

## Evolución estelar

# Las estrellas evolucionan más rápidamente según aumenta su masa.

# Diagrama  $HR$  de cúmulos estelares (grupos de estrellas de la misma edad y composición química) tiene una forma característica.

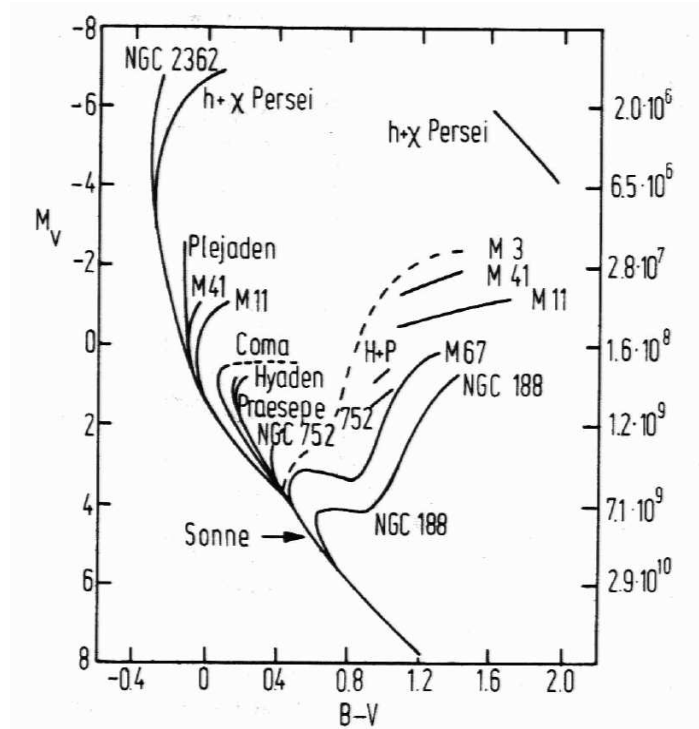


Figura 1: Diagrama color-magnitud para cúmulos abiertos. En el eje de ordenadas a la derecha está la edad correspondiente. M3 es un cúmulo globular

# Todas las estrellas por encima de un tipo espectral salen de la secuencia principal hacia arriba a la derecha. Forman una isocrona con una "rodilla", que indica que el tipo espectral correspondiente ha consumido  $\sim 12\%$  de  $H$  en su núcleo.

# La edad ( $\tau_{HR}$ ) del cúmulo viene dada por la "rodilla" (tipo espectral que sale de la secuencia principal).

# Las diferencias en el diagrama  $HR$  de distintos cúmulos indican diferencias en edades.

# La evolución estelar describe los etapas por los que pasa una estrella a lo largo de su vida.

# Etapas están determinada por el tipo de reacciones nucleares que tienen lugar en su interior estelar.

## Evolución estrella $M = 5M_{\odot}$ ( $B5 V$ )

# Punto de partida:

- Secuencia principal de edad cero (ZAMS)
- Composición química homogénea:  $\chi_H = 0,602$ ;  $\chi_{He} = 0,354$ ;  $\chi_{resto} = 0,044$  (estrella de la Población I).
- Valores centrales:  $T_0 = 26,4 \times 10^6 K$ ,  $\rho_0 = 16,4 g cm^{-3}$ .
- Domina ciclo  $CNO$ .
- Núcleo convectivo:  $\approx 21 \% M_{total}$ .
- Reacciones nucleares en la región hasta  $M_r/M = 0,07$

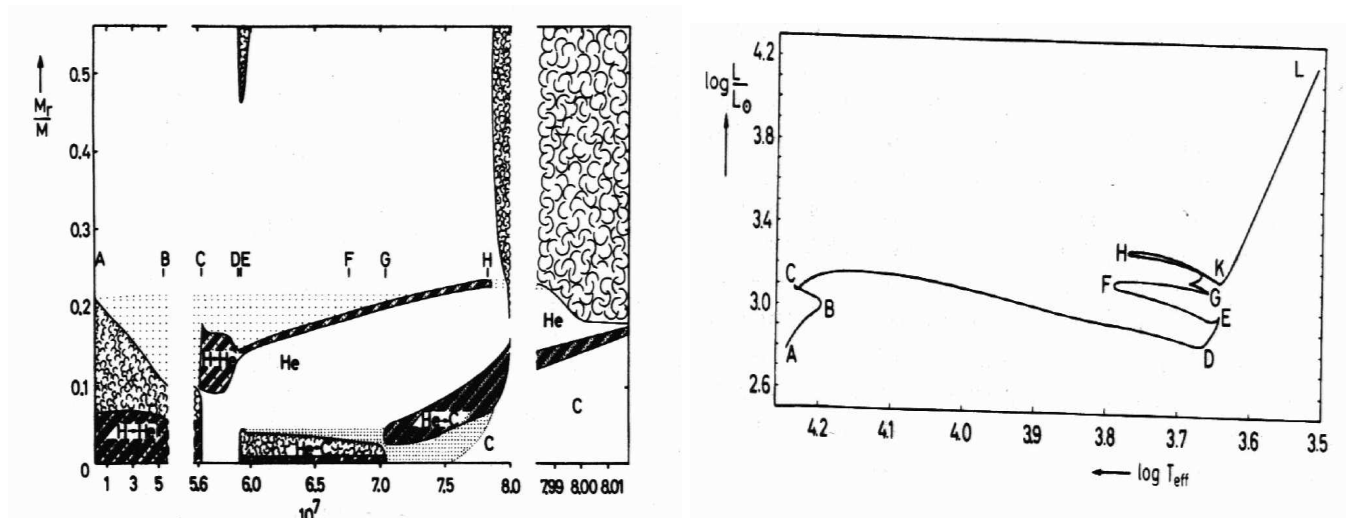


Figura 2: Izquierda: evolución del interior de una estrella de masa  $M = 5 M_\odot$ . Ordenadas se  $M_r/M$  como medida de la distancia al centro. En abscisas, la edad en unidades de  $10^7$  años. Derecha: Evolución en el diagrama HR desde su posición en la secuencia principal de edad cero a la fase de supergigante

- $A \rightarrow B$ : Se quema  $H$  (en  $M_r/M = 0,07$ ) hasta que la masa de  $H$  se reduce hasta un  $\sim 10\%$ . Tiempo:  $\sim 5,6 \times 10^7$  años.
- $B \rightarrow C$ : Reacoplamiento al final de esta fase. Muy rápido:  $5,37 - 5,62 \times 10^7$  años.
- $C \rightarrow D$ : Evolución hacia las gigantes rojas. Muy rápida:  $0,3 \times 10^7$  años.
  - Cáscara (distancia  $\sim M_r/M = 0,12$ ) con conversión de  $H$  en  $He$ .
  - Núcleo se contrae y gana energía hasta que  $T \sim 10^8 K$
  - Simultáneamente hay una expansión de las zonas más externas
- $D \rightarrow H, K$ :  $He$  en  $C$  hasta que se consume. Duración:  $\approx 8 \times 10^7$  años.
- $K \rightarrow L$  Núcleo de  $C$ . Cáscara fina donde se quema  $He$ . “Rama asintótica de las gigantes”.
- Núcleo C/O se contrae. Capas externas se expanden.
- $L$ : Surge la supergigante roja.
- Interior con una zona convectiva con masa  $\sim 80\%$  de  $M_*$

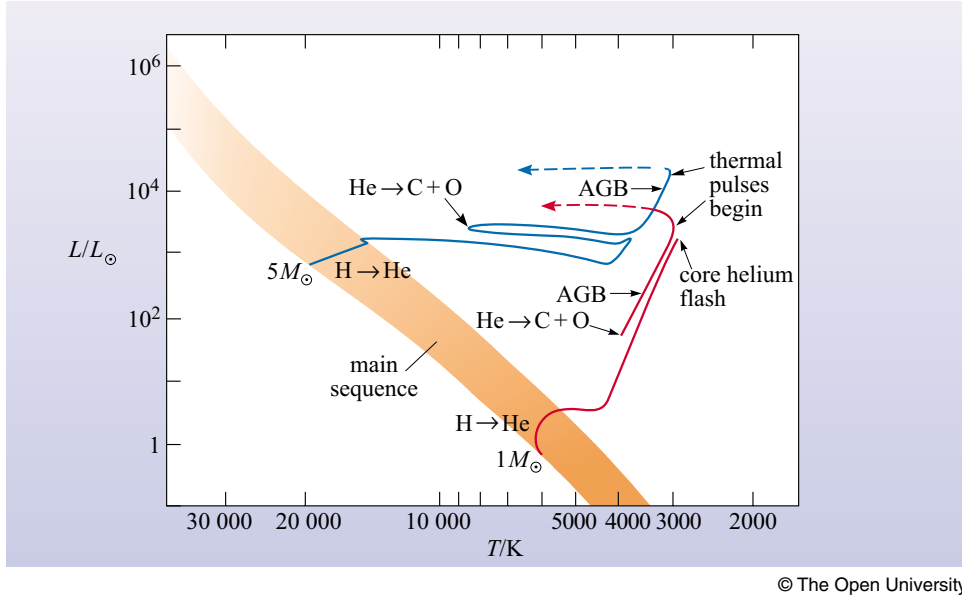


Figura 3: Evolución en el diagrama HR de una estrella de masa  $5 M_{\odot}$  y otra de  $1 M_{\odot}$ . Los procesos nucleares están indicados en las distintas etapas

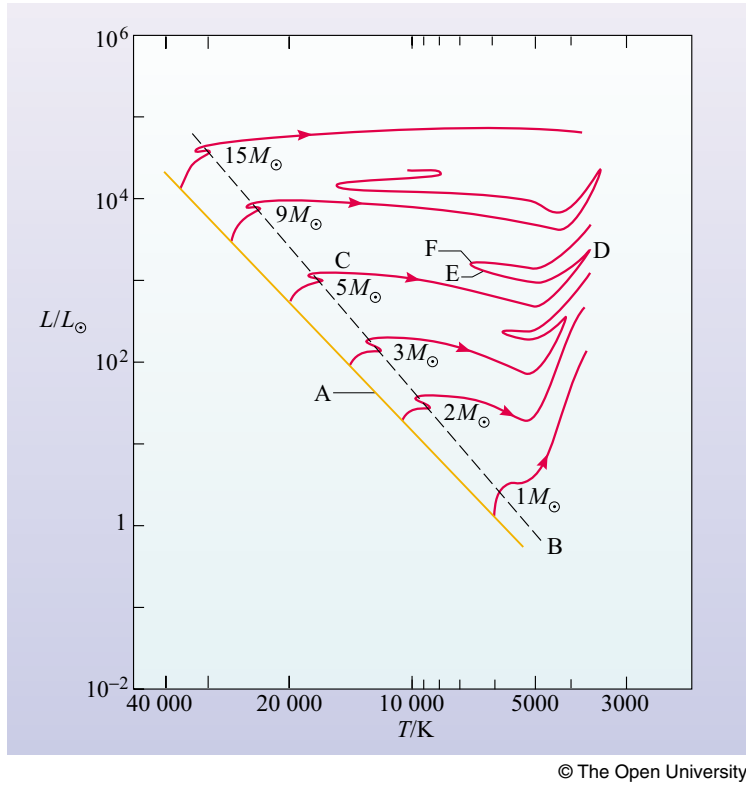


Figura 4: Trayectorias evolutivas en el diagrama HR para estrellas de la Población I.

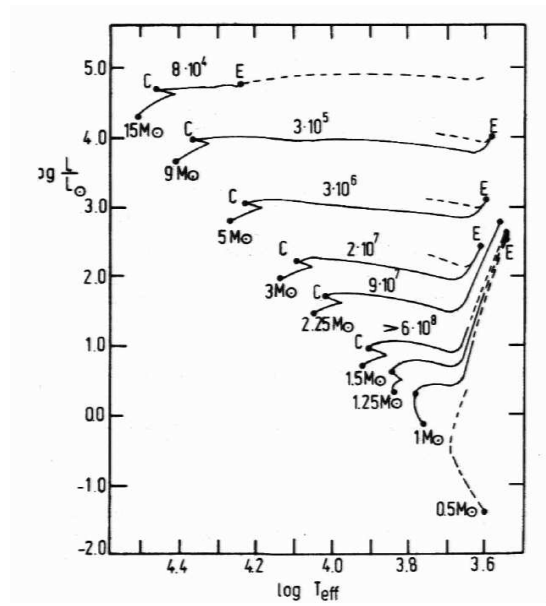


Figura 5: Trayectorias evolutivas en el diagrama HR para estrellas de la Población I. Los números sobre las curvas dan el tiempo de evolución de C a E

- # La mayor parte de la vida de una estrella transcurre en la SP.
- # Si la masa estelar es lo suficientemente grande, después de formarse el núcleo de  $C$ ,  $O$  se dan sucesivas contracciones y aumenta  $T$
- #  $C$  y  $O$  experimentan sucesivas reacciones nucleares.
- # Se acaba en un núcleo de  $^{56}Fe$  (elementos más pesados requieren reacciones endotérmicas)
- # Se forma una estructura de “cebolla”.

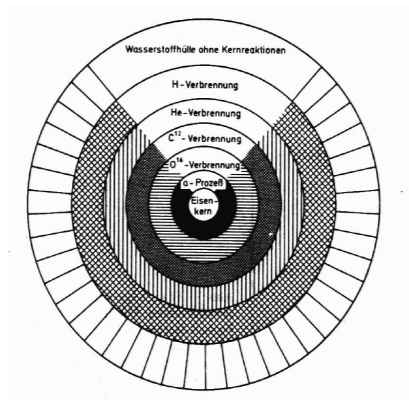


Figura 6: Estructura esquemática de una estrella una vez consumido el combustible nuclear

# Posteriormente: sucesivas contracciones en el núcleo originan densidades muy elevadas.

# Sólo se libera energía térmica y gravitacional.

# Se produce un enfriamiento por la radiación que se emite y disminuye la luminosidad

# Se llega a un nuevo estado de "equilibrio" cuando el gas está completamente degenerado  $\rightarrow$  *enana blanca* con radio del orden de  $0.01 R_{\odot}$ .

# Alternativamente dependiendo de la masa estelar inicial  $\rightarrow$  se llega a *estrellas de neutrones* o *agujeros negros*.

- Estrellas  $0.5M_{\odot} \leq M_* \leq 4M_{\odot}$ : reacciones nucleares acaban con *He* (núcleo de *C, O*) – Viento estelar intenso  $\rightarrow$  \* pierde la cáscara de *H* (gran parte de su masa)  $\rightarrow$  Nebulosas planetarias (\* centrales “núcleo” de *CO*)  $\rightarrow$  enanas blancas
- Estrellas  $4M_{\odot} \leq M_* \leq 8M_{\odot}$ : i) Quema “tranquila” de *CO* (Miras, OH/IR); ii) Se puede producir un “flash” de *He* con un desprendimiento enorme de energía (no observada debido a la enorme opacidad de la envoltura) (flash también en \* de menor masa)
- Estrellas  $M \sim 10M_{\odot}$  atraviesan todo el ciclo de combustión nuclear hasta convertirse en una supernova.