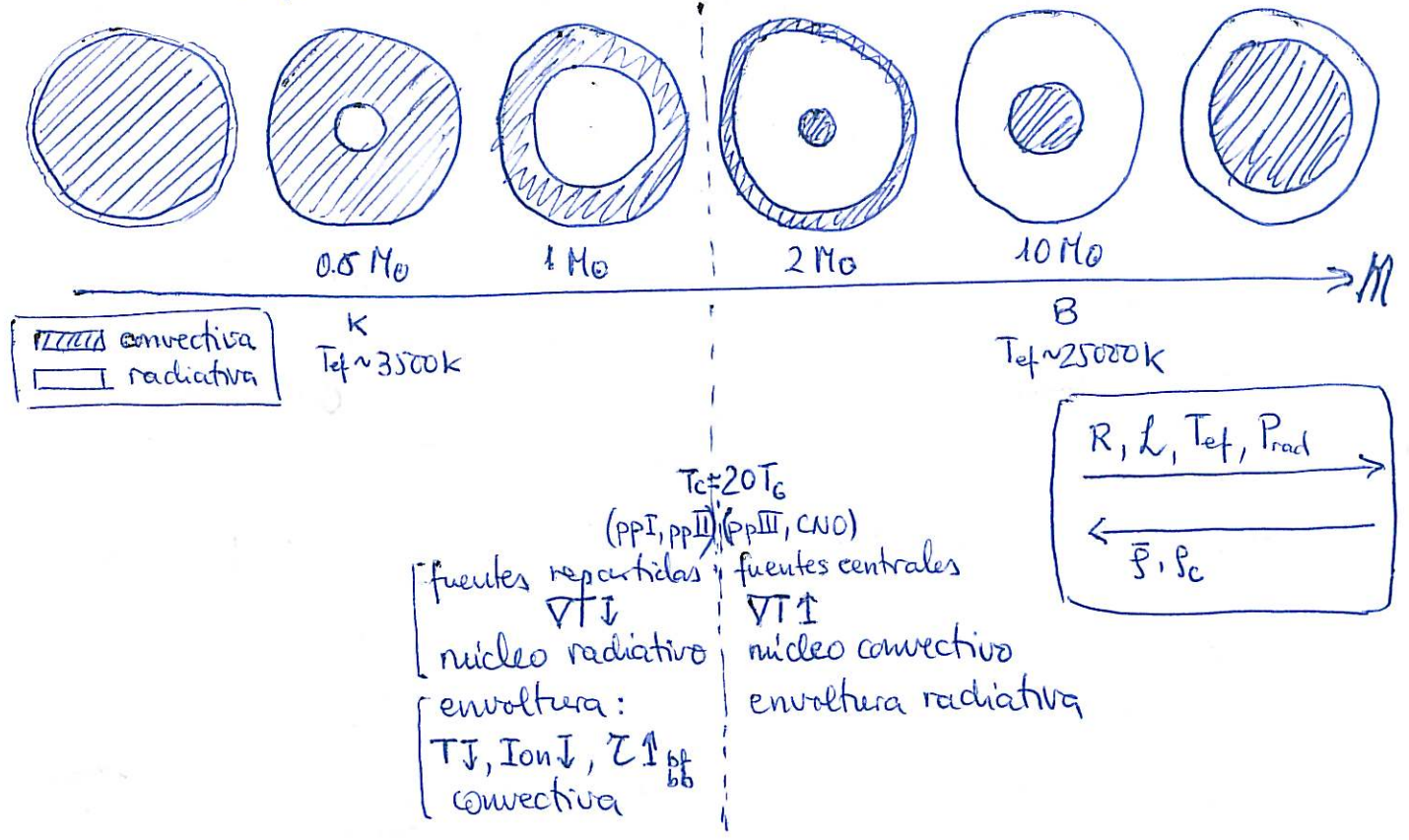


EVOLUCIÓN ESTELAR - ANEXO

Parte aún muy especulativa de la Astronomía que incluye:

- formación estelar
- pérdida de masa
- evolución final

con bastante incertidumbre en opacidades y en fenómenos de overshooting (frontera radiativa/convectiva), sobre todo.



Fases de la evolución:

- pre-secuencia ppal (PMS): hasta primera fusión nuclear
- secuencia ppal: hasta fin de H en centro
- post-secuencia ppal

Cuando se acaba un combustible en el núcleo, la estrella puede:

- encontrar nuevo combustible
- degenerar el gas interior y que P_{deg} frene colapso, [enana blanca]
- sufrir un fenómeno violento [supernova]... objeto compacto

SALIDA DE LA SECUENCIA PRINCIPAL (MS)

Elegimos dos casos: 1 Mo y 5 Mo

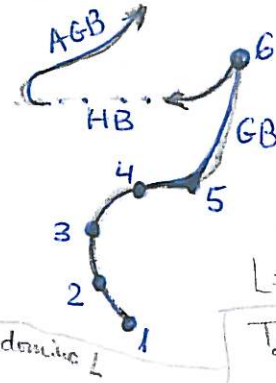
POCO MASIVAS (1 Mo)

domina cadena pp: $E = \epsilon_0 \rho X^2 T^{(3-6)}$

- $X \downarrow, E \downarrow$: respuesta es contracción núcleo

Egras $\Rightarrow S_c \uparrow, T_c \uparrow, L \uparrow \Rightarrow E \uparrow \Rightarrow R_{env} \uparrow, T_{ef} \uparrow$

(1 \rightarrow 2) $t_2 = 7 \times 10^9$ años (edad)



$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4$$

$$T_{ef} \propto \frac{L^{1/4}}{R^{1/2}}$$

- se agota H: núcleo inerte de He con capa activa alrededor como sigue $X \downarrow$: $T_{ef} \uparrow$ pero casi isoterma (2 \rightarrow 3) $t_3 = 9 \times 10^9$ años

- núcleo inerte gana He y la capa de H activo se estrecha L aumenta menos que antes, la envoltura sigue expandiéndose y en este caso domina el crecimiento del radio $\Rightarrow T_{ef} \downarrow$ (domina R)

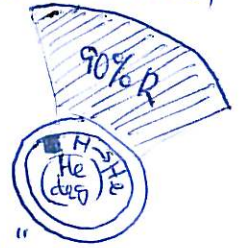
(3 \rightarrow 4) $t_4 \approx 10.2 \times 10^9$ años (se ha quemado 12% H)

Se llega al límite Schönberg-Chandrasekhar ($M_{core} \geq 0.12 M_{\odot} \Rightarrow$ núcleo y capa H se contraen bruscamente)

- en capa H: $\rho \uparrow, T \uparrow \Rightarrow E \uparrow \Rightarrow R_{env} \uparrow, L \uparrow$ } domina R $\Rightarrow T_{ef} \downarrow$ (4 \rightarrow 5)

- envoltura muy expandida (ocupa 97% exterior) $T \downarrow \Rightarrow$ convección, adiabática $dU + dW = 0$: se puede expandir a expensas de su energía interna en vez de a base de reacciones + contracciones, que ahora ya se manifiestan como $R \uparrow, T \rightarrow L \uparrow$ (5 \rightarrow 6) GB

El núcleo se ha contraído tanto que degenera.



- $T = 10^8 K \Rightarrow 3He \rightarrow C$ (triple α) "HB"

Núcleo degenerado $P \neq f(T) \Rightarrow$ respuesta violenta: "flash Helio" \Rightarrow

\Rightarrow gas nuclear pierde degeneración ($P = f(T)$) y responde con expansión \Rightarrow

\Rightarrow en capa H: $\rho \downarrow, T \downarrow \Rightarrow R_{env} \downarrow, L \downarrow$ } $T_{ef} \uparrow$ (6 \rightarrow HB)

- Hasta que el He se agota en núcleo y alrededor quedan dos capas activas de fusión de He y de H. Se entra en (AGB), fase complicada subdividida en fase temprana y fase térmicamente pulsante, donde se expulsan las capas exteriores, quedando el núcleo en forma de enana blanca. (SNI)

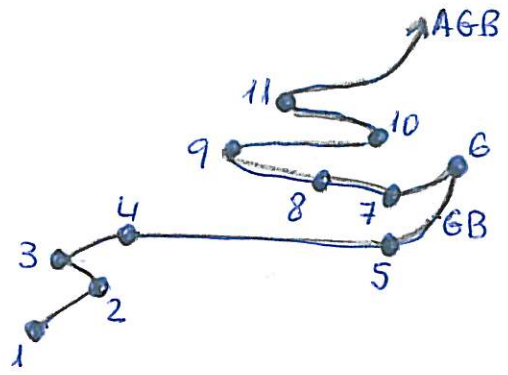
MASIVAS (5 Mo)

domina ciclo CNO: $\epsilon = \epsilon_0 \rho X X_{CN} T^{(13-20)}$

- $X \downarrow, \epsilon \downarrow$ núcleo se contrae menos

$E_{grav} \Rightarrow \rho_c \uparrow, T_c \uparrow, L \uparrow \Rightarrow \epsilon \uparrow \Rightarrow R_{env} \uparrow \left\{ \begin{array}{l} L \uparrow \\ T_{ef} \downarrow \end{array} \right.$

$1 \rightarrow 2$ $t_2 = 6.5 \times 10^7$ años (domina radio)



- se agota H: núcleo He vierte sin capa activa alrededor

falta de reacciones, contracción de toda la estrella $R \downarrow, E_{grav} \uparrow \Rightarrow T \uparrow, L \uparrow, T_c \uparrow$

$2 \rightarrow 3$
SNI

- T suficiente para reacciones en capa inmediata a convectiva

$\epsilon \uparrow \Rightarrow R_{env} \uparrow \left\{ \begin{array}{l} L \uparrow \\ T_{ef} \downarrow \end{array} \right.$ límite S-Ch no válido para núcleo convectivo \Rightarrow

\Rightarrow El núcleo se contrae sin esperar S-Ch, mientras envoltura se expande y se hace conv.

\downarrow
En capa activa $\rho \uparrow, T \uparrow \Rightarrow \epsilon \uparrow \Rightarrow R_{env} \uparrow \left\{ \begin{array}{l} L \rightarrow \\ T_{ef} \downarrow \end{array} \right.$ $4 \rightarrow 5$

- Envoltura convectiva (adiabática $\Rightarrow L \uparrow$) $5 \rightarrow 6$ GB rápida pero sin llegar a densidades para degenerar el núcleo de la estrella.

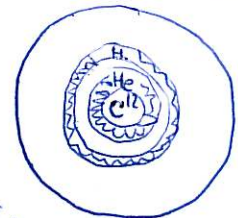
- $T = 10^8 K$ triple α en núcleo } respuesta: núcleo expande ($\rho \downarrow, T \downarrow$ en capa activa)
pero $P = f(T)$ } y envoltura contrae: $R_{env} \downarrow \left\{ \begin{array}{l} L \downarrow \\ T_{ef} \uparrow \end{array} \right.$ $6 \rightarrow 7$

- Núcleo sigue expandiéndose y envoltura contrayéndose pero con $L \rightarrow$ $7 \rightarrow 8$

- Poco a poco se agota He en núcleo, quedando un núcleo vierte de C. Comienza a contraerse núcleo pero aún no se entera toda la estructura $8 \rightarrow 9$

- Cuando lo hace, la envoltura se expande por contracción del núcleo ($\epsilon \uparrow$ en zona de He) $\Rightarrow R_{env} \uparrow \left\{ \begin{array}{l} L \downarrow \\ T_{ef} \downarrow \end{array} \right.$ $9 \rightarrow 10$ y se agota totalmente el He:

- Se invierte el momento porque en las capas activas (H sobre todo) $L \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_{env} \downarrow \\ T_{ef} \uparrow \end{array} \right.$ $10 \rightarrow 11$



- Cuando se paran las reacciones del H, nueva inversión:

$R_{env} \uparrow \left\{ \begin{array}{l} L \rightarrow \\ T_{ef} \downarrow \end{array} \right.$ en una fase muy similar a la $5 \rightarrow 6$: $11 \rightarrow AGB$

- En la fase AGB pulsante:

• si $M \sim 5 M_{\odot}$ se alcanza núcleo C, O degenerado ("flash de C") \xrightarrow{SNI} enana blanca

• si más masivas: en vez de flash, reinicio pausado de $C \rightarrow O$ y se alcanzan todas las fases hasta el Fe y la explosión como Supernova tipo II

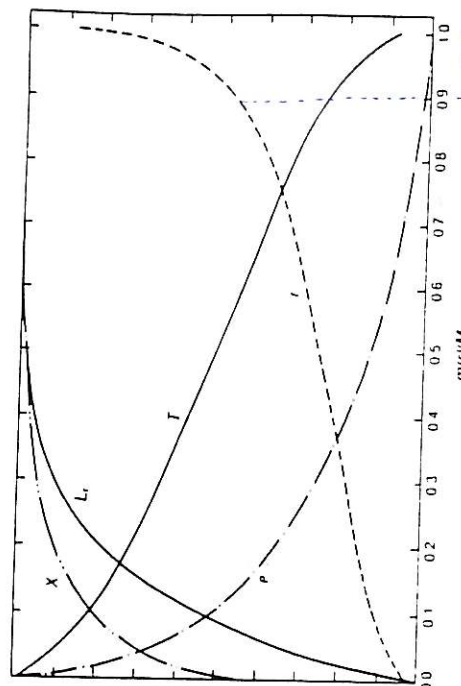


Figure 9.2. A 1 M model during main-sequence hydrogen burning at time 4.2699×10^7 years (between points 1 and 2 in Figure 9.1), showing radius, density, temperature, total luminosity, and hydrogen abundance versus mass fraction. The lower limits of the ordinate are zero. The upper limit for each curve is: $0.9681 R$, $\rho = 159.93 \text{ g cm}^{-3}$; $T = 1.591 \times 10^8 \text{ K}$; $L = 1.0575 L_{\odot}$, and $V = 0.708$, $P = 2.5186 \times 10^6 \text{ dynes cm}^{-2}$. The elapsed time is measured from the initial model for the phase before the main sequence.

Table 9.1
Elapsed time, in years, between numbered points on the evolutionary tracks in Figure 9.1. Numbers in parentheses are powers of 10 by which entries are multiplied

Mass (M_{\odot})	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
30	4.80 (6)	8.64 (4)	9.11 (4)	1.0 (4)	
15	1.010 (7)	2.270 (5)	2.17 (6)	7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.93 (5)	1.372 (6)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.17 (6)	1.031 (7)	7.512 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.647 (7)	4.805 (6)	4.218 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.490 (8)	1.310 (7)	1.829 (7)
1.5	1.553 (9)	8.10 (7)	1.049 (8)	1.049 (8)	2 (8)
1.25	2.803 (9)	1.824 (8)	1.045 (9)	1.463 (8)	-4 (8)
1.0	7 (9)	2 (9)	1.20 (9)	1.57 (8)	-1 (9)

Mass (M_{\odot})	6-7	7-8	8-9	9-10 ¹¹
30				
15			53.1 (4)	1.3 (4)
9	7.17 (5)	6.20 (5)	1.9 (5)	3.5 (4)
5	4.90 (5)	9.50 (4)	3.28 (6)	1.55 (5)
3	6.05 (6)	1.02 (6)	9.00 (6)	2.86 (4)
	2.51 (7)	4.08 (7)	6.00 (6)	7.69 (4)

Source: Adapted from I. Iben, Jr. 1967, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 5, p. 871

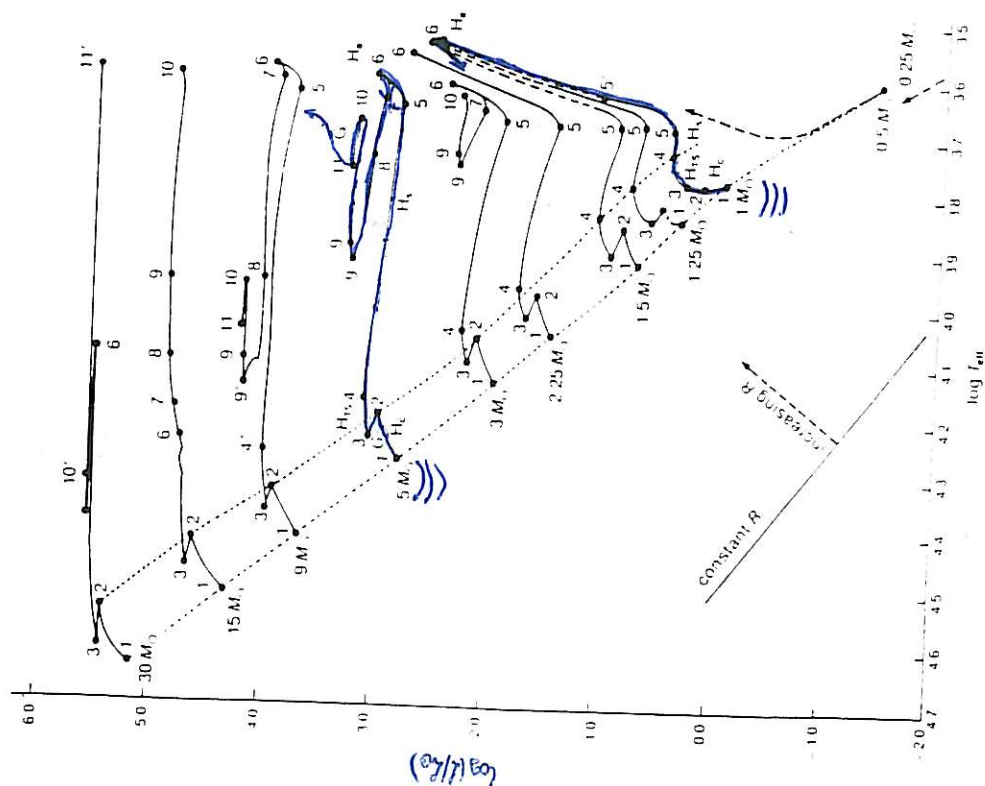


Figure 9.1. Evolutionary tracks for models of stars after the main sequence. Model mass is shown next to the initial point on zero-age main sequence. Dotted lines indicate boundaries of the main sequence shown in Table 9.1. The stages are labeled as H, hydrogen core burning; He, shell hydrogen burning; He, shell hydrogen burning; He, core burning; and C, gravitational energy release. The 15 M_{\odot} track does not reverse in the giant region, because the semiconvective region was treated as fully convective in this model.