

LFIS223

# Astronomía General

Mónica Zorotovic

## Tema 6

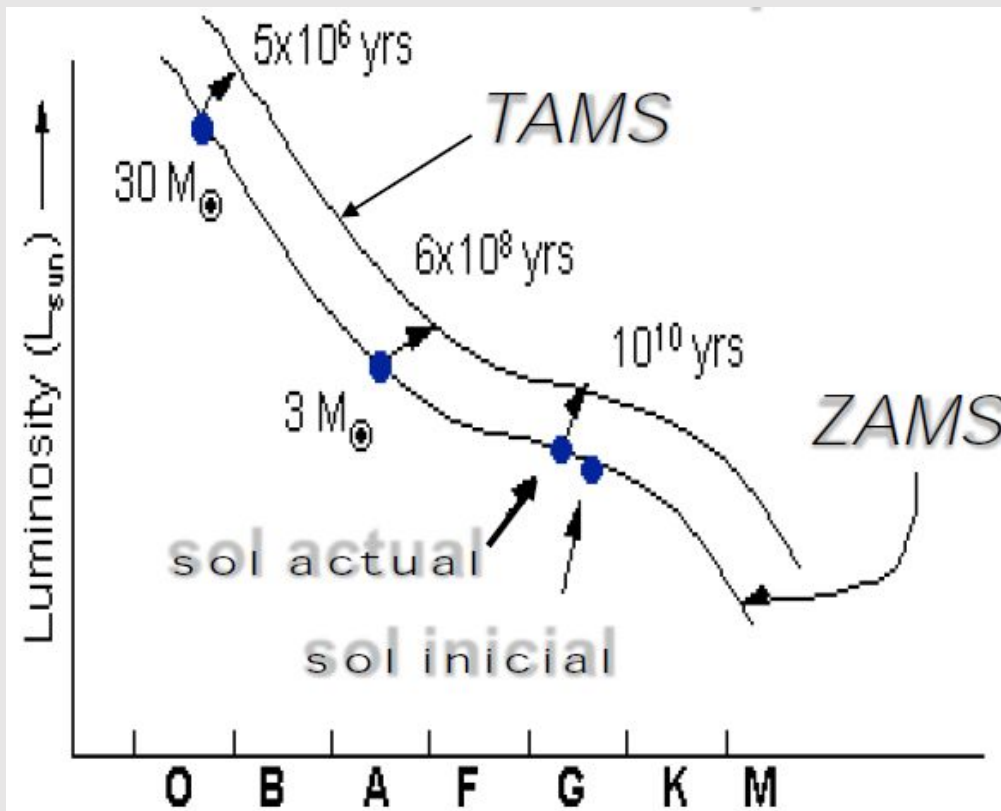
c) Evolucion Estelar, SP y post SP

18/10

# Tiempo de vida en la SP

El tiempo de vida en la secuencia principal, depende de la masa.  
**Estrellas más masivas evolucionan más rápido**, porque tienen mayor temperatura central (mayor tasa de quema).

$$\rightarrow t_{SP}/t_{SP\odot} \sim 1/M^{2.5} \quad \text{con } t_{SP\odot} \sim 10^{10} \text{ yr}$$



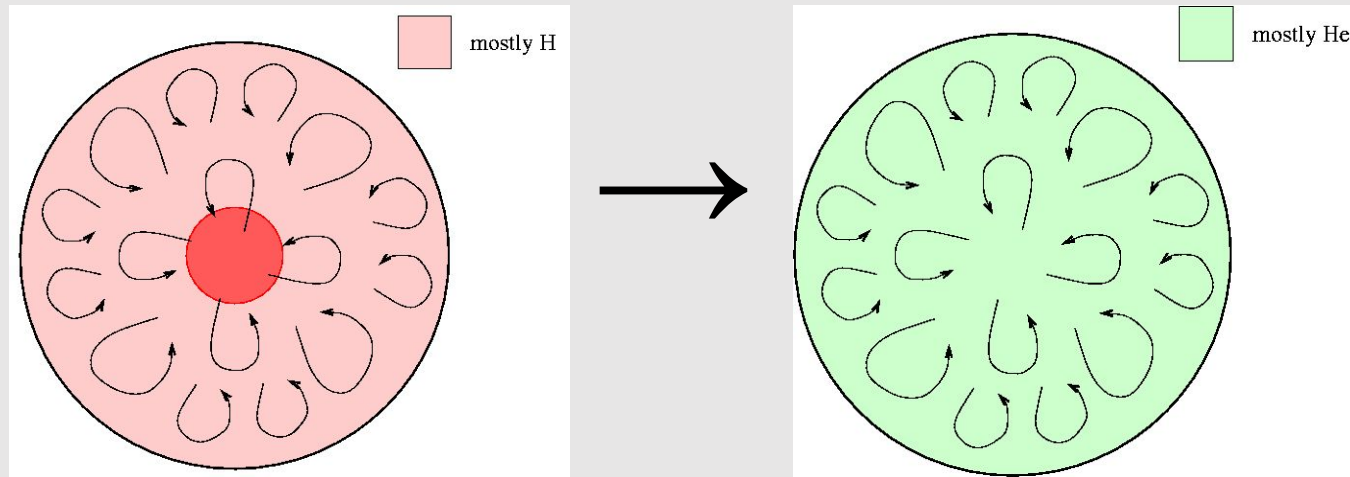
Cuando se agota el H en el núcleo, la estrella se ubica sobre la **TAMS** (terminal age main sequence)

# Estrellas de baja masa

Para estrellas como el sol, al final de la SP (TAMS) tenemos un núcleo de He, y una envoltura con composición similar a la inicial (el material del núcleo no se mezcla con la envoltura).

Sin embargo, las estrellas con  $M \lesssim 0.3-0.5 M_{\odot}$  son completamente convectivas.

→ H se convierte en He en la parte más central del núcleo, pero la convección mezcla el material rico en He a toda la estrella



# Estrellas de baja masa

Cuando queda poco H  $\rightarrow$  baja la tasa a la que se genera energía  $\rightarrow$  la gravedad hace que las capas externas colapsen hacia el núcleo.

**No experimentan fase de gigantes, ni tampoco T sube nunca lo suficiente para encender el He.**

Al agotarse el H la estrella lentamente se va achicando y enfriando, hasta convertirse en una pelota fría del tamaño de la tierra (enana blanca de Helio)

Esto es sólo una especulación teórica, porque el tiempo de vida en la SP es muy largo para bajas masas. Ejemplo: una estrella de  $0.5M_{\odot}$  puede vivir en la SP  $\sim 50$  Gyr, y una de  $0.2M_{\odot}$   $\sim 1000$  Gyr (edad del Universo  $\sim 13.8$  Gyr)

\*Existen enanas blancas de He, pero no se forman de esta forma, como veremos cuando hablemos de enanas blancas

# Evolución después de la SP

Para estrellas no completamente convectivas, el material no se mezcla, por lo que hay una envoltura con composición química inicial (mucho H).

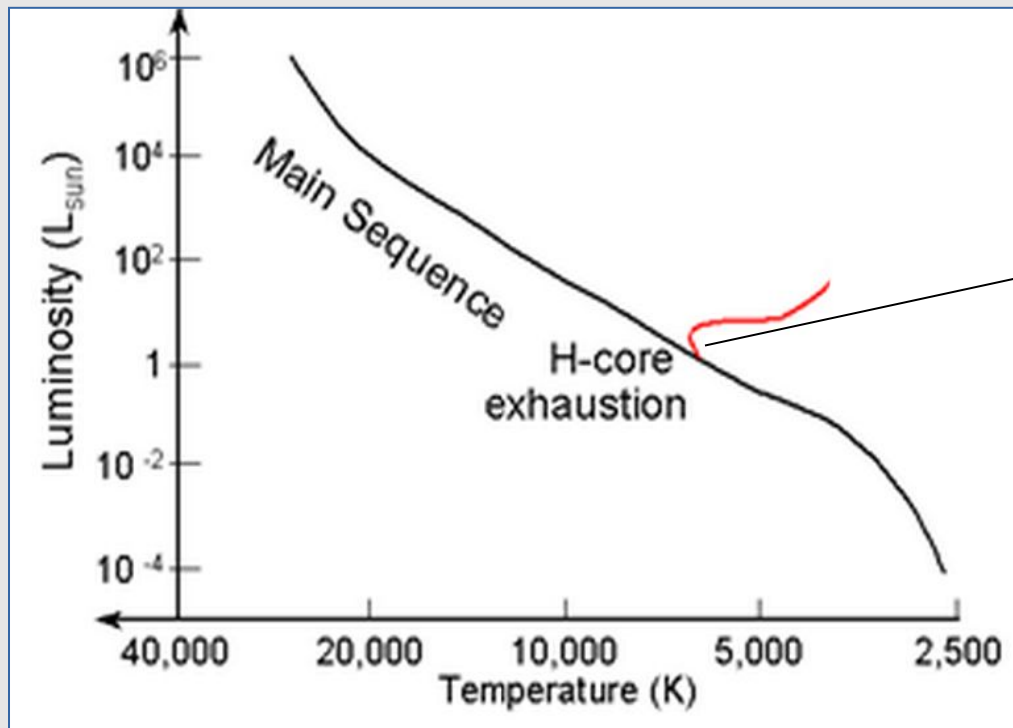
Cuando se agota el H en el núcleo, la presión de radiación que lo sostiene cesa (ya no hay reacciones nucleares).

→ **Inicialmente toda la estrella se contrae en una escala de K-H** (mucho más rápido que la contracción por el aumento de  $\mu$  durante la SP).

→ **Aumento de  $T_c$  y  $\rho_c$ .**

# Evolución después de la SP

Contracción + energía gravitacional liberada  $\rightarrow$   **$L$  y  $T_{\text{eff}}$  aumentan un poco**

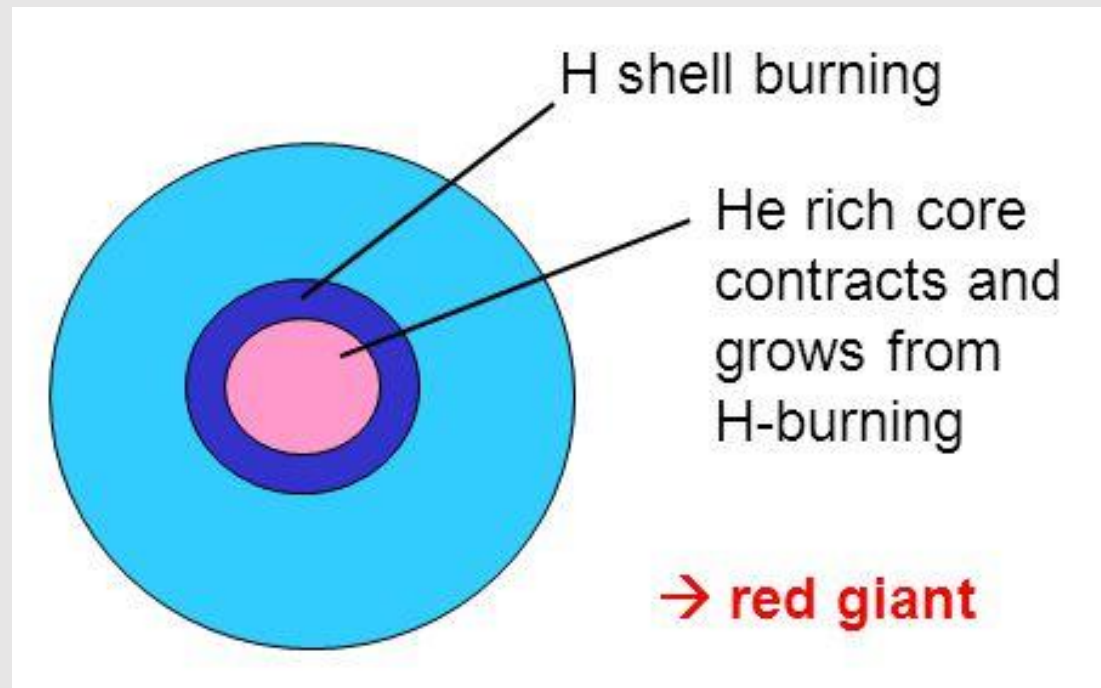
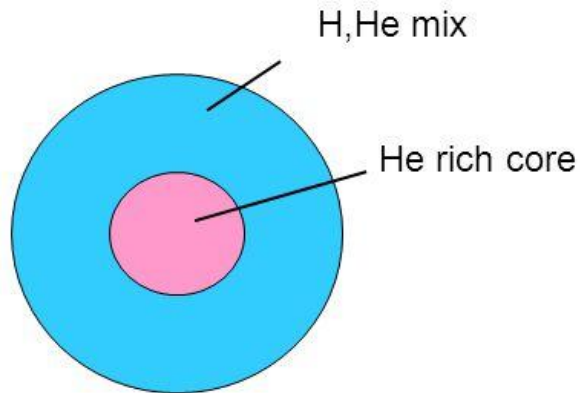


La estrella se mueve inicialmente hacia arriba de la SP y un poco a la izquierda

# Quema de H en una capa

Como también aumenta la temperatura de las capas alrededor del núcleo, que todavía son ricas en H, se alcanza la temperatura para **quemar H en una capa concéntrica**.

Core contracts and heats

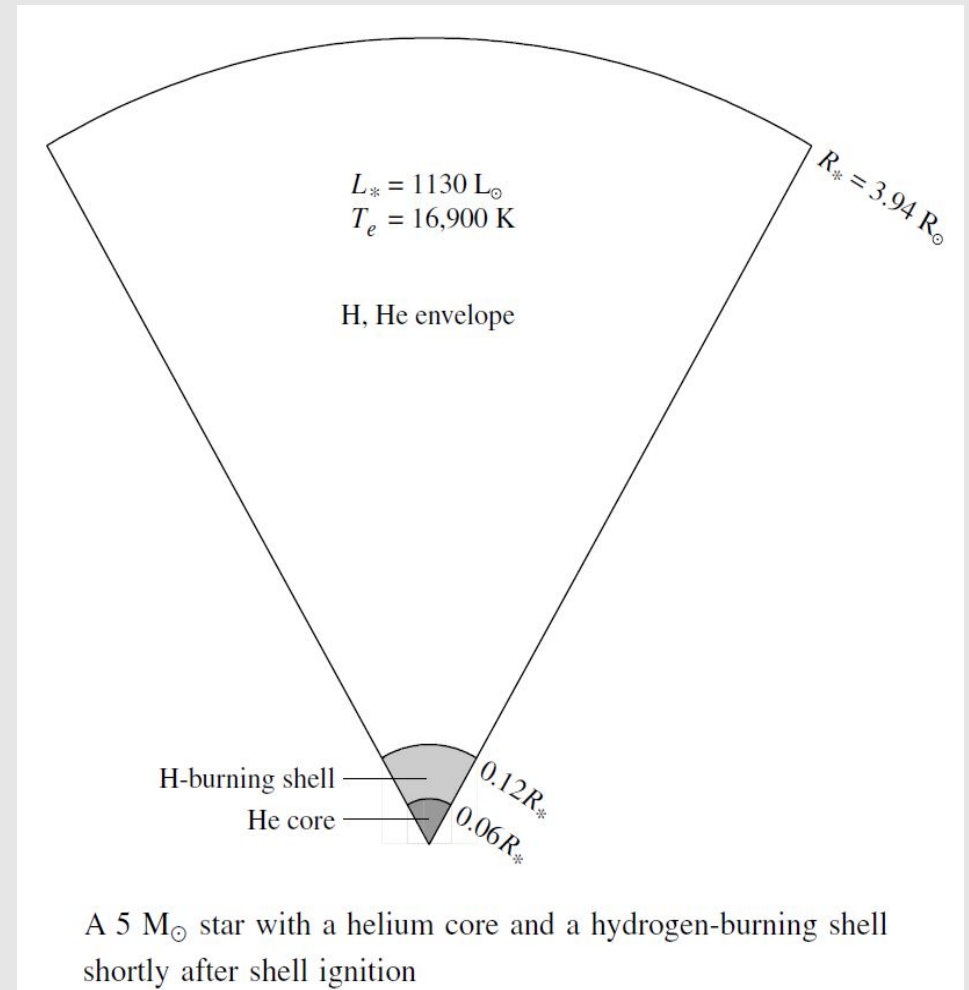


# Quema de H en una capa

La **energía generada en la capa es mayor que** cuando quemaba H **en el núcleo** (mayor volumen de masa y área superficial).

Esto expande un poco la envoltura y aumenta la luminosidad.

\*Notar que el radio aún no es tan grande. Aún no es una gigante





# Quema de H en una capa

Ahora la estrella tiene un **núcleo inerte de He**, con una **capa de H quemando** y una envoltura de H inerte.

Como toda la energía viene de una capa concéntrica, el **núcleo** no puede mantener un gradiente de temperatura y se vuelve **isotérmico**

**Núcleos isotérmicos** son una característica de estrellas que solo tienen **una fuente de energía en capas** (sin quema en el núcleo).

# Límite de Schönberg-Chandrasekhar

El núcleo va aumentando su masa, ya que la capa que quema H sobre él va depositando más y más He al núcleo.

Existe un límite superior para la masa que un núcleo ISOTÉRMICO, INERTE y NO DEGENERADO puede soportar, gracias a la presión de radiación.

El **límite de Schönberg-Chandrasekhar**

$$M_c \simeq 0.37 \left( \frac{\mu_{\text{env}}}{\mu_c} \right)^2 M$$

Este límite se alcanza cuando cerca del **10% del H original se ha fusionado.**

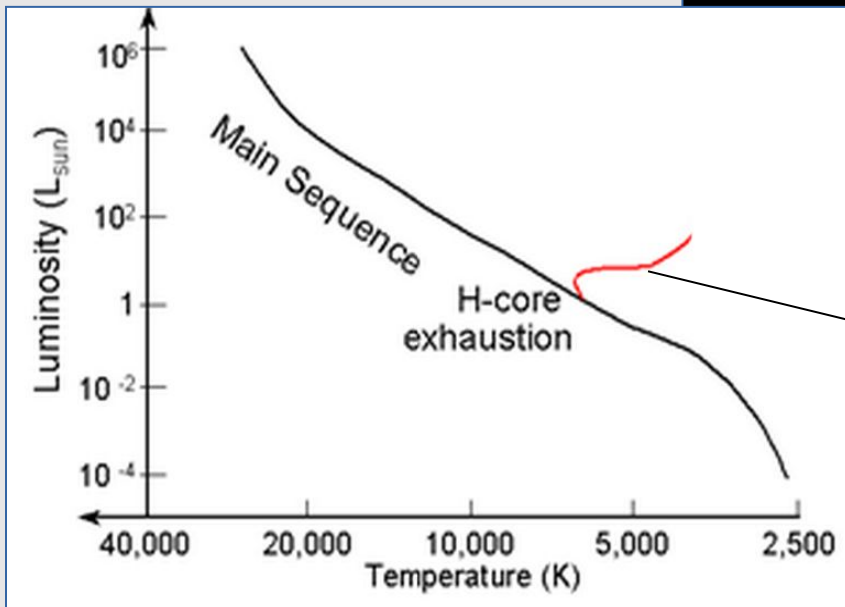
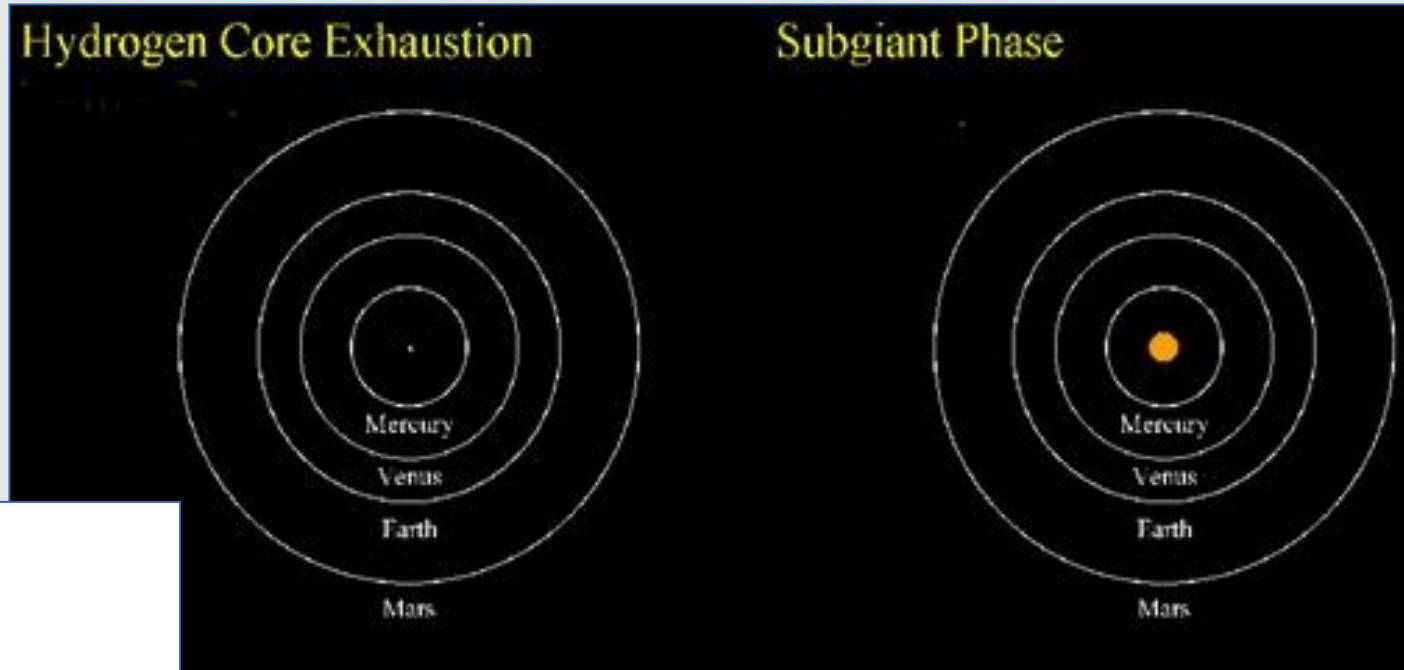
# Límite de Schönberg-Chandrasekhar

El núcleo ya no puede soportarse a sí mismo y a las capas sobre él contra la gravedad, y comienza a **colapsar en una escala de tiempo térmica (Kelvin–Helmholtz)**, la cual es:

- lenta comparada con la escala de tiempo dinámica (de caída libre)
- rápida comparada con la escala de tiempo nuclear (que ha gobernado la evolución en la SP).
- **El núcleo se vuelve más denso y caliente, y vuelve a tener un gradiente de temperatura.**
- Se libera mucha energía gravitacional, que **expande y enfría mucho la envoltura.**

# Subgigante

Aunque hay más producción de energía y la estrella es más brillante, la **temperatura efectiva disminuye** por el aumento de  $R$ .



## Fase de sub gigante

La estrella se mueve rápidamente hacia el rojo en el diagrama HR

# Principio de Espejo

Una forma de entender la acción de una fuente de reacciones nucleares en una capa concéntrica, es el **principio de espejo**.

Si existe una única capa en la cual se producen reacciones nucleares, el **material interior a la capa** (más cerca del núcleo) se **contrae**, mientras que el **material externo a la capa** (la envoltura) se **expande**.



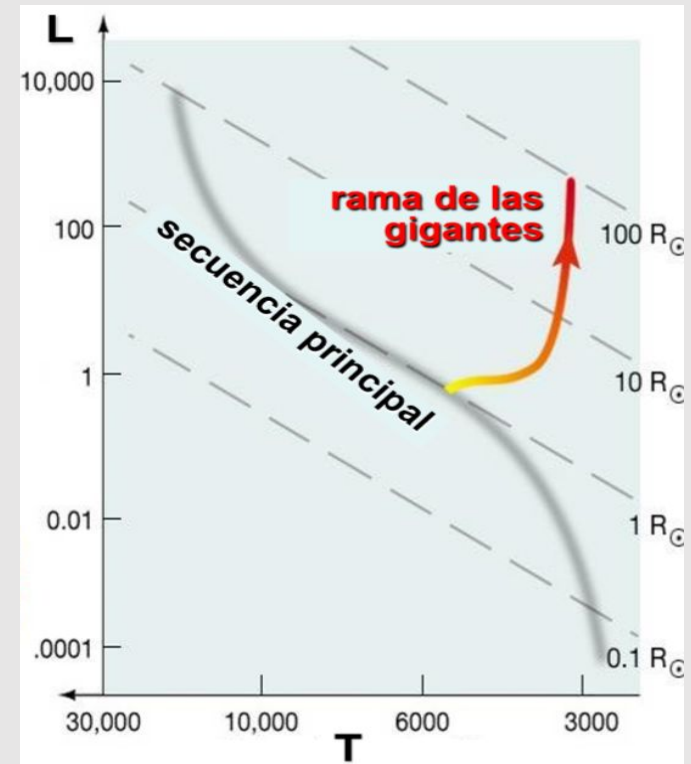
# Gigante roja (RGB)

A medida que el núcleo se contrae más y más y la quema de H en capa sigue, la envoltura se expande mucho, se enfría. Los átomos neutros pueden absorber radiación y **la envoltura se vuelve opaca** → El calor no puede escapar fácilmente por radiación y la envoltura se vuelve **convectiva**.

Cuando una fracción importante de la envoltura se ha vuelto convectiva, la estrella seguirá un camino evolutivo de **Hayashi inverso**.

Aumenta la luminosidad por aumento del radio, a  $T_{\text{eff}}$  casi constante ( $T_{\text{eff}}$  no puede disminuir más o no sería estable).

La estrella se convierte en una gigante roja.



\*La fase de subgigante es muy rápida, por eso también se conoce en el diagrama HR como Gap de Hertzsprung (HG)

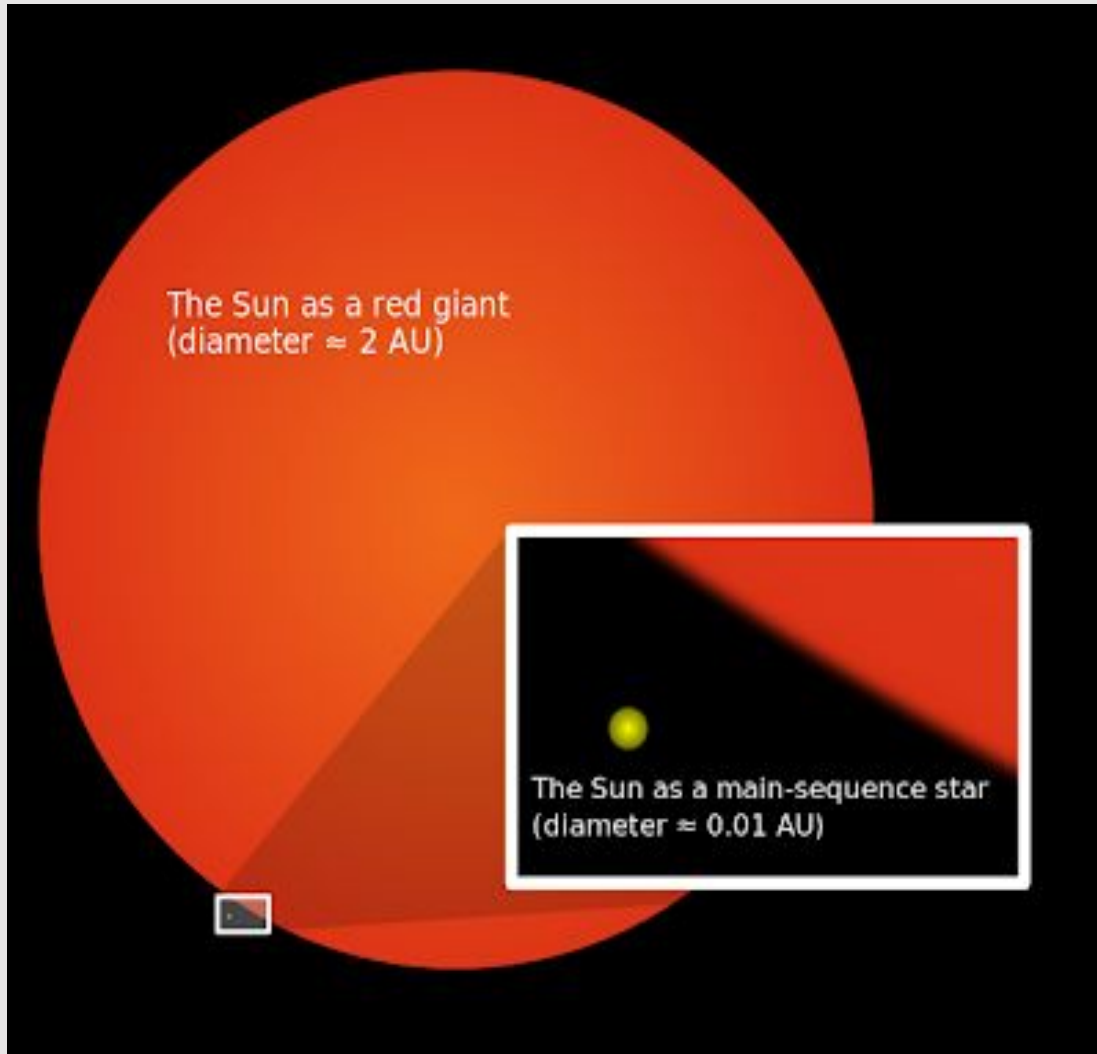
# Gigante roja (RGB)

La estrella tiene ahora un núcleo de He denso e inerte, con una zona de H fusionándose alrededor, y una envoltura extensa, difusa y convectiva de H inerte, con temperatura superficial baja: en esta etapa se denomina **gigante roja**.

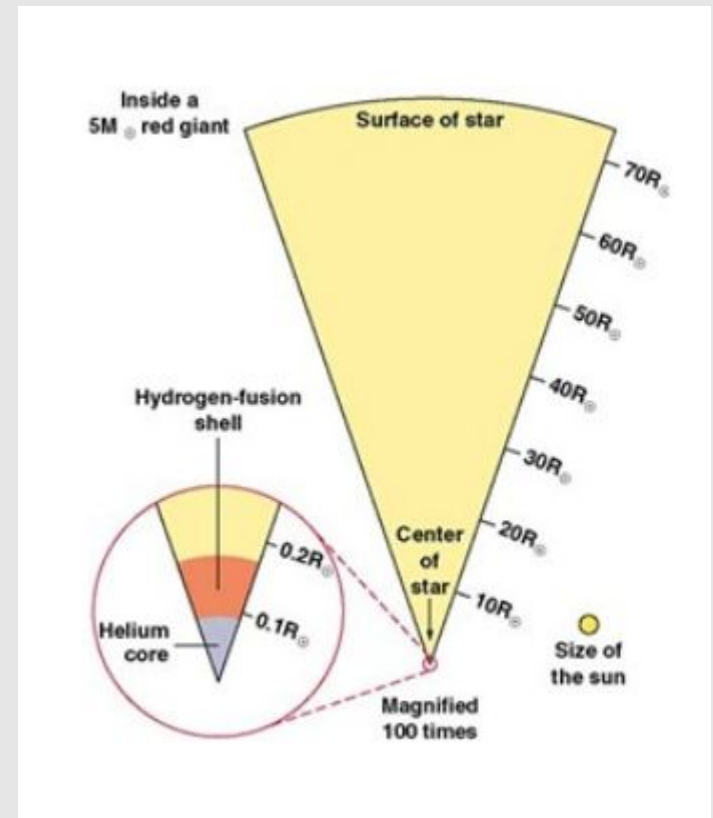




# Gigante roja (RGB)



Gigantes rojas muy extendidas pueden presentar pérdida de masa importante (tasas de hasta  $10^{-6} M_{\odot}/\text{año}$ ).

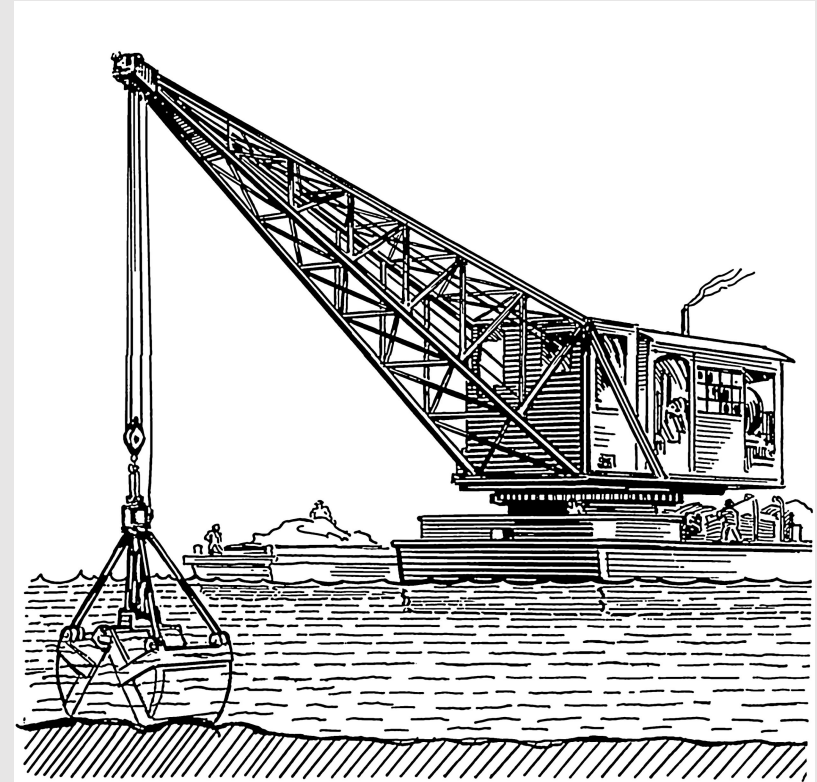




# Primer “dredge up” (dragado)

La envoltura convectiva es muy profunda. Se extiende desde las capas más externas hasta una región donde el H ya ha sido parcialmente convertido en He.

La convección permite el traslado de material hacia la superficie, afectando las abundancias superficiales de C, N y O.



Se puede ver cambio en las abundancias superficiales

En particular, se observa una disminución de las razones  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  y C/N

# Fin de la RGB: Ignición del Helio

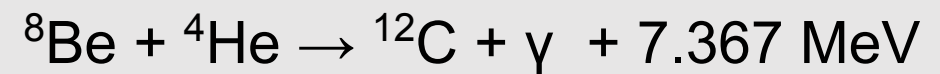
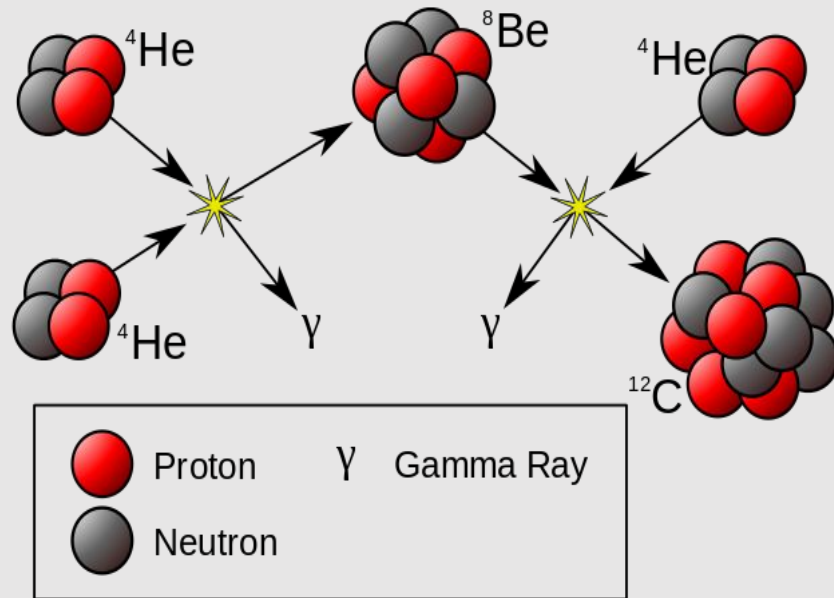
El núcleo, al no tener reacciones nucleares, continúa contrayéndose y calentándose (virial), aumentando además la cantidad de He a medida que la capa que fusiona H le va tirando “cenizas” de He.

Eventualmente, el núcleo alcanzará la temperatura (y densidad necesaria de He) para **comenzar la fusión de Helio por la reacción triple  $\alpha$**  ( $T \sim 0,8 \times 10^8 \text{K}$ )

**El inicio de la quema de He señala el fin de la rama gigante roja.**

# Fusión de He: Proceso triple- $\alpha$

3 núcleos de  $^4\text{He}$  (partículas alpha) se transforman en  $^{12}\text{C}$ .



Las 3 partículas  $\alpha$  chocan en forma casi simultánea (chocan dos y en menos de  $10^{-8}$  segundos se une una). Sino el  $^8\text{Be}$ , que es muy inestable, se desintegra en 2 partículas alpha.  $^8\text{Be} \rightarrow 2 ^4\text{He}$

Una reacción secundaria del proceso  $3\alpha$  es la fusión de un núcleo de  $^{12}\text{C}$  con otra partícula  $\alpha$ , resultando  $^{16}\text{O}$  estable:  $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$

**La quema de He produce C y O**

# Generación de energía

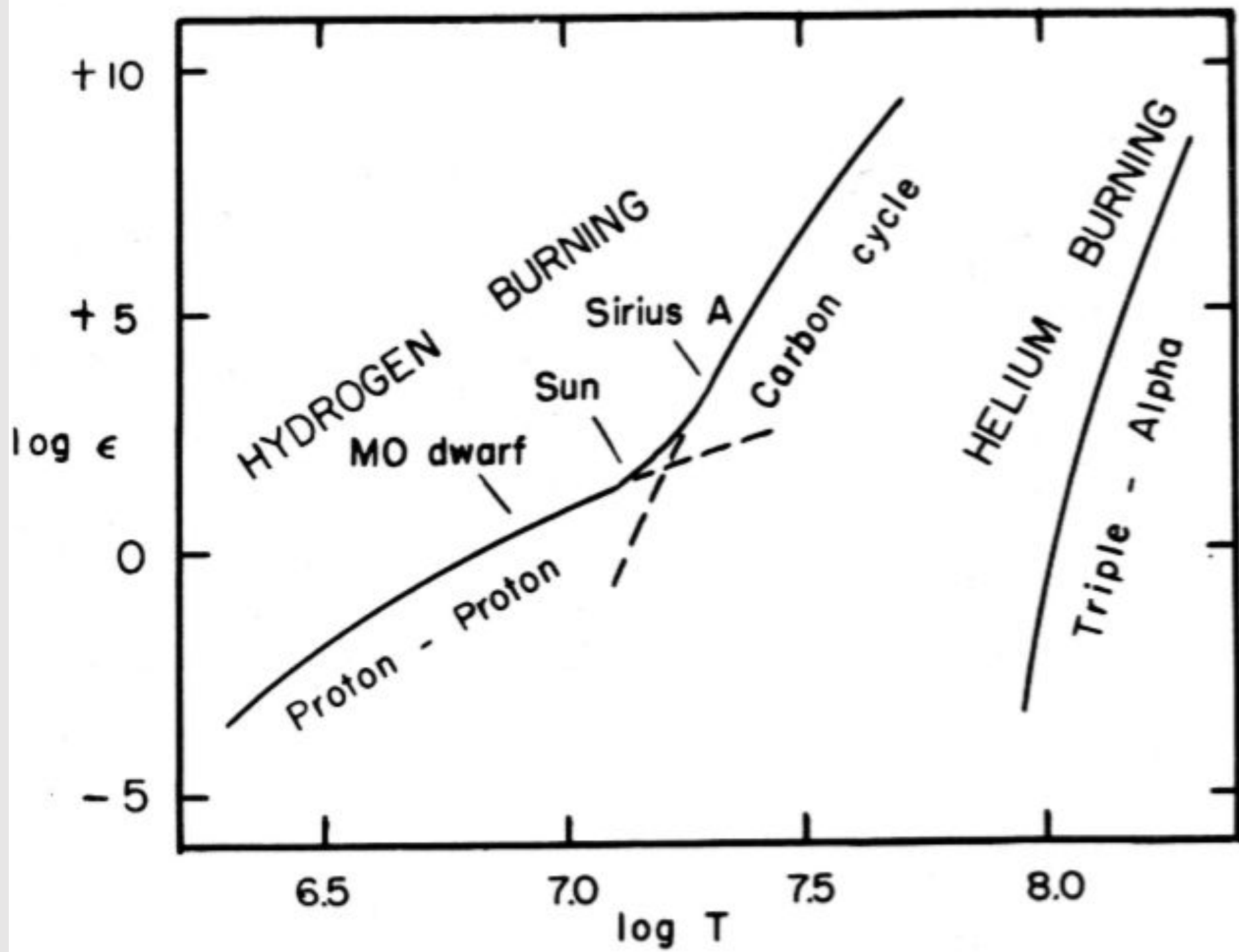
La generación de energía por unidad de masa para el proceso triple alfa es

$$\epsilon_{3\alpha} \propto \rho Y^3 T_8^{41,0}$$

Recordemos que para la quema de H teníamos

$$\epsilon_{pp} \propto \rho X^2 T_6^4$$

$$\epsilon_{CNO} \propto \rho XX_{CNO} T_6^{19,9}$$



# Ignición del Helio

La ignición del Helio es muy distinta dependiendo de la **masa** de la estrella.

Durante la etapa de gigante, el **núcleo** se sigue **contrayendo** (no hay reacciones nucleares dentro) y **aumenta su densidad**. Pero no puedo aumentarla para siempre.

- En estrellas de baja masa ( $\lesssim 2.25M_{\odot}$ ), el **núcleo se degenera durante la fase de gigante roja**, antes de alcanzar la temperatura de quema de He. Como sigue recibiendo He de la capa que está quemando, eventualmente logrará fusionarlo, pero cuando ya está degenerado  $\rightarrow$  comienzan a **quemar He violentamente**  $\rightarrow$  **FLASH**

- En estrellas con masa  $\gtrsim 2.25M_{\odot}$ , la temperatura para fusionar He se alcanza **ANTES** de que el núcleo se degenerere.  $\rightarrow$  comienzan a **quemar He de manera estable**.

# Flash del núcleo de He

En un gas no degenerado, las reacciones nucleares se autoregulan: una reacción nuclear aumenta la generación de energía, aumenta la temperatura y por lo tanto la presión, y se produce una pequeña expansión y enfriamiento, la tasa de reacciones no sube dramáticamente.

En cambio, en el **gas degenerado** la **presión** es esencialmente **independiente de la temperatura** (porque no proviene de los movimientos térmicos).

**Un aumento de  $T$  no aumenta la presión  $\rightarrow$  no se expande ni se enfría.**

Cuando el He comienza a quemarse, sube  $T$  pero no  $P$  en el núcleo y por lo tanto no se expande ni enfría. El aumento de  $T$  aumenta la tasa de reacciones nucleares, que suben más  $T$  sin expandir, más reacciones...

**$\rightarrow$  Flash del núcleo de Helio**

# Flash del núcleo de He

La materia degenerada es buena conductora y el núcleo es casi isotérmico, por lo que la quema descontrolada sucede en CASI todo el núcleo.

Se quema gran parte del He del núcleo en pocos segundos.

Se genera una energía extrema, pero casi no se observa un efecto en la luminosidad ya que esta energía es absorbida por la enorme atmósfera extendida que tenía la gigante.

**→ Hay pérdida de masa**



# Flash del núcleo de He en el sol

En el caso del sol, su núcleo se volverá degenerado en la etapa de gigante roja cuando su densidad y temperatura sean:

$$\begin{aligned}\rho_c &> 10^3 \text{ g/cm}^3 \\ T_c &\sim 2 \times 10^8 \text{ K}\end{aligned}$$

Es decir, a una densidad de 1000 veces la densidad del agua, y una temperatura que todavía es baja para quemar He.

Cuando el núcleo alcanza los  $\sim 10^8 \text{ K}$ , el He del núcleo se encenderá explosivamente.

Con el aumento dramático de temperatura, llegará un momento en que la presión de radiación excederá la presión producida por los electrones degenerados. En ese momento decimos que **se remueve la degeneración** (ya no se considera materia degenerada porque la presión que domina contra el colapso vuelve a ser la presión de radiación, que SI depende de  $T$ ).

→ Aumento de  $T$  aumenta  $P$  en el núcleo → **El núcleo se expande y la quema de He se vuelve estable (se autoregula)**

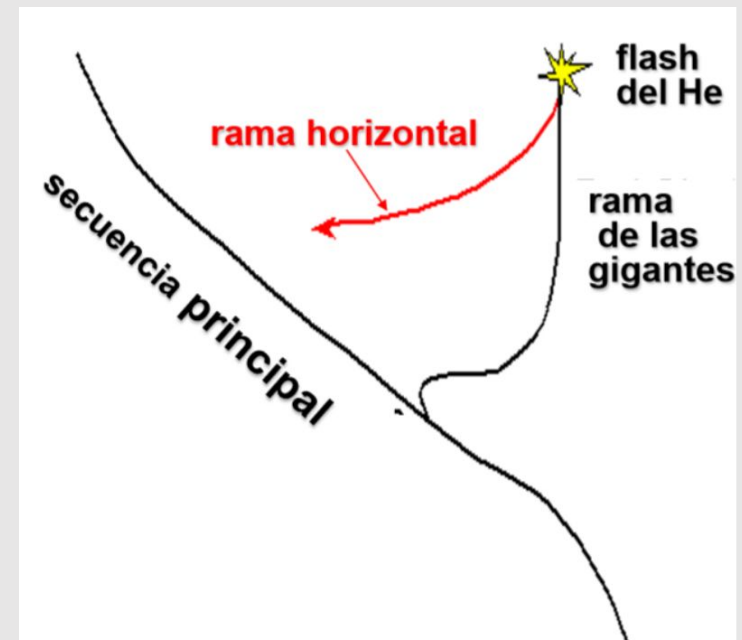
El inicio de la quema de He, ya sea de forma estable (en estrellas masivas) o explosiva, señala el fin de la rama gigante roja.

→ La expansión del núcleo (por ignición estable de He o tras remover la degeneración en el caso de estrellas de baja masa), empuja a la capa que quema H hacia afuera, enfriándola.

→ La tasa de generación de energía en la capa disminuye, causando una **abrupta disminución en L**

→ Las **capas externas se contraen aumentando  $T_{\text{eff}}$**

La estrella se mueve a la izquierda y hacia abajo en el diagrama HR para ubicarse en la rama horizontal

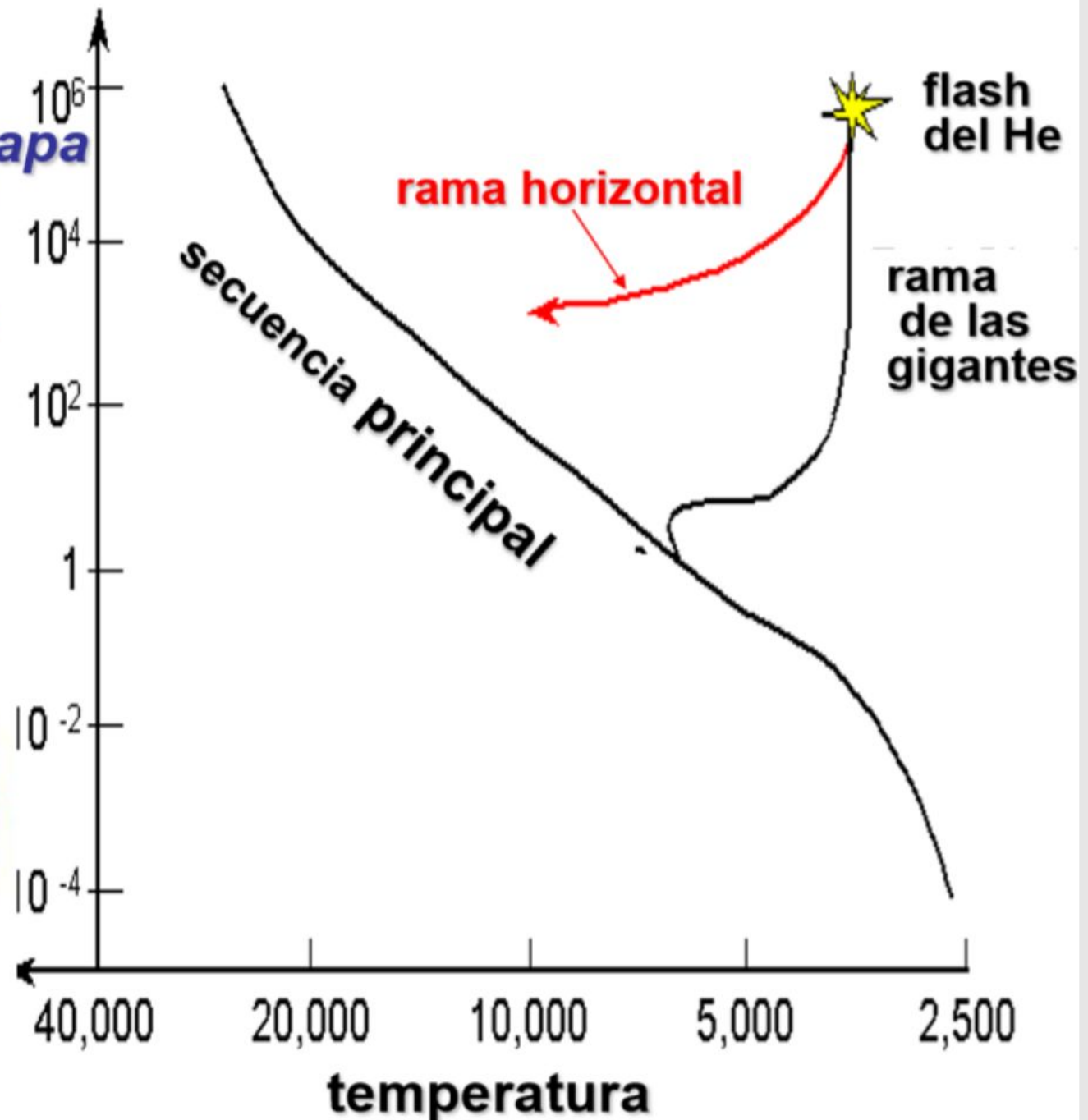


las capas exteriores de la estrella se contraen

$L \downarrow, T \uparrow, R \downarrow$

quemando  $H$  en una capa que rodea el corazón y  $He$  en el corazón

la estrella se ubica en la rama horizontal

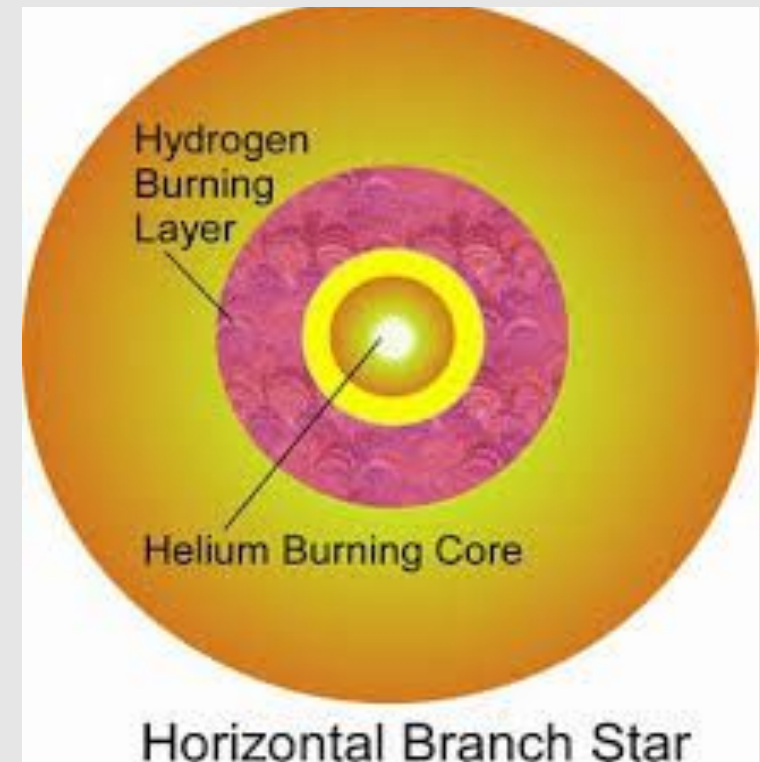


# Rama Horizontal

## Quema estable de He en el núcleo

Una vez que comienza la **quema estable de He en el núcleo**, comienza la rama horizontal, o **secuencia principal de Helio**

- Núcleo fusionando He de manera estable.
- Capa alrededor del núcleo también de He pero no quemando
- Capa que quema H más afuera, sigue siendo la fuente dominante en la generación de la luminosidad.
- envoltura de H inerte



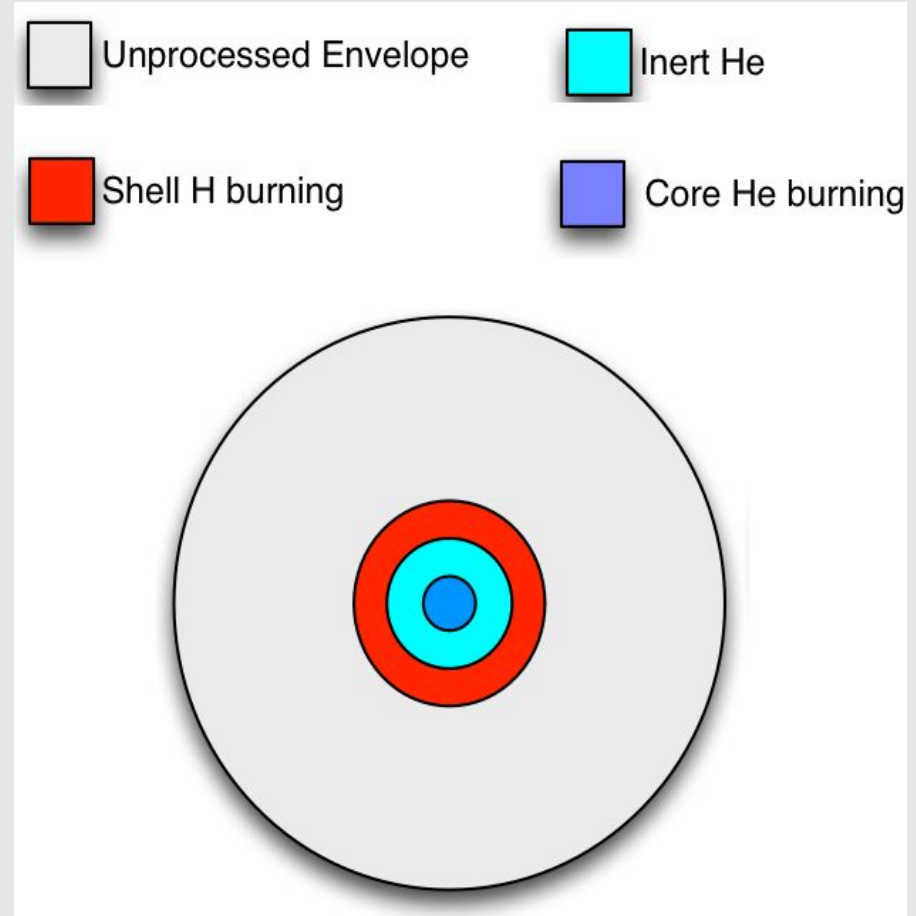
# Rama Horizontal

## Quema estable de He en el núcleo

Proceso triple  $\alpha$ , genera C y O en el núcleo, que quema de forma estable (ya NO hay degeneración)

Quema de H en una capa alrededor (casi inactiva).

**La convección cesa** por el aumento de  $T_{\text{eff}}$  (el H se ioniza y la envoltura vuelve a ser “transparente” a la radiación)  $\rightarrow$  ya no hay dragado (el material procesado en el núcleo no llega afuera)

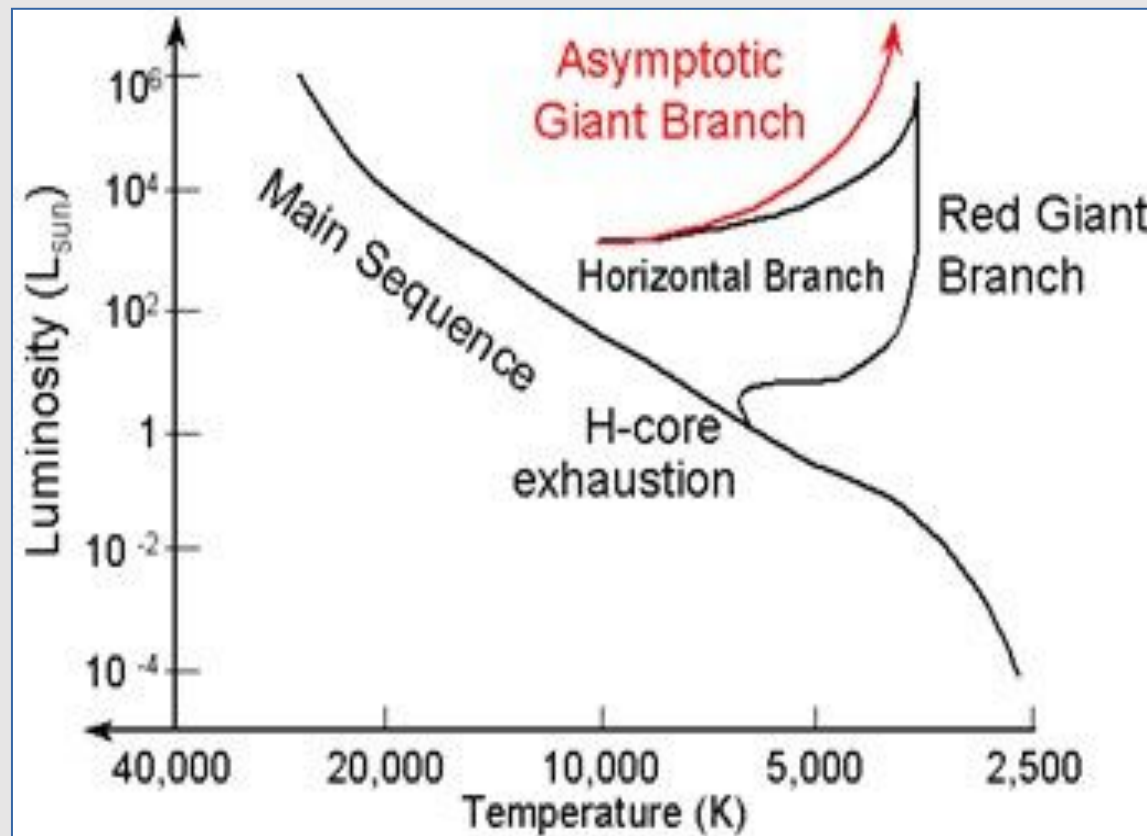


La rama horizontal o “blue loop”, es como una segunda SP, pero ahora de quema de He en el núcleo. Dura mucho menos que la SP de quema de H.

# Rama Asintótica de las Gigantes (AGB)

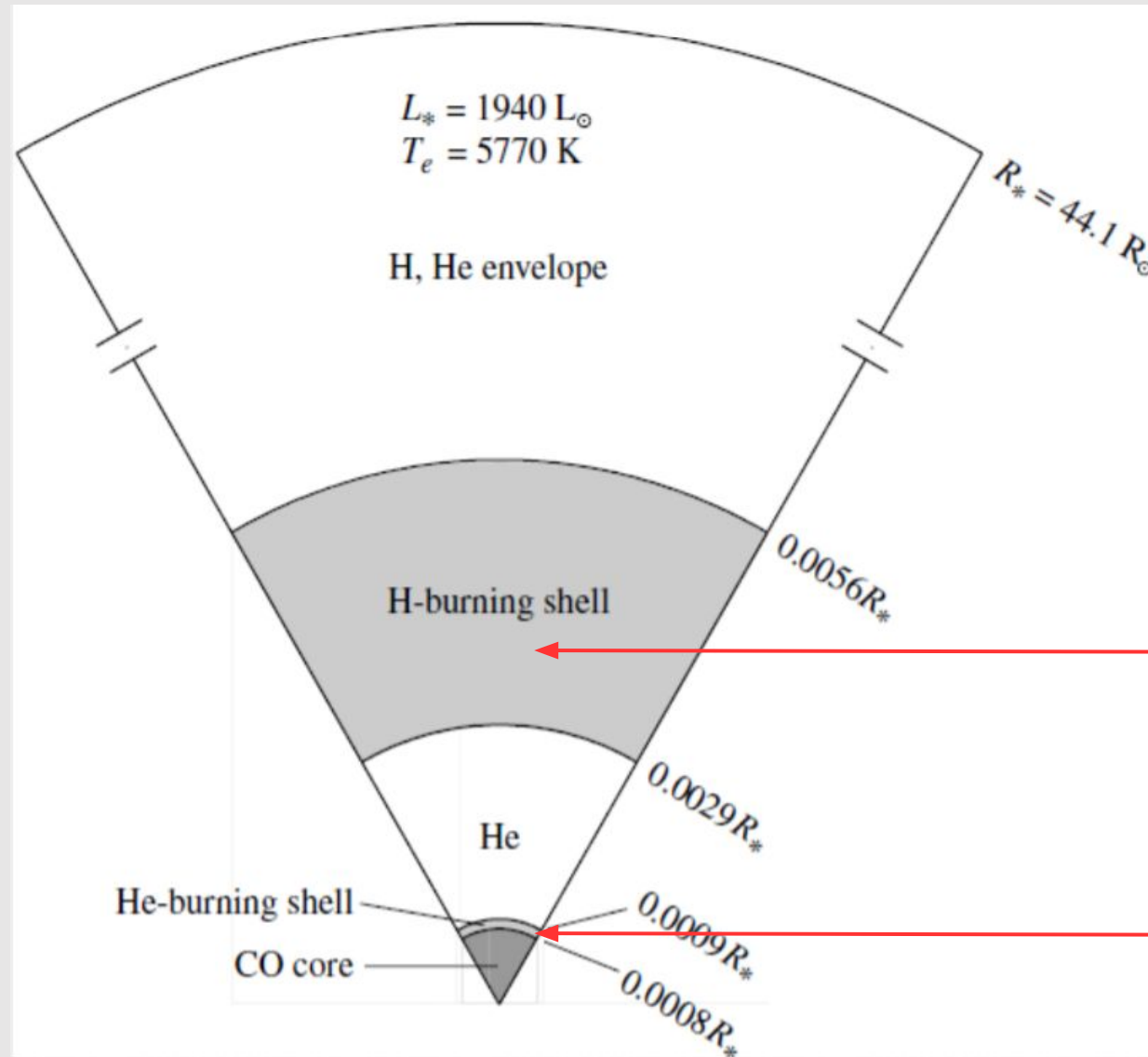
En algún momento se acaba el He en el núcleo, igual que cuando se acabó el H y la estrella pasó a la RGB.

- Núcleo inerte principalmente de C y O, colapsa hasta degenerarse.
- Capa de He inerte alrededor alcanza temperatura para quemarse.





# Inicio de la “Early” AGB



Capa de quema de H es empujada hacia afuera

Quema de He en capa genera mucha energía

**FIGURE 8** A  $5 M_\odot$  star on the early asymptotic giant branch with a carbon–oxygen core and hydrogen- and helium-burning shells. Note that relative to the surface radius, the scale of the shells and core has been increased by a factor of 100 for clarity. (Data from Iben, *Ap. J.*, 143, 483, 1966.)



# Early AGB

- **Núcleo inerte de C/O** (dentro de la capa que quema He) **se contrae**.
- **Capa de He fusionando**, genera mucha energía → empuja hacia afuera el material que la rodea (incluida la capa que quema H que se enfría y apaga o al menos vuelve poco eficiente) → **Capa de He es la fuente principal de energía**
- Aumento de la luminosidad y del radio, disminución de la  $T_{\text{eff}}$ , la envoltura se vuelve nuevamente opaca

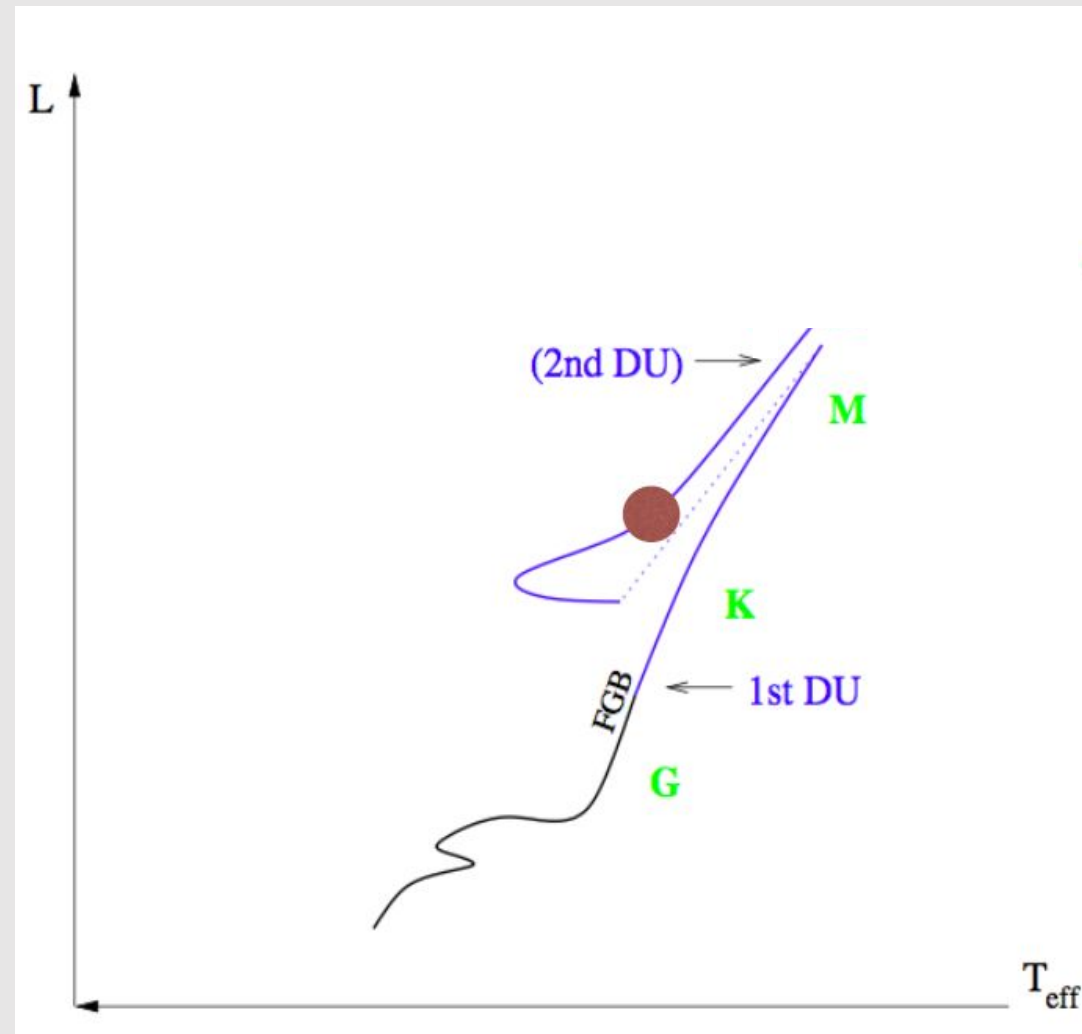
→ **convección**

**Solo para estrellas más masivas que  $\sim 4.5M_{\text{sun}}$  hay **segundo dragado**.** La burbuja convectiva alcanza la zona donde hubo quema de H y lleva material enriquecido a la superficie

# Early AGB

La estrella continúa su ascenso por el diagrama HR acercandose a seguir la trayectoria de Hayashi en reversa.

Es como una continuación de la RGB que se vio interrumpida por la quema de He en el núcleo.



## Próxima clase:

- Etapas finales de evolución: (Pulsos termales, nebulosa planetaria)
  - Remanentes
  - Supernovas si alcanzamos