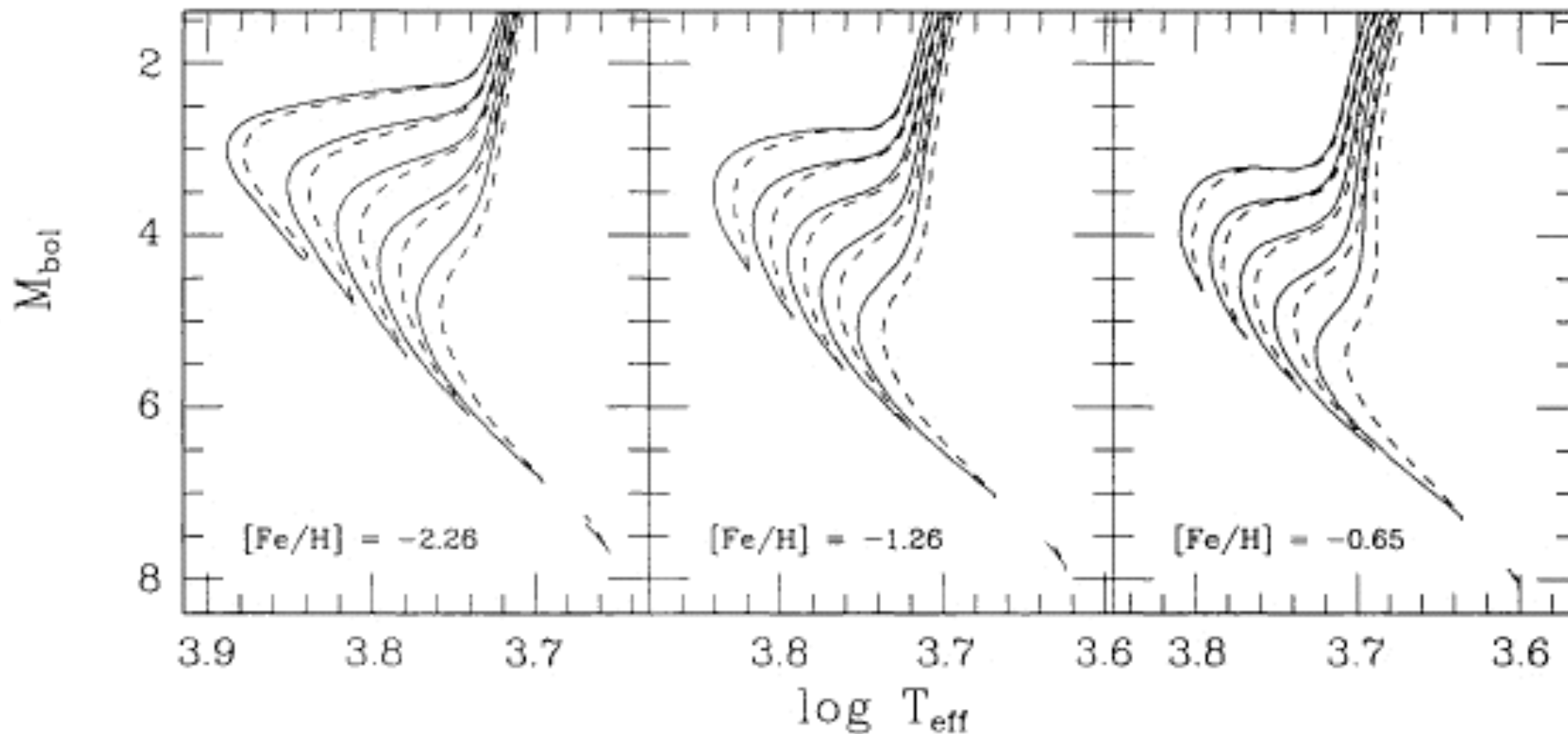
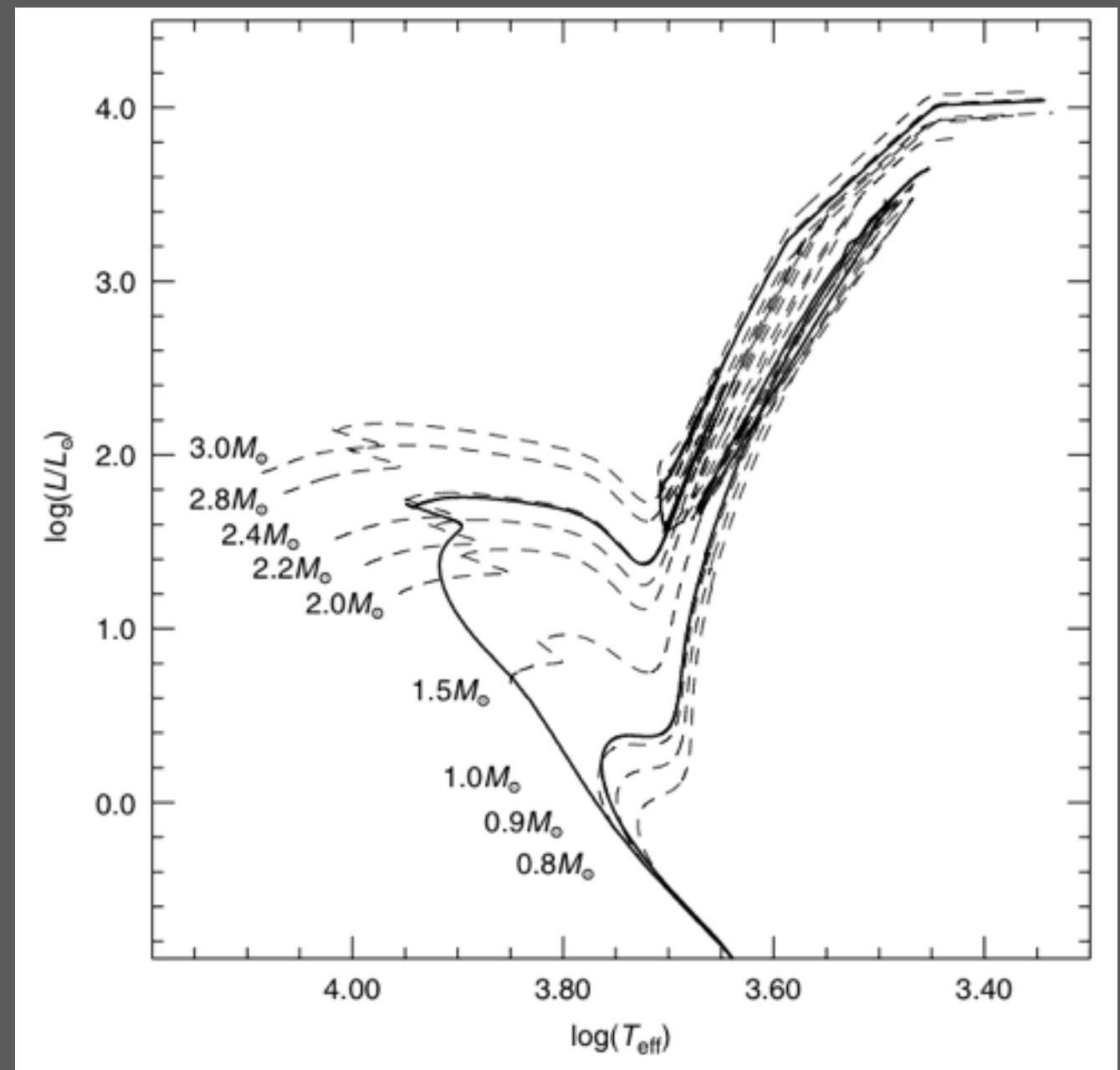


FIG. 1.—Comparison of evolutionary tracks, with and without the inclusion of diffusion, for the three different metallicity mixtures and masses of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0 $M_{\odot}$ (in the order of increasing luminosity). Solid lines show the tracks for “standard” models, while the dashed lines are the “diffusion” tracks.

Effect of He diffusion on evolutionary tracks, from Proffitt & Vandenberg (1991, ApJS, 77, 473).

Iso (“mesma”) crona (“idade”)

- Dada uma população estelar simples: um conjunto de estrelas quimicamente homogêneas que se formaram exatamente juntas; cada estrela segue a evolução no HR descrita pela sua massa.
- A partir de modelos de evolução estelar, calculamos trajetórias evolutivas e isócronas.
- Uma isócrona de idade t mostra o locus no diagrama HR (CMD) que essa população ocupa quando atinge essa idade.



Salaris & Cassisi 2005

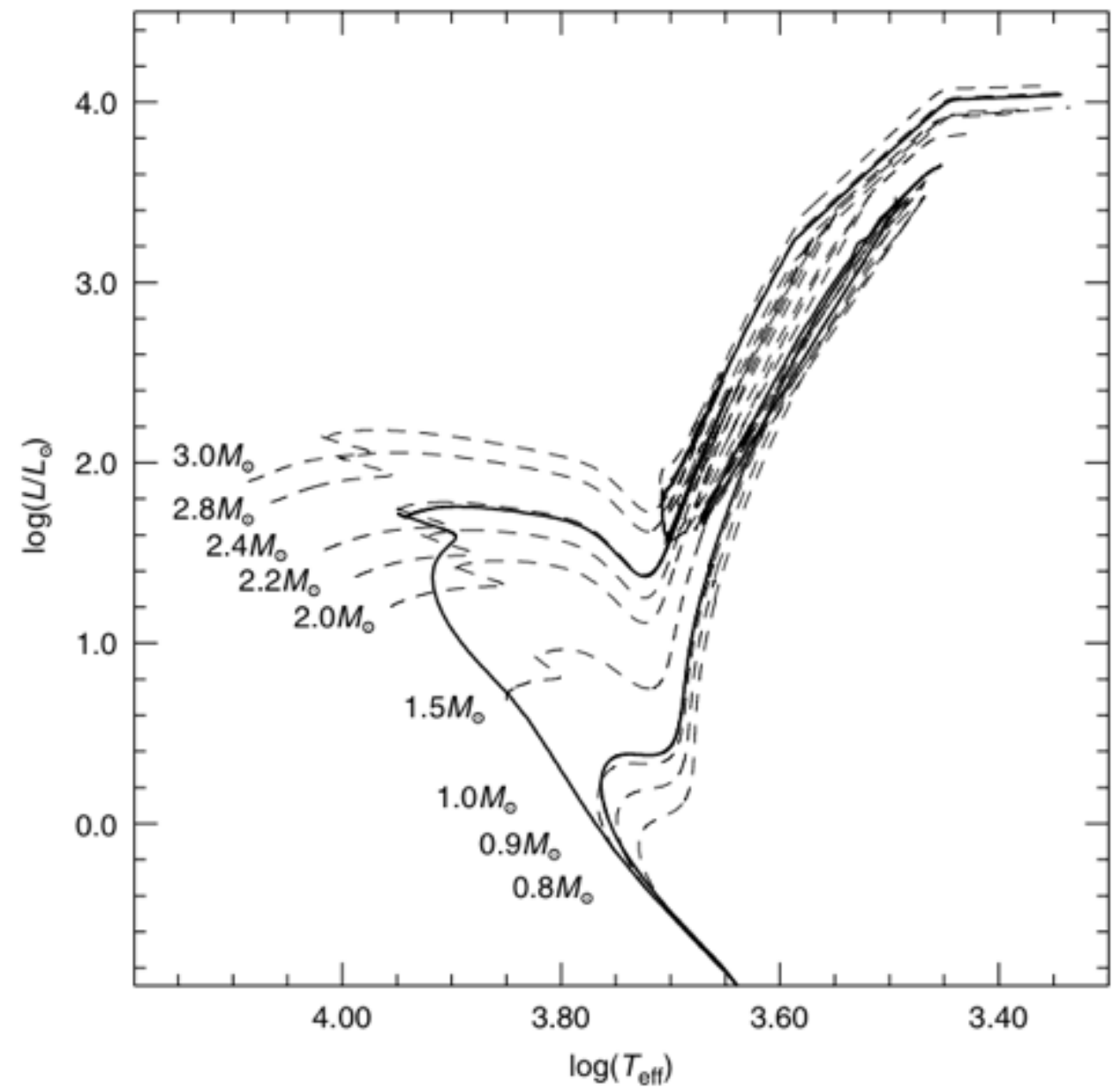
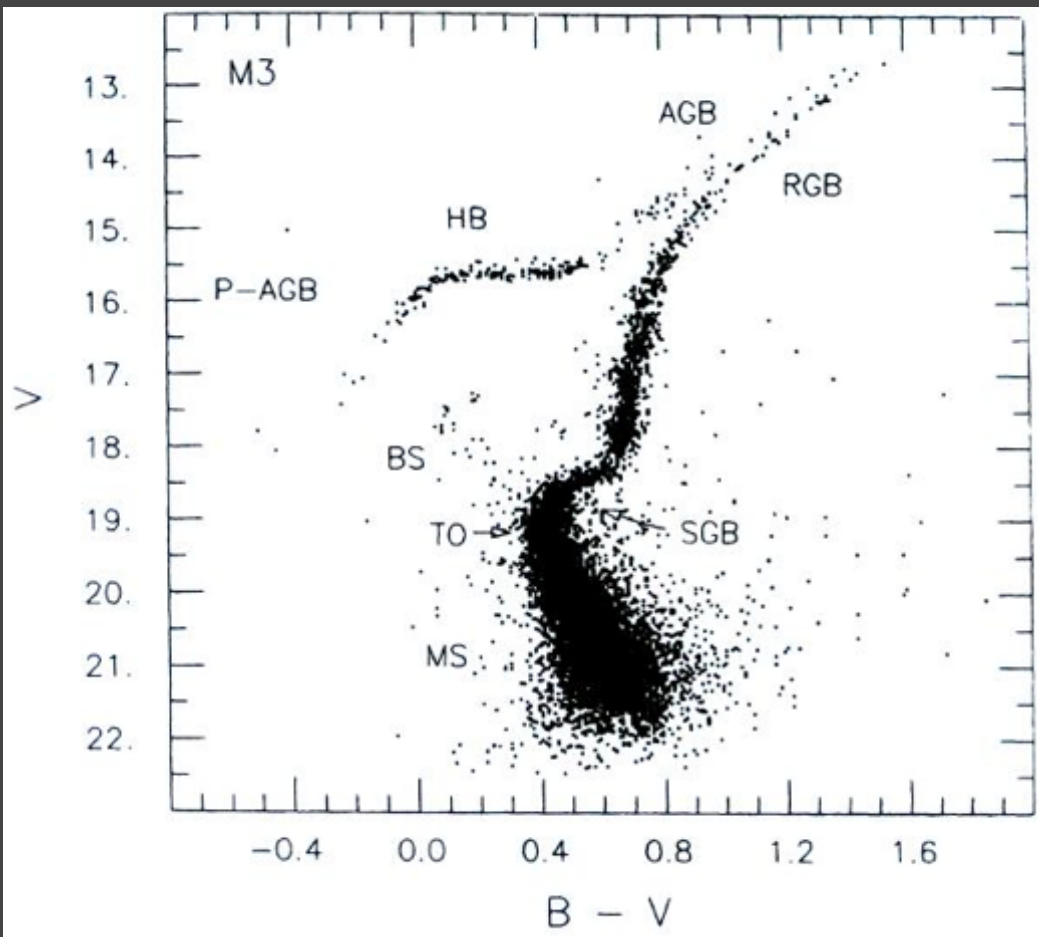


Figure 9.1 HRD of selected stellar evolutionary tracks (dashed lines) with the same initial solar chemical composition and the labelled masses (from [152]). The heavy solid lines display two isochrones for the same chemical composition and ages of 600 Myr (the brighter sequence) and 10 Gyr

Salaris & Cassisi 2005

Evolução Estelar

Isócronas

QUANTIDADES MENSURÁVEIS VS. ESTIMADAS

HRD vs CMD?

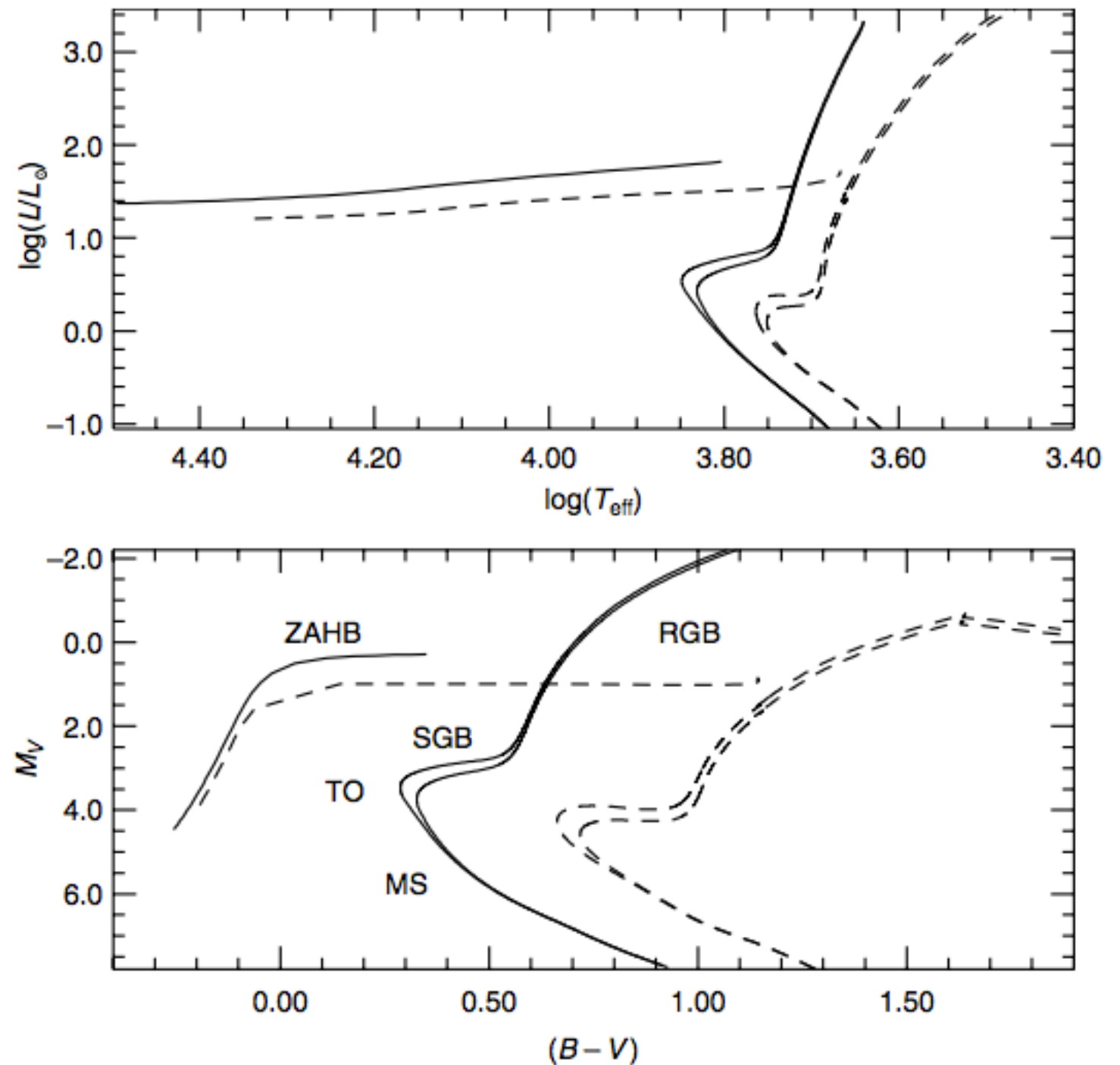


Figure 9.4 HRD and CMD of two pairs of isochrones from the ZAMS to the ZAHB, with ages $t = 10$ and 12.5 Gyr, $Z = 0.0001$ (solid line) and 0.02 (dashed line). The various evolutionary stages along the most metal-poor isochrone are marked

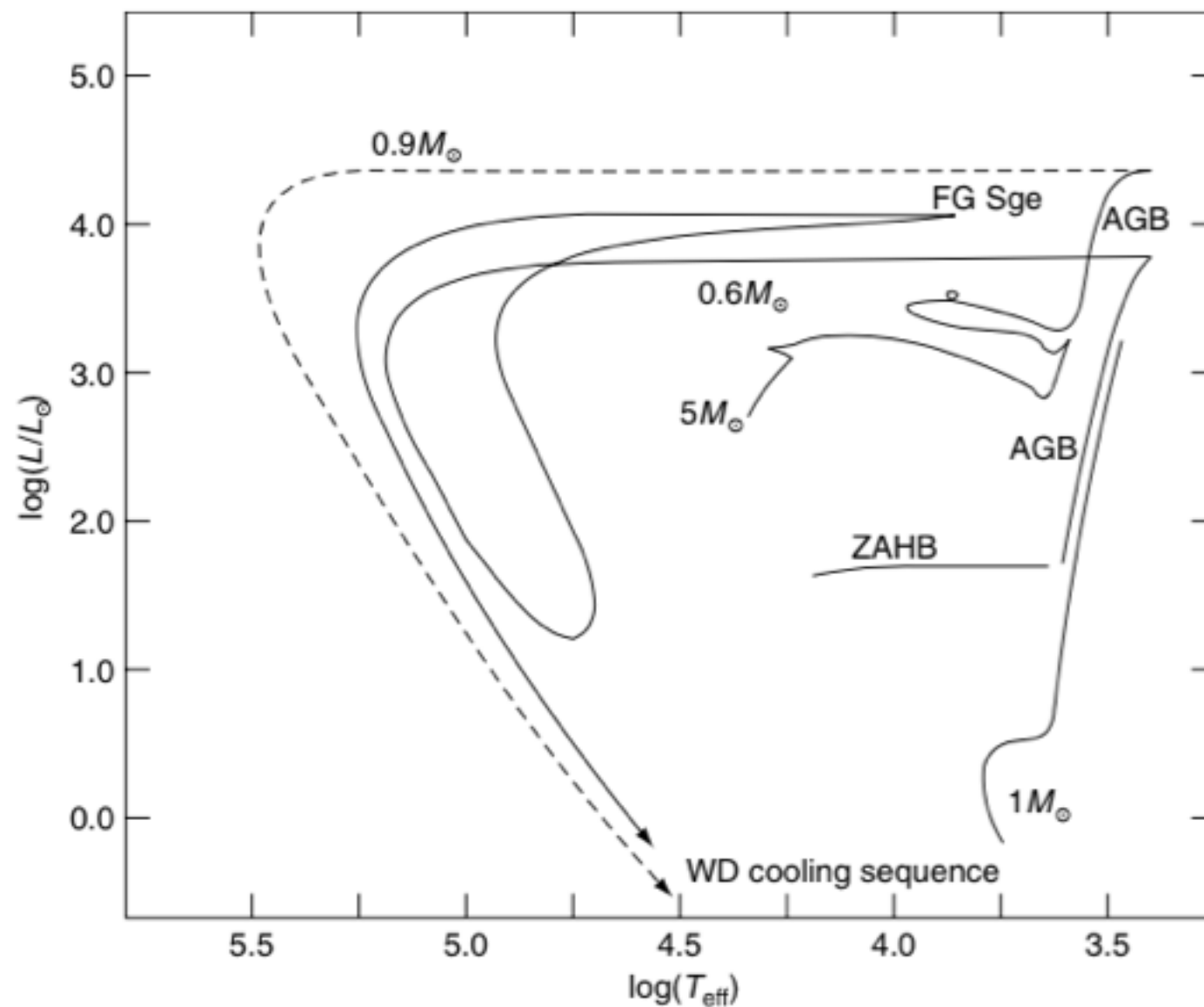


Figure 7.4 Evolutionary tracks from the MS to the WD cooling sequence. The dashed line is the evolutionary track of the $0.9 M_{\odot}$ object left at the end of the AGB, whose initial MS mass was equal to $5 M_{\odot}$; the solid line labelled $0.6 M_{\odot}$ is the evolutionary track of an object whose initial mass was equal to $1 M_{\odot}$. This star experiences a final He flash in the shell before reaching the WD cooling sequence. The location of the observational counterpart represented by the star FG Sagittae is also shown

Born-again
AGB
scenario.
FG Sagittae
(B4 em
1955, G em
1991, K em
2007)

Evolução Estelar

Trajetórias Evolutivas: “normais”
e raras

Comente sobre as semelhanças ou diferenças entre os CMDs

