

# 21 - Evolución de las estrellas - Secuencia principal y mas





# La vida en la secuencia principal

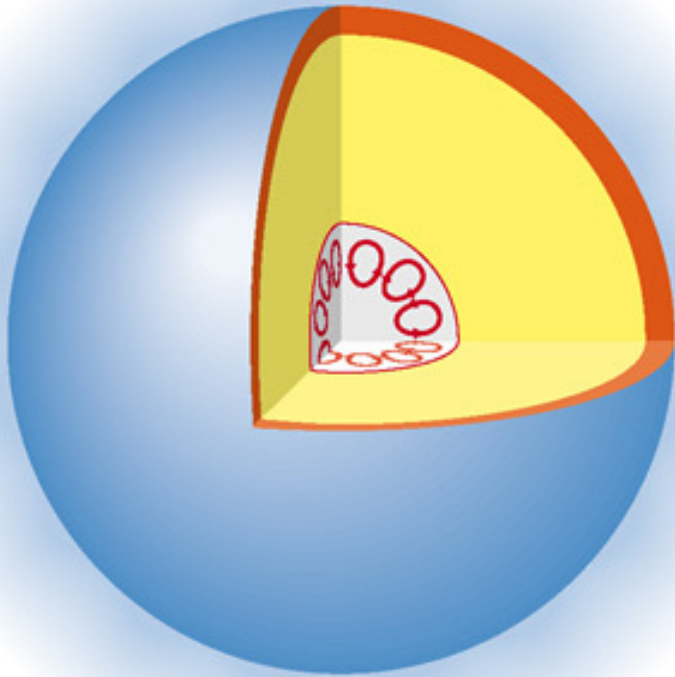
Cuando una estrella se encuentra en la MS depende de su masa:

- Enanas O (O V) son más masivas
- Enanas M (M V) son menos masivas

Estrellas de MS convierten H en He en sus núcleos.

La estrella es estable y balancea la gravedad y la presión con las reacciones de fusión de H.

high-mass star



$1M_{\text{Sun}}$  star



very low mass star



© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

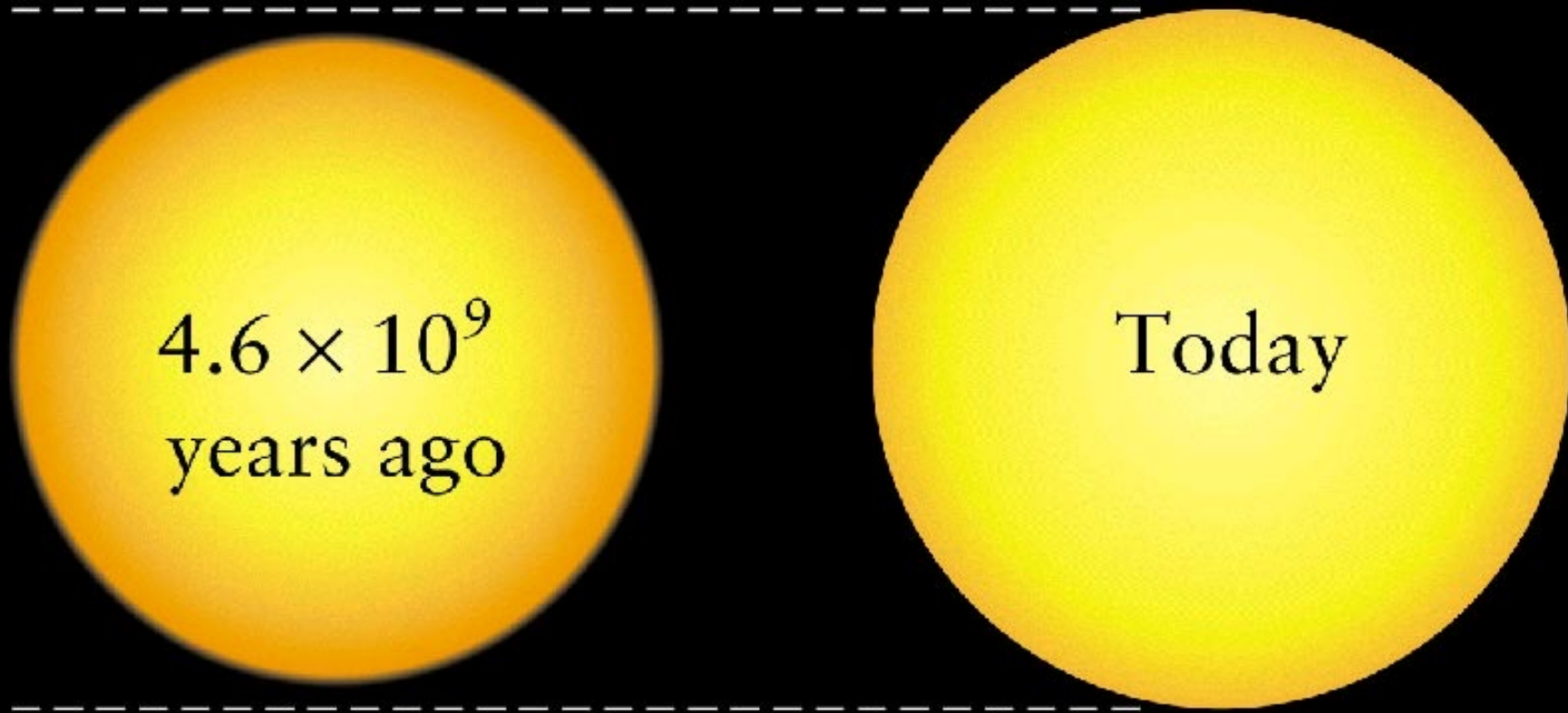
La estructura interna es diferente para estrellas de MS de diferentes masas.

Cuanto más masiva sea una estrella, más rápido se pasa por su fase de secuencia principal

**TABLE 11-1**

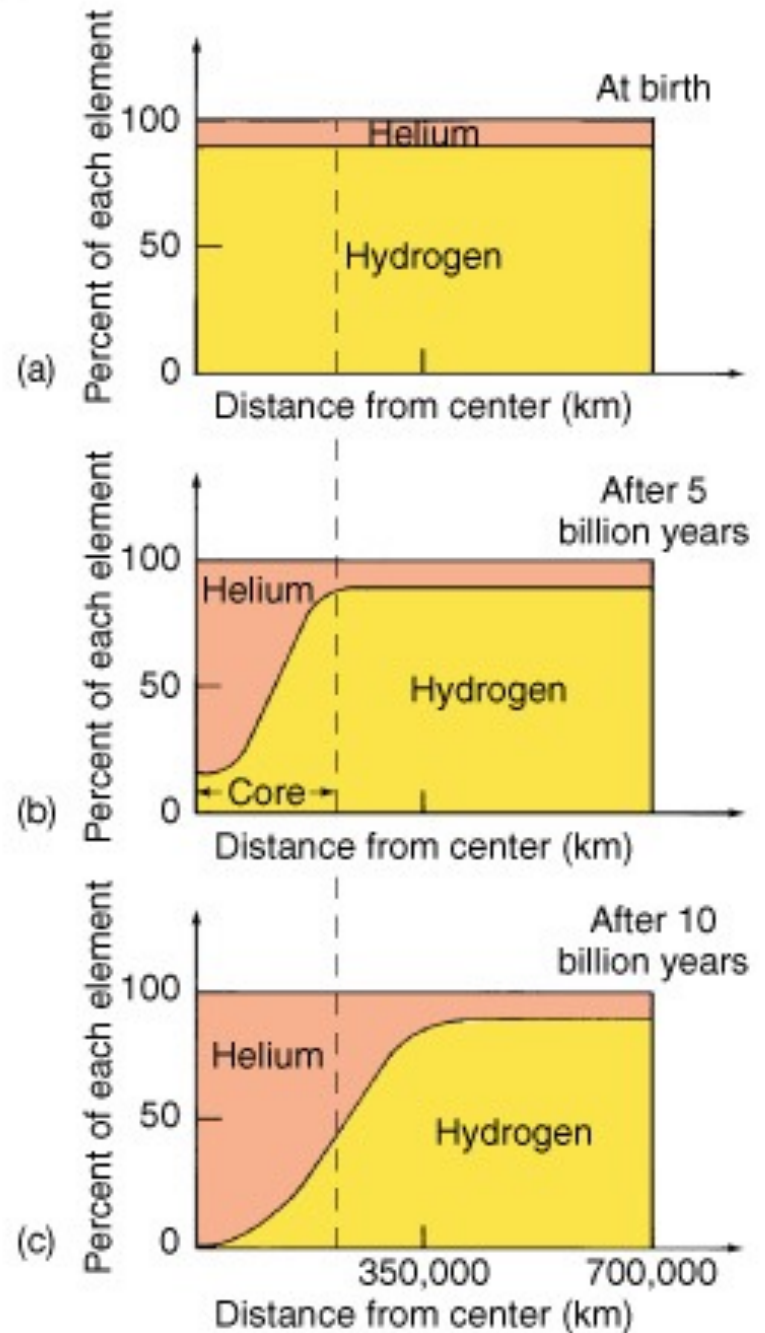
Approximate Main-Sequence Lifetimes

Mass ( $M_{\odot}$ )	Surface Temperature (K)	Spectral class	Luminosity ( $L_{\odot}$ )	Main-sequence lifetime ( $10^6$ years)
25	35,000	O	80,000	4
15	30,000	B	10,000	15
3	11,000	A	60	800
1.5	7,000	F	5	4500
1.0	6,000	G	1	12,000
0.75	5,000	K	0.5	25,000
0.50	4,000	M	0.03	700,000



Durante los últimos 4.6 billiones de años, la luminosidad del Sol aumentó 40%, y su radio se expandió por 6%

# Cambios químicos dentro la estrella



# Saliendo de la secuencia principal

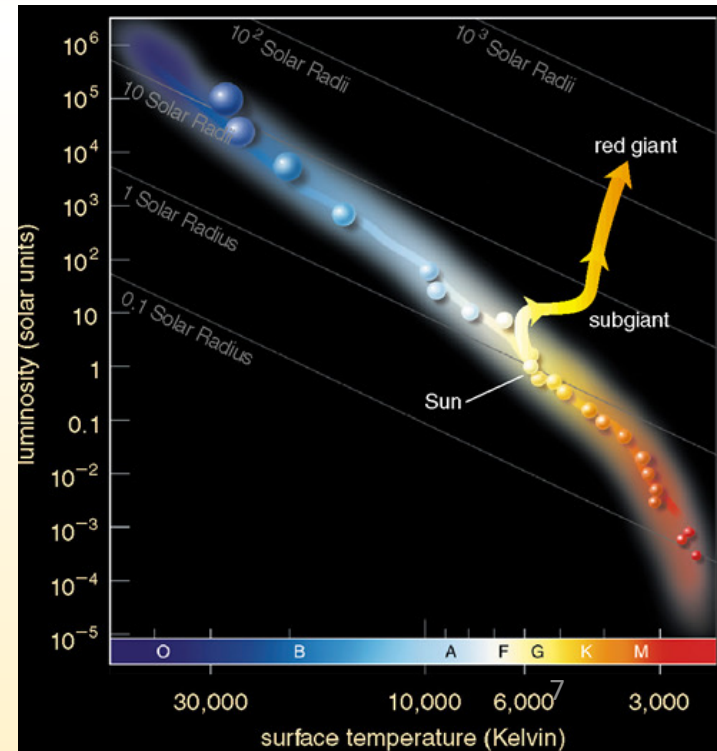
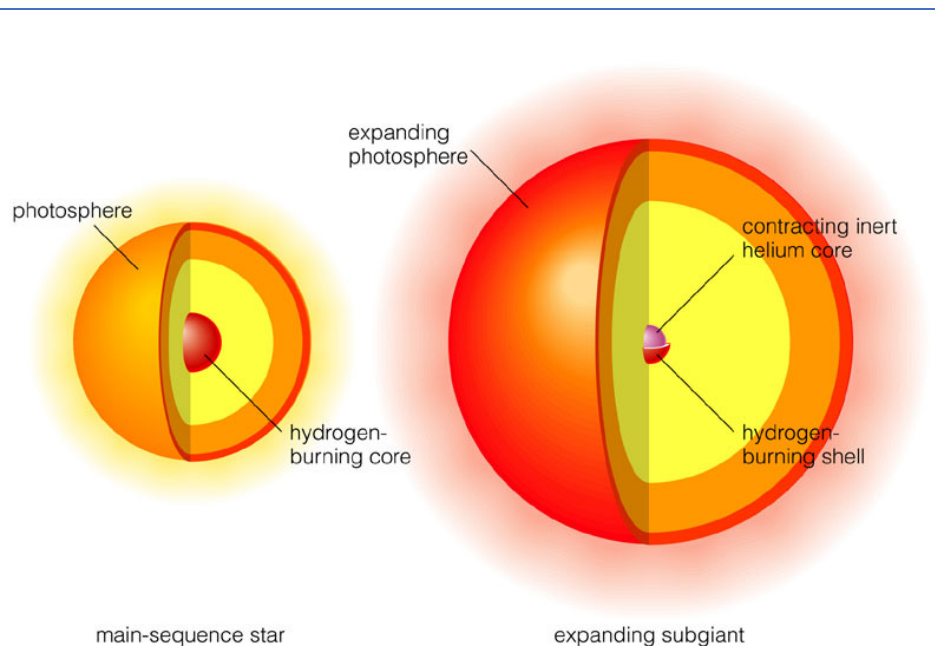
El núcleo comienza a derrumbarse.

Una r tula de H se calienta y comienza la fusión de H.

Hay menos gravedad para equilibrar la presión.

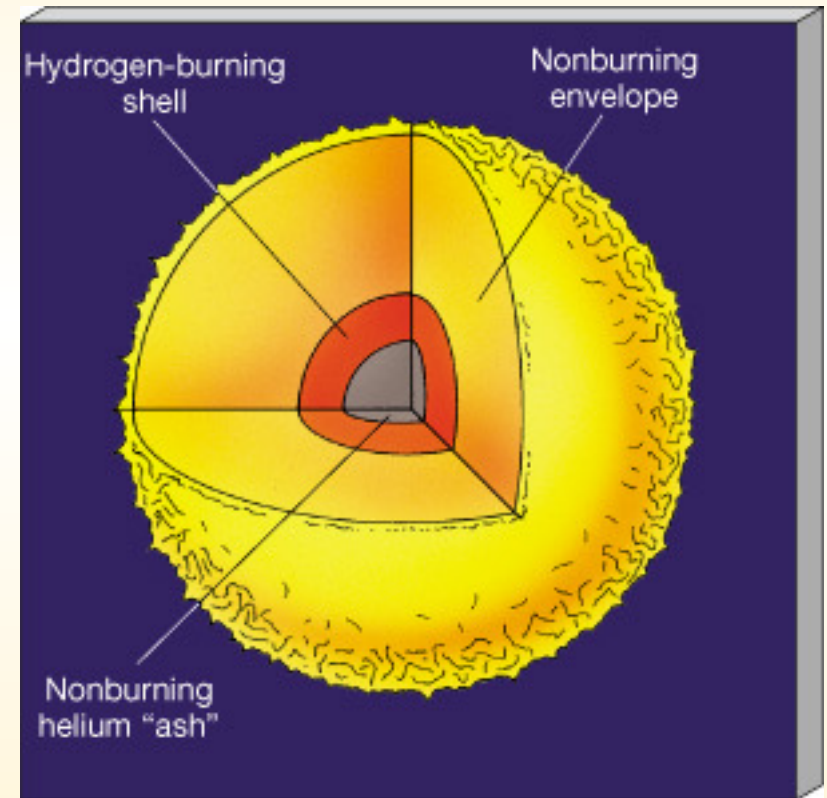
Las capas externas de la estrella se expanden.

La estrella se encuentra ahora en la **fase de subgigante** de su vida.



# Fase sub-gigante

- Se acaba el hidrógeno
- Se contrae el núcleo
- Se libera energía gravitacional
- Se calienta el núcleo pero bajo  $10^8$  K, así no es posible quemar helio aún.
- Comienza a quemarse el hidrógeno en una cáscara: fase "quema de la cáscara de hidrógeno"
- La estrella aumenta su brillo





Cuando la fusión del hidrógeno núcleo cesa, una estrella de secuencia principal se convierte en una gigante

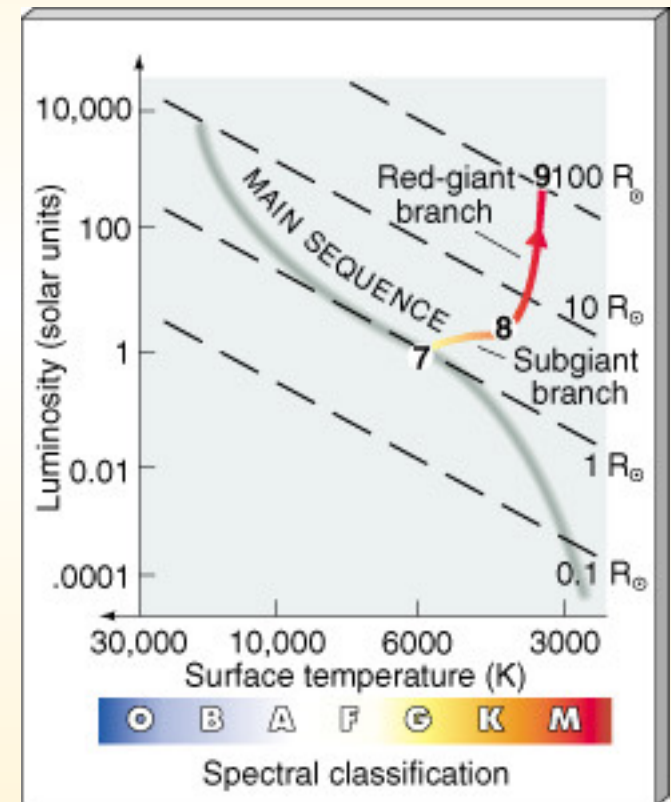
Cuando el hidrógeno en el núcleo es fusionado en helio, la estrella ya no puede soportar su peso.

El enorme peso de las capas exteriores de hidrógeno comprime las capas en torno al núcleo suficientemente para iniciar la fusión del hidrógeno en una rötula.

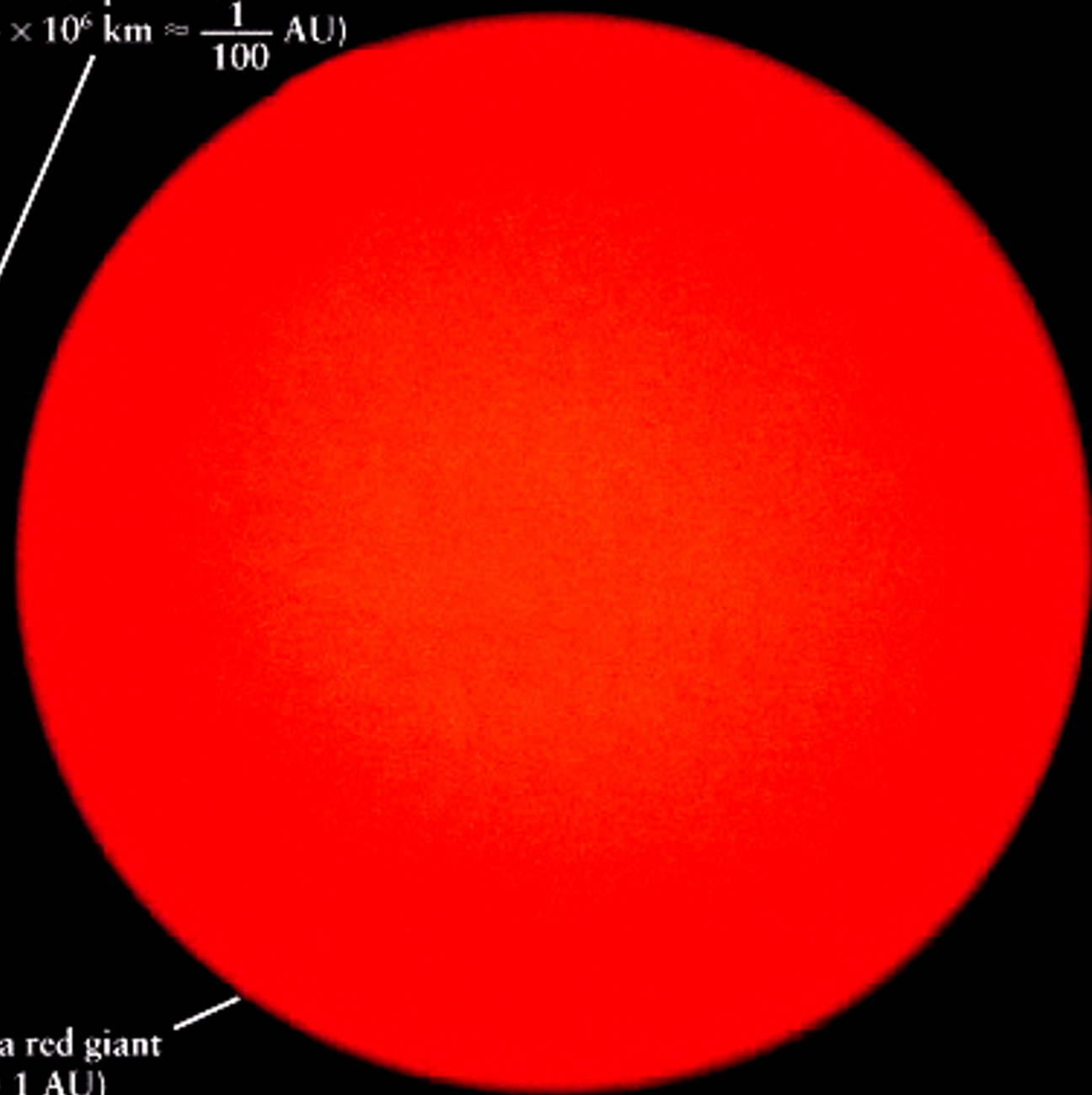
Este calor interno extra hace que las capas exteriores se amplían formando una estrella gigante.

# La rama de las gigantes rojas

- Las capas superiores se calientan y se expanden
- En 100 millones de años la estrella se convierte en una gigante roja
- El salto 8-9 se caracteriza por convección que mantiene casi constante la temperatura
- La gigante roja es enorme - casi del tamaño de la órbita de Mercurio - su núcleo es 1/1000 del tamaño de la estrella, poco mayor que la Tierra, su densidad es enorme.
- Ejemplo Arcturus (K III)



The Sun as a main-sequence star  
(diameter =  $1.4 \times 10^6$  km  $\approx \frac{1}{100}$  AU)



The Sun as a red giant  
(diameter  $\approx 1$  AU)

**TABLE 20.1 Evolution of a Sun-like Star**

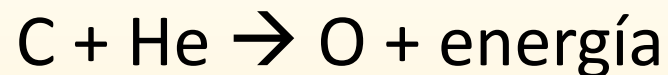
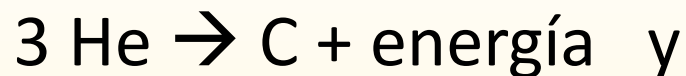
<b>Stage</b>	<b>Approximate Time to Next Stage (Yr)</b>	<b>Central Temperature (10<sup>6</sup> K)</b>	<b>Surface Temperature (K)</b>	<b>Central Density (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Radius</b>		<b>Object</b>
					<b>(km)</b>	<b>(solar radii)</b>	
7	10 <sup>10</sup>	15	6000	10 <sup>5</sup>	7 × 10 <sup>5</sup>	1	Main-sequence star
8	10 <sup>8</sup>	50	4000	10 <sup>7</sup>	2 × 10 <sup>6</sup>	3	Subgiant branch
9	10 <sup>5</sup>	100	4000	10 <sup>8</sup>	7 × 10 <sup>7</sup>	100	Helium flash
10	5 × 10 <sup>7</sup>	200	5000	10 <sup>7</sup>	7 × 10 <sup>6</sup>	10	Horizontal branch
11	10 <sup>4</sup>	250	4000	10 <sup>8</sup>	4 × 10 <sup>8</sup>	500	Asymptotic-giant branch
12	10 <sup>5</sup>	300	100,000	10 <sup>10</sup>	10 <sup>4</sup>	0.01	Carbon core
		—	3000	10 <sup>-17</sup>	7 × 10 <sup>8</sup>	1000	Planetary nebula*
13	—	100	50,000	10 <sup>10</sup>	10 <sup>4</sup>	0.01	White dwarf
14	—	Close to 0	Close to 0	10 <sup>10</sup>	10 <sup>4</sup>	0.01	Black dwarf

\*Values refer to the envelope.

La fusión del helio comienza en el centro de un gigante

Mientras que las capas exteriores se expanden, el núcleo de helio se sigue contrayendo y eventualmente se hace lo suficientemente caliente (100 millones de grados Kelvin) para que el helio comience a fusionarse en carbono y oxígeno

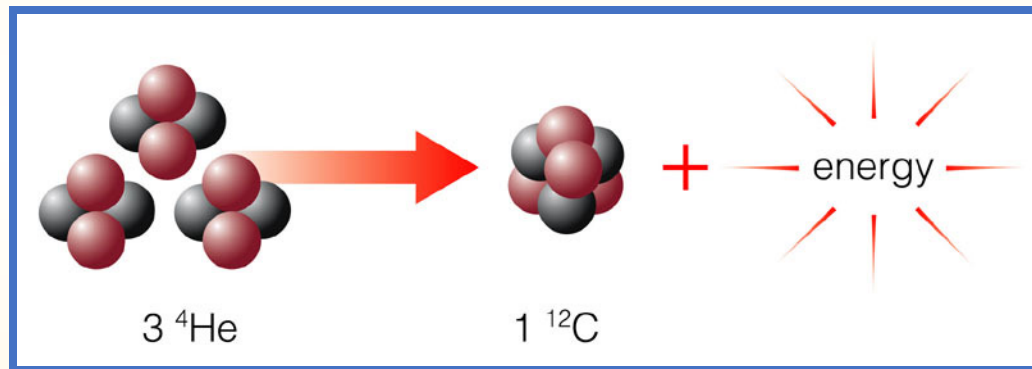
La fusión del helio central:



se produce rápidamente - llamado **el flash del helio**

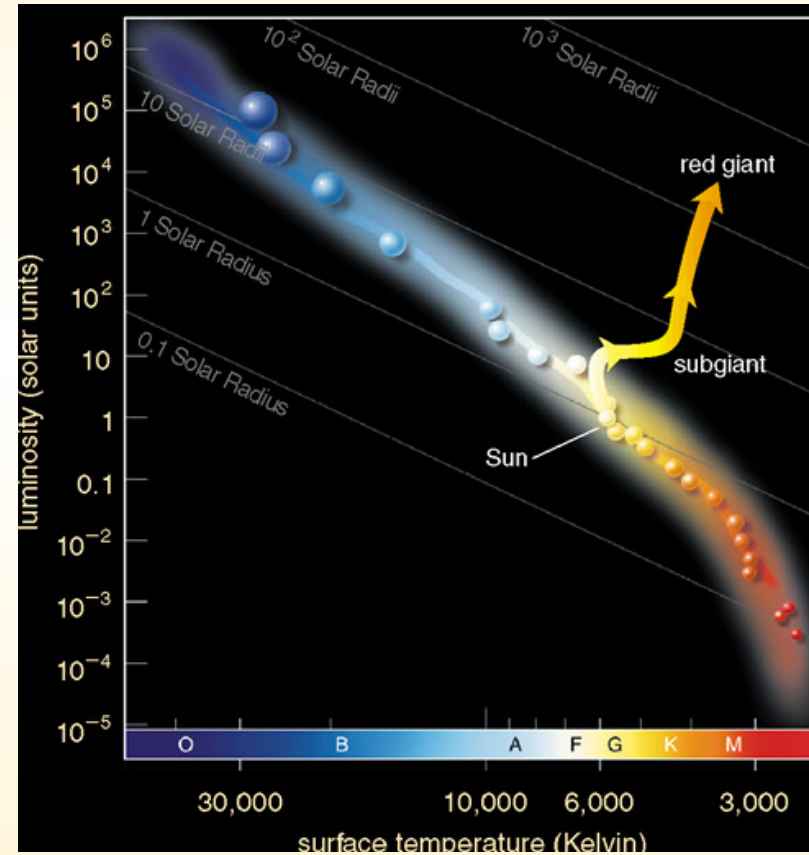
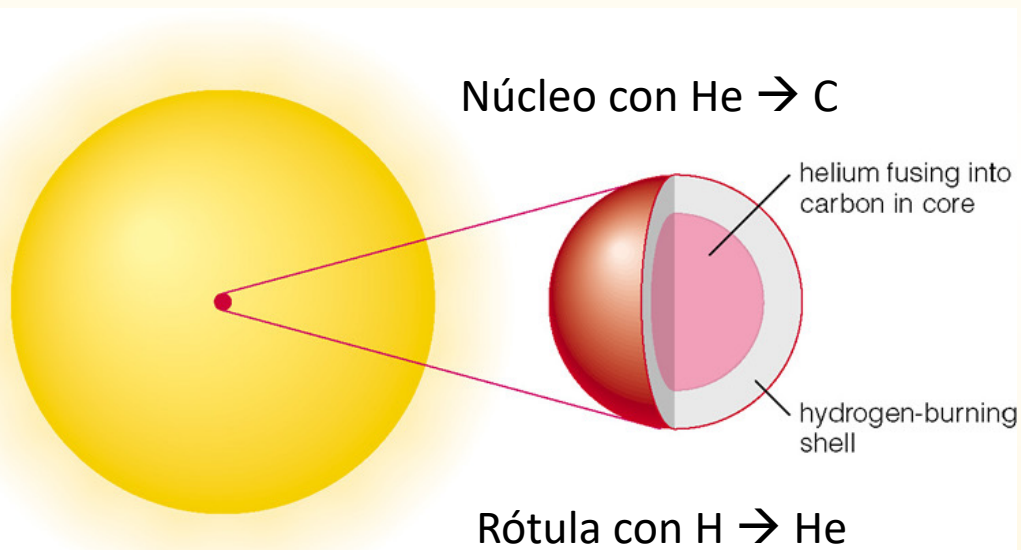
# Las gigantes rojas

El núcleo de He colapsa hasta que se calienta a  $10^8$  K y comienza la fusión de He ( $3\text{He} \rightarrow \text{C}$ ) a veces se llama el proceso de "triple- $\alpha$ "

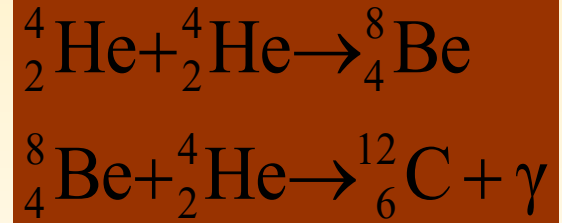


La estrella, llamada una **gigante roja**, una vez que esté estable. La presión balancea la gravedad. Reacciones de fusión de He en las gigantes rojas crean y liberan la mayor parte del carbono del que las moléculas orgánicas (y la vida) se hacen.

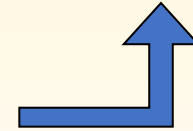
# Red Giants (gigantes rojas)



# Fusión de Helio



*Proceso Triple-alfa ocurre  
cuando  $T \sim 10^8$  °K y  $\rho \sim 10^8$  kg/m<sup>3</sup>*

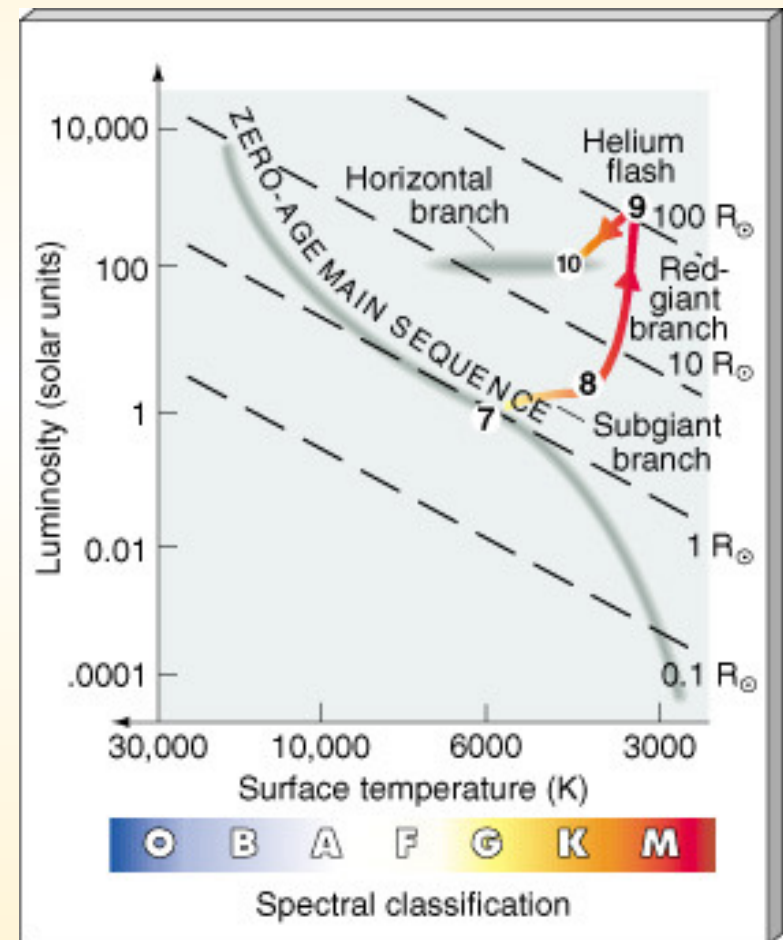


- A densidades tan altas comienza a ser importante el **Principio de Exclusión de Pauli** que opera sobre los electrones libres produciendo una presión llamada **Presión de Degeneración**.
- Si la estrella fuera soportada sólo por presión térmica, el aumento de temperatura producida por el comienzo de la fusión del helio llevaría a un aumento de presión. El gas se expandiría y enfriaría, reduciendo la tasa de fusión y reestableciendo el equilibrio.
- Sin embargo, en el núcleo de la gigante roja la presión es indep. de la temperatura (una prop. de un gas de electrones degenerados). Por consiguiente no existe este efecto estabilizador y se produce una fusión del helio rápida y en cadena: el **Flash de Helio**.



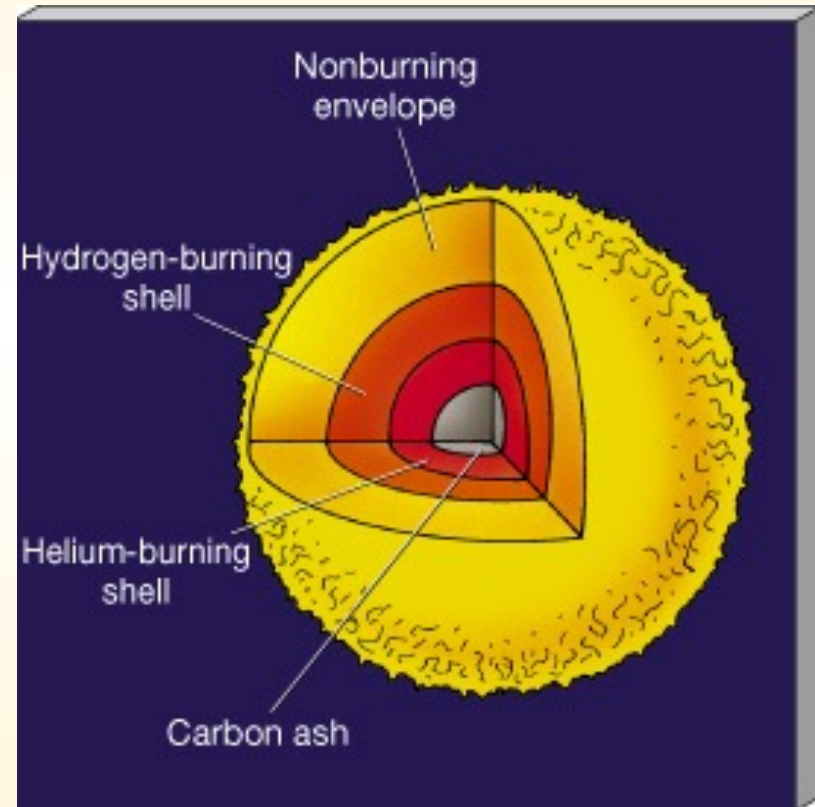
# Descenso a la rama horizontal

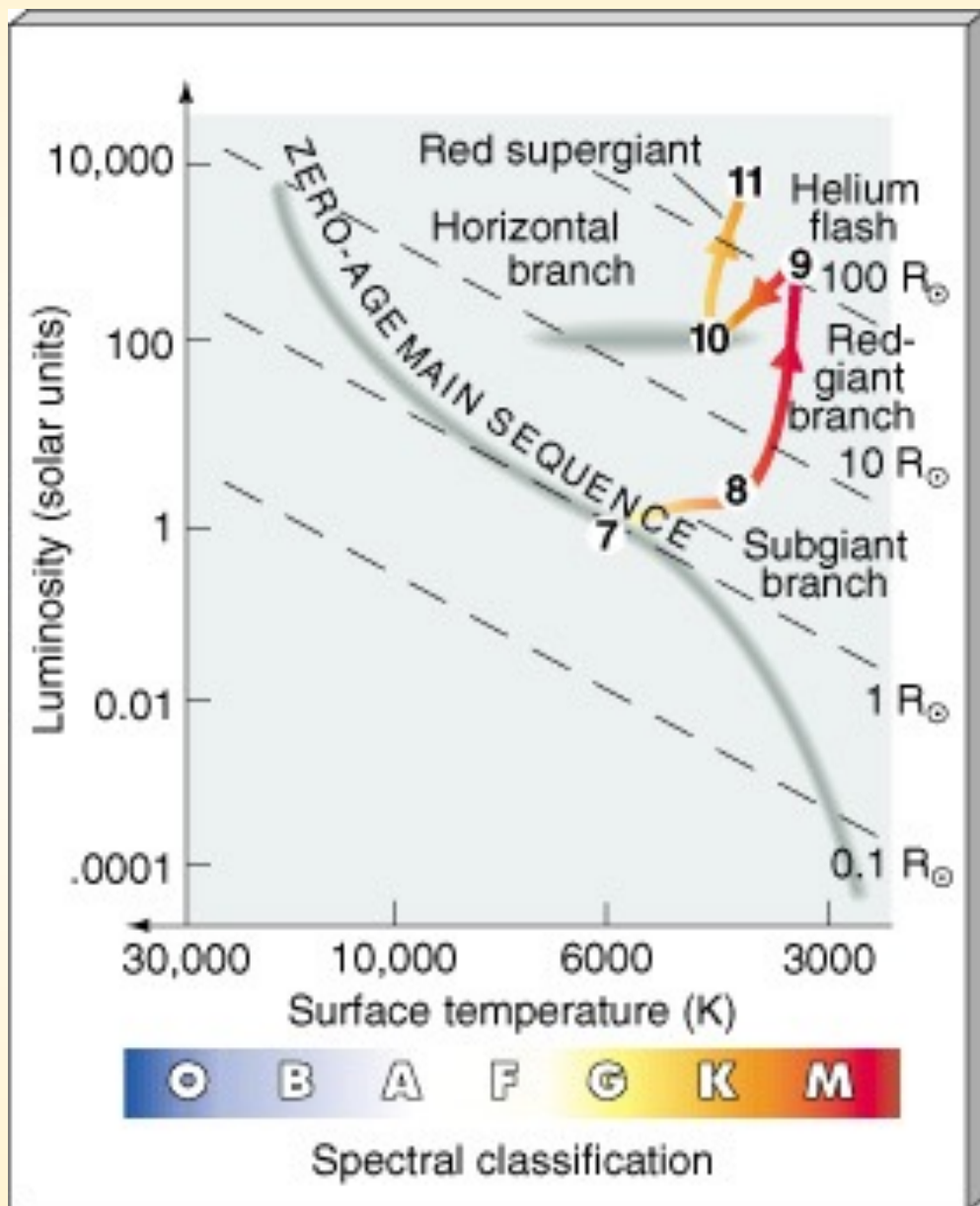
- Por pocas horas dura el flash de helio (9) antes que el núcleo reaccione expandiéndose y enfriándose.
- En 100.000 años la estrella recupera su estabilidad (9 → 10).
- La masa puede haber disminuido por 20-30% (10).



# El núcleo de Carbón

- Se agota el helio en el núcleo después de unas pocas decenas de millones de años.
- Se forma un núcleo de carbón, el cual colapsa
- Se expanden las capas de quema de  $H_2$  y He.
- La estrella sube la rama asintótica de las gigantes hasta llegar a ser una súper gigante roja ( $10 \rightarrow 11$ ).





# Muerte de estrellas de baja masa

- El núcleo se contrae, su temperatura nunca llega a 600 millones de K necesarios para quemar el carbono.
- La contracción se detiene cuando  $\rho = 10^{10} \text{ kg/m}^3$  y  $T = 300 \times 10^6 \text{ K}$  (electrones degenerados)  $\rightarrow$  1 tonelada en un grano de uva.
- Se forma un poco de oxígeno:
  - $^{12}\text{C} + ^4\text{He} = ^{16}\text{O} + \text{energía}$

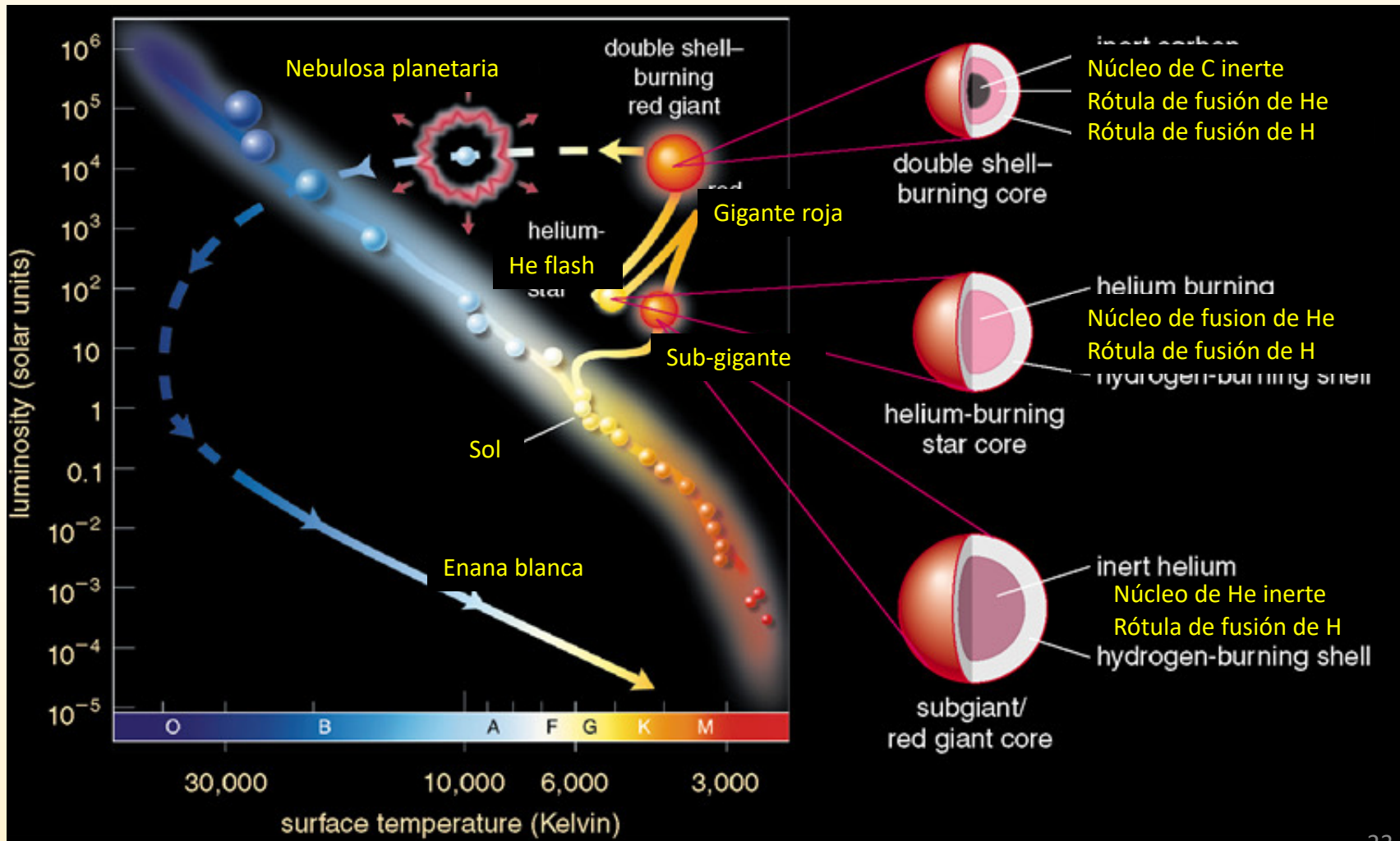
# Nebulosas Planetarias

- Cuando una gigante roja agota su combustible de He, el núcleo de C se colapsa.
- Estrellas de masa baja e intermedia no tienen suficiente energía gravitacional para calentar a  $6 \times 10^8$  K (temperatura para la fusión de C en O y Ne)
- Las rótulas de He & H superan la gravedad
- El exterior de la estrella es soplado ligeramente
- Así se forma **una nebulosa planetaria**

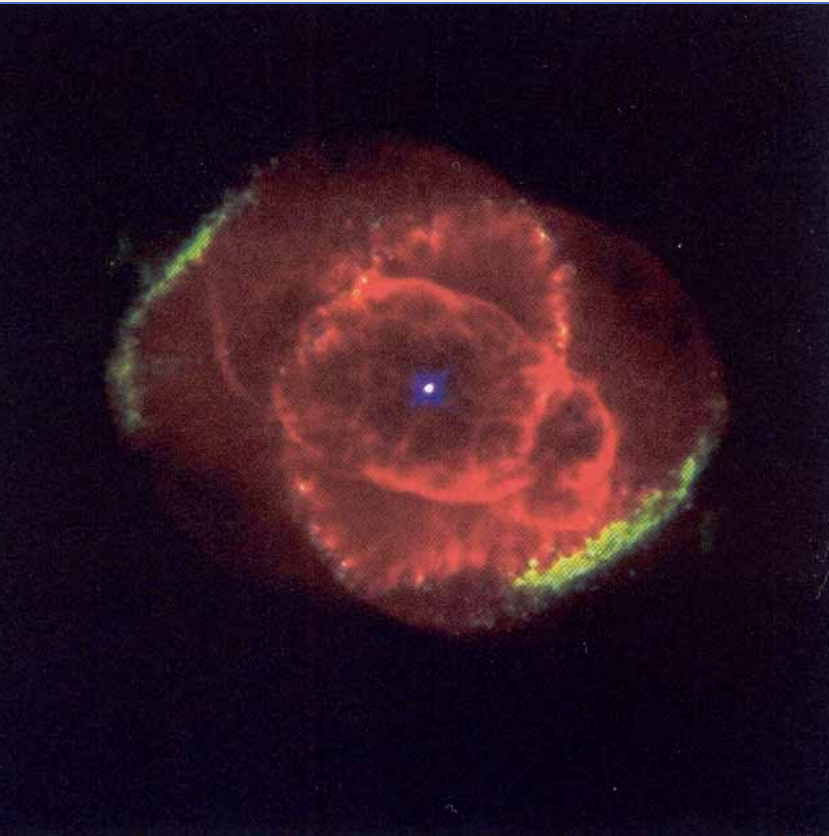
# Formación de una Nebulosa Planetaria

- La envoltura se expande y enfría.
- El radio aumenta hasta la órbita del planeta Marte.
- Sucesivas explosiones del Flash de Helio.
- Pulsaciones de la envoltura.
- Recombinación de electrones con núcleos.
- Liberación de más energía.
- En pocos millones de años la envoltura se expele y disipa.
- Se forma una nebulosa planetaria

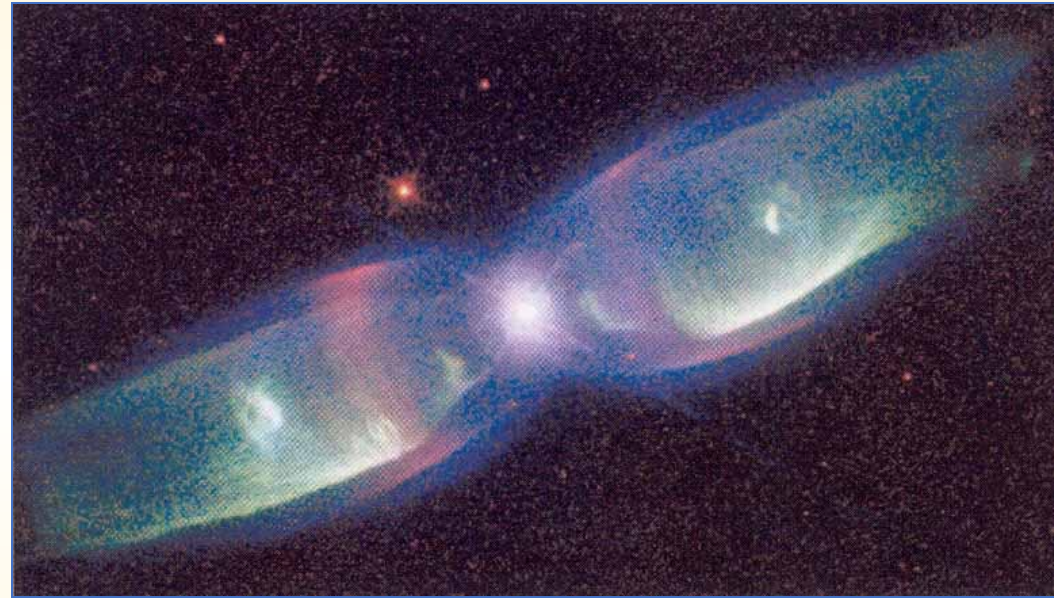
# Planetary Nebulae



# Planetary Nebulae

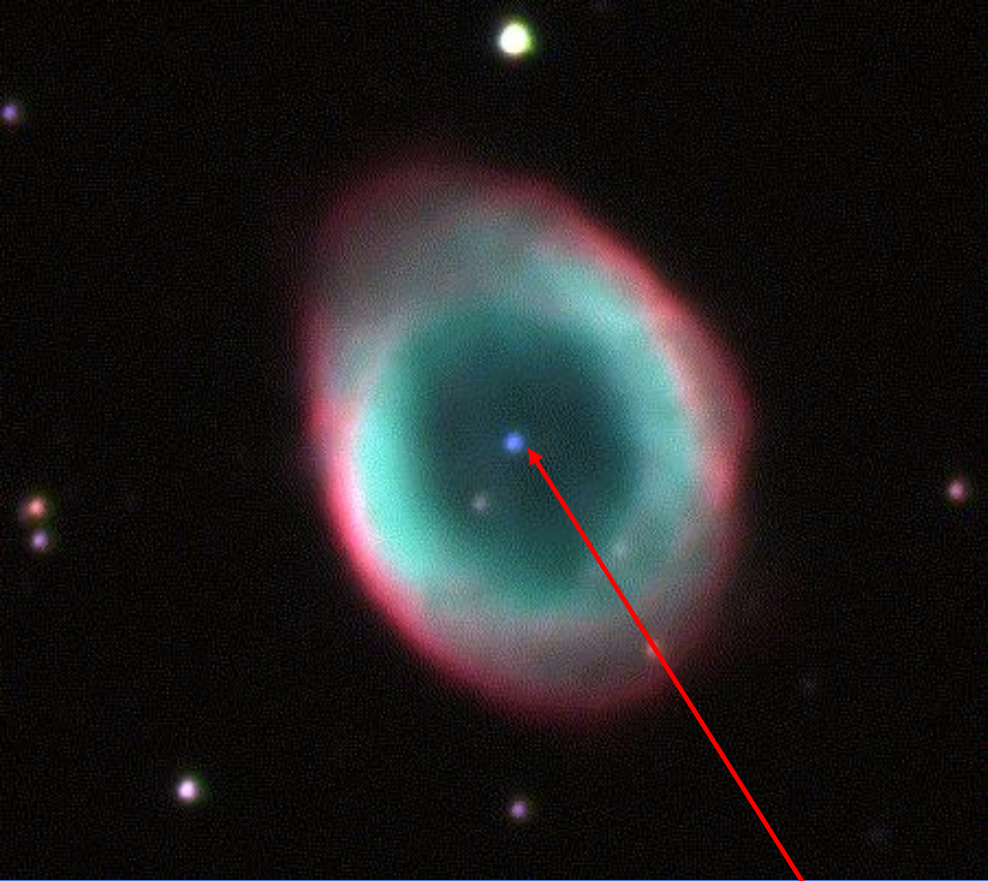


*Cat's Eye Nebula*  
*Nebulosa ojo de gato*

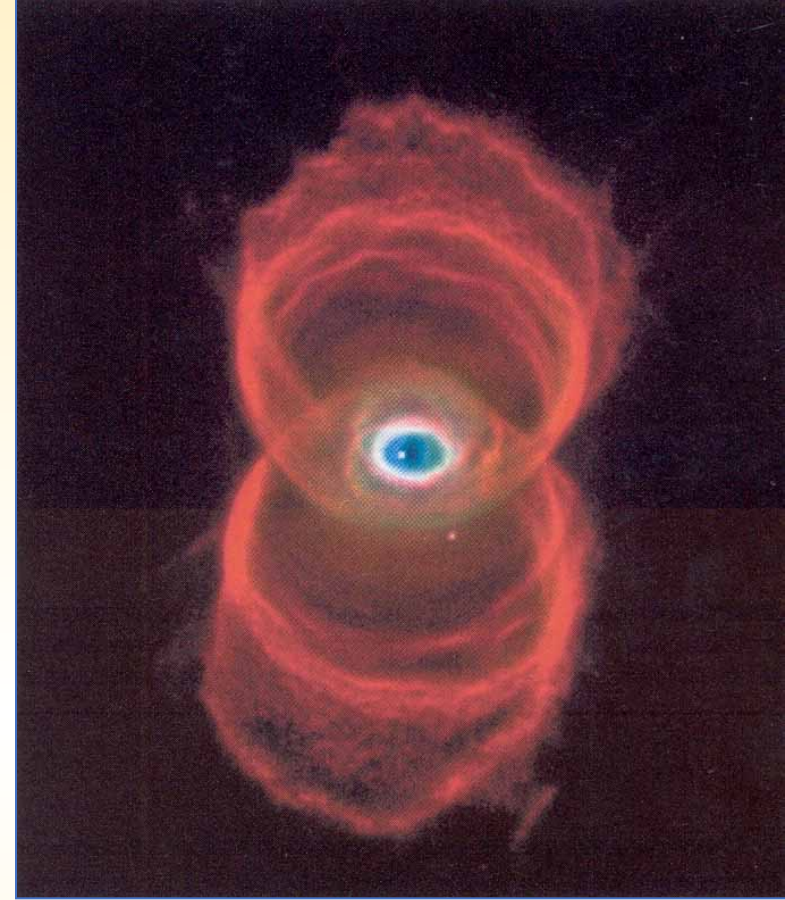


*Twin Jet Nebula*





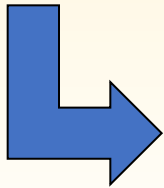
*Ring Nebula*  
Nebulosa del Anillo



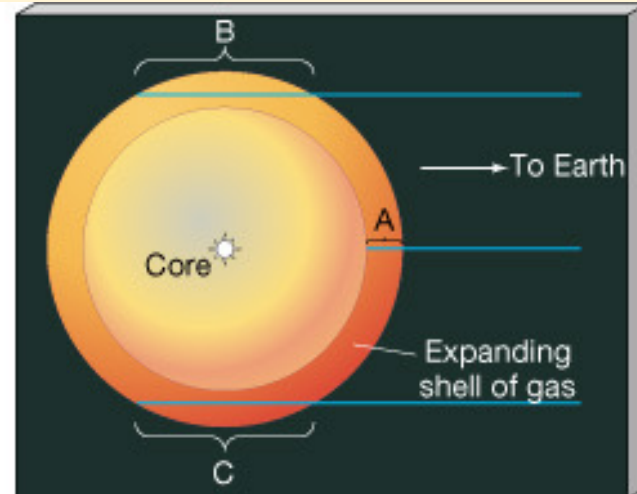
*Hourglass Nebula*  
Nebulosa Reloj de Arena

El núcleo de carbono se colapsa y se convierte en una **enana blanca**

Nebulosa Hélice

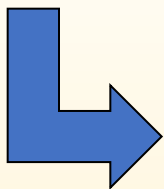


(a)

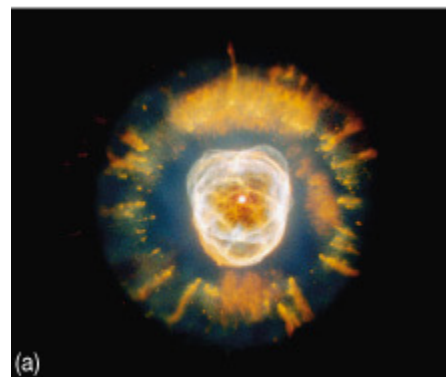


(b)

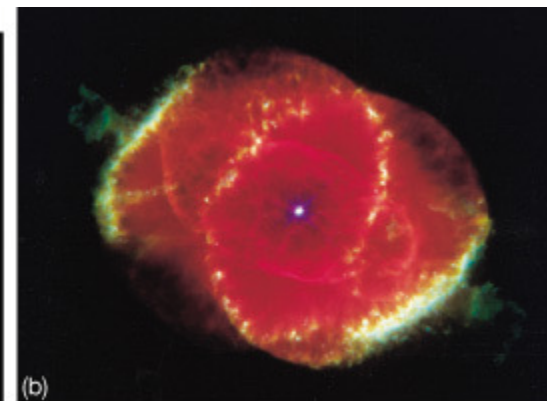
Nebulosa IC 418



(c)



(a)



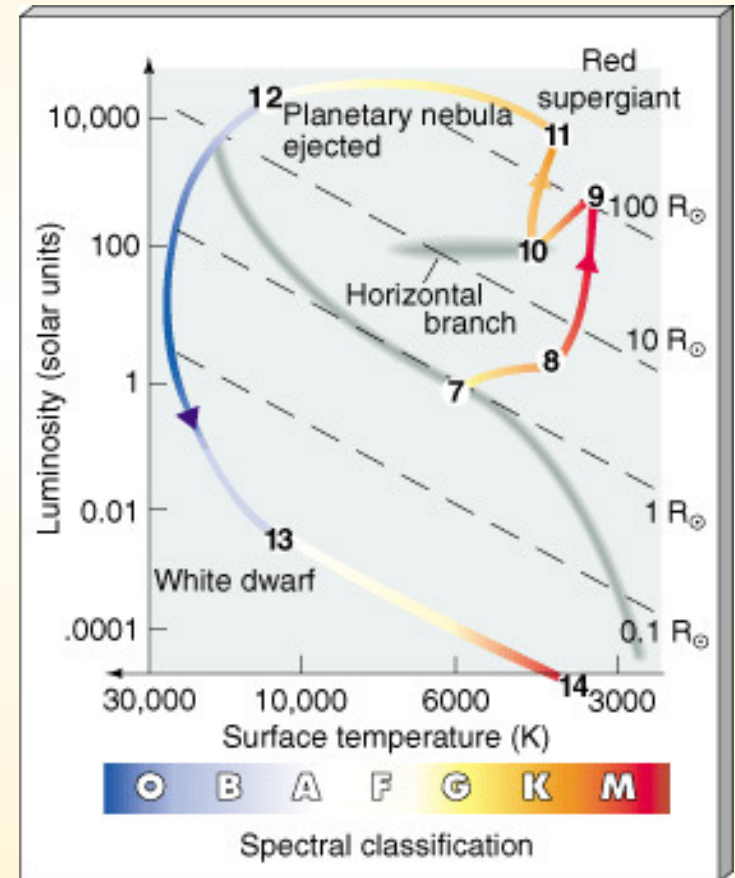
(b)



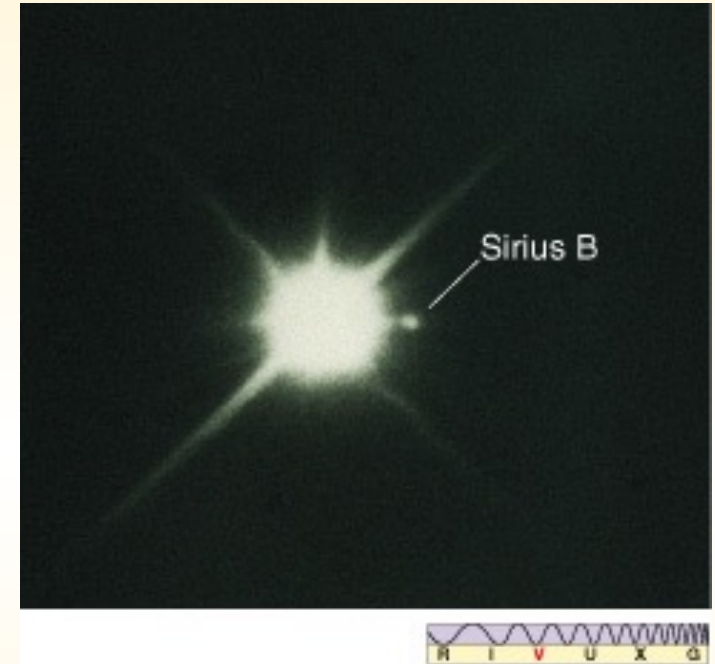
Nebulosas Esquimal y Ojo de Gato

# Enanas Blancas

- En pocas decenas de miles de años aparece el núcleo rico en carbono y muy caliente.
- Masa  $0.5 M_{\odot}$  y tamaño de la Tierra.
- Se enfría con el tiempo.



# Ejemplo: Sirio-B



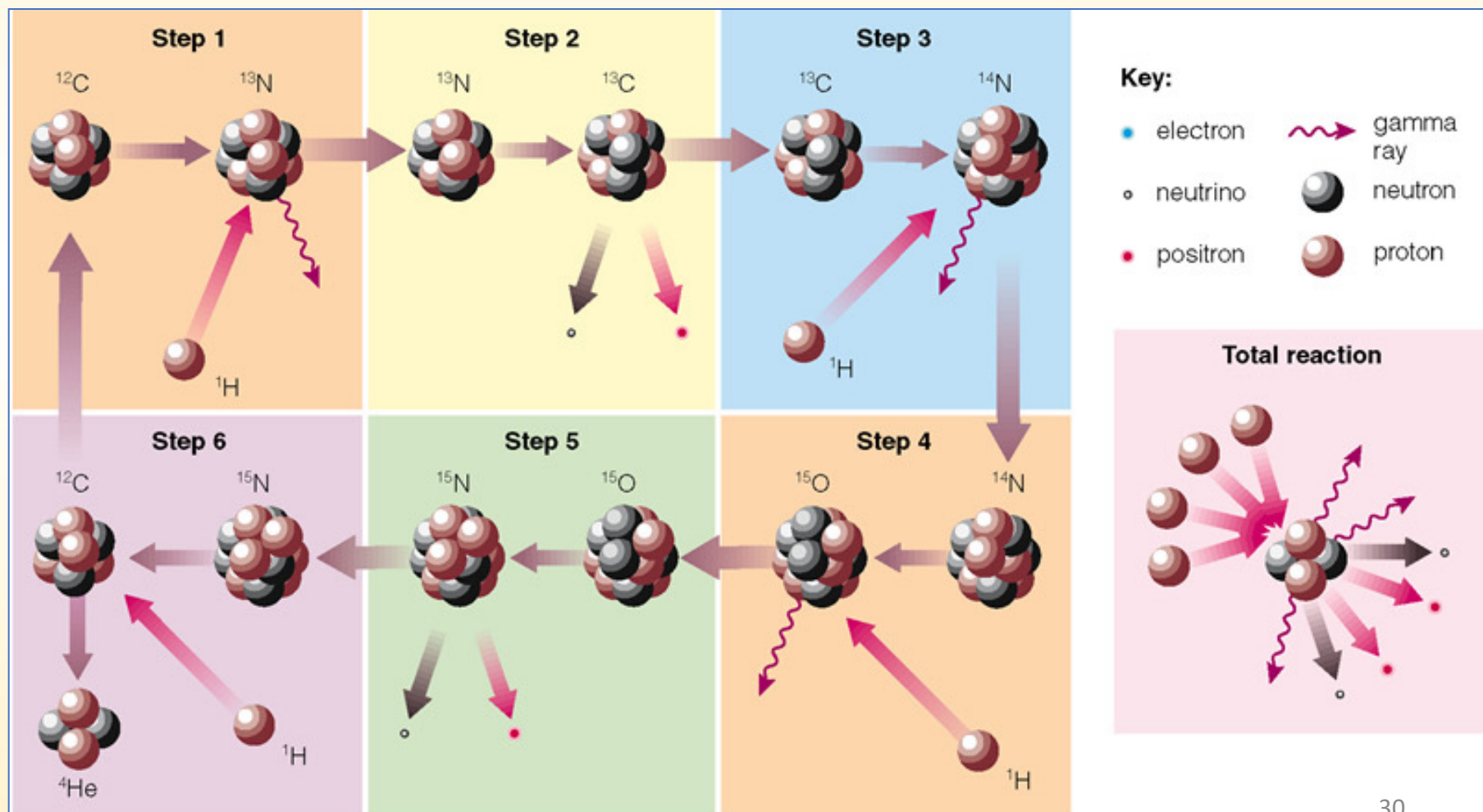
**TABLE 20.2** Sirius B—A Nearby White Dwarf

Mass	1.1 solar masses
Radius	0.008 solar radii (5500 km)
Luminosity (total)	0.04 solar luminosities ( $1.6 \times 10^{25}$ W)
Surface temperature	24,000 K
Average density	$3 \times 10^9$ kg/m <sup>3</sup>

- Algunas estrellas de baja masa nunca alcanzan la  $T$  necesaria para iniciar ciclo triple alfa  $\rightarrow$  enanas blancas de helio
- Algunas de masa alrededor de  $8 M_{\odot}$ 
  - $^{16}\text{C} + ^4\text{He} = ^{20}\text{Ne} + \text{energía}$
  - $\rightarrow$  Enanas blancas de Neón-Oxígeno

# Estrellas de MS con masas altas

El **ciclo CNO** es otra reacción de fusión nuclear que convierte hidrógeno en helio mediante el uso de carbono como catalizador.



El ciclo CNO comienza a los 15 millones de grados y se vuelve más dominante a temperaturas más altas.

El núcleo de C tiene una carga (+6), por lo que el protón debe estar en movimiento aún más rápido para superar la repulsión electromagnética!

El Sol (G2) -- CNO genera 10% de la energía

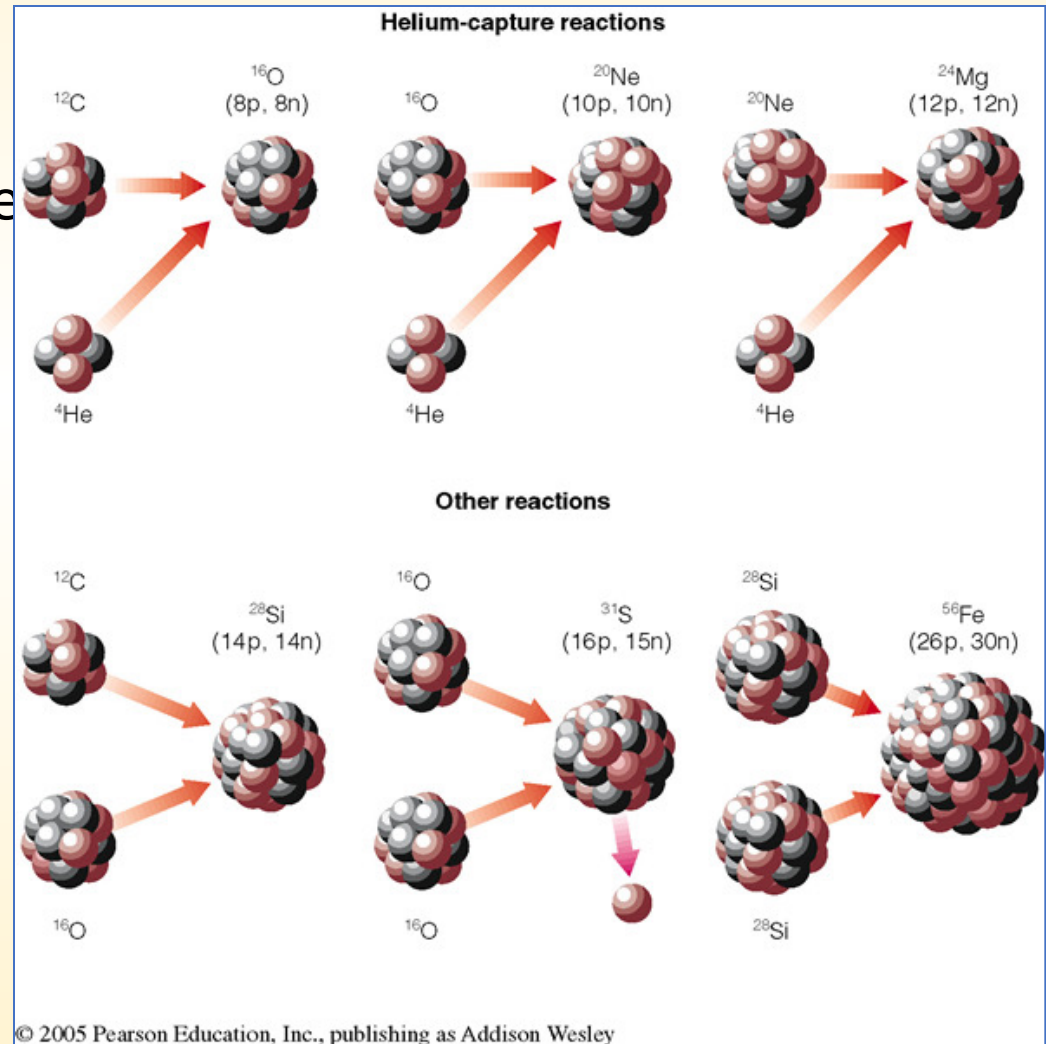
Enana F0 -- CNO genera 50% de la energía

Enanas O&B -- CNO genera la mayoría de energía

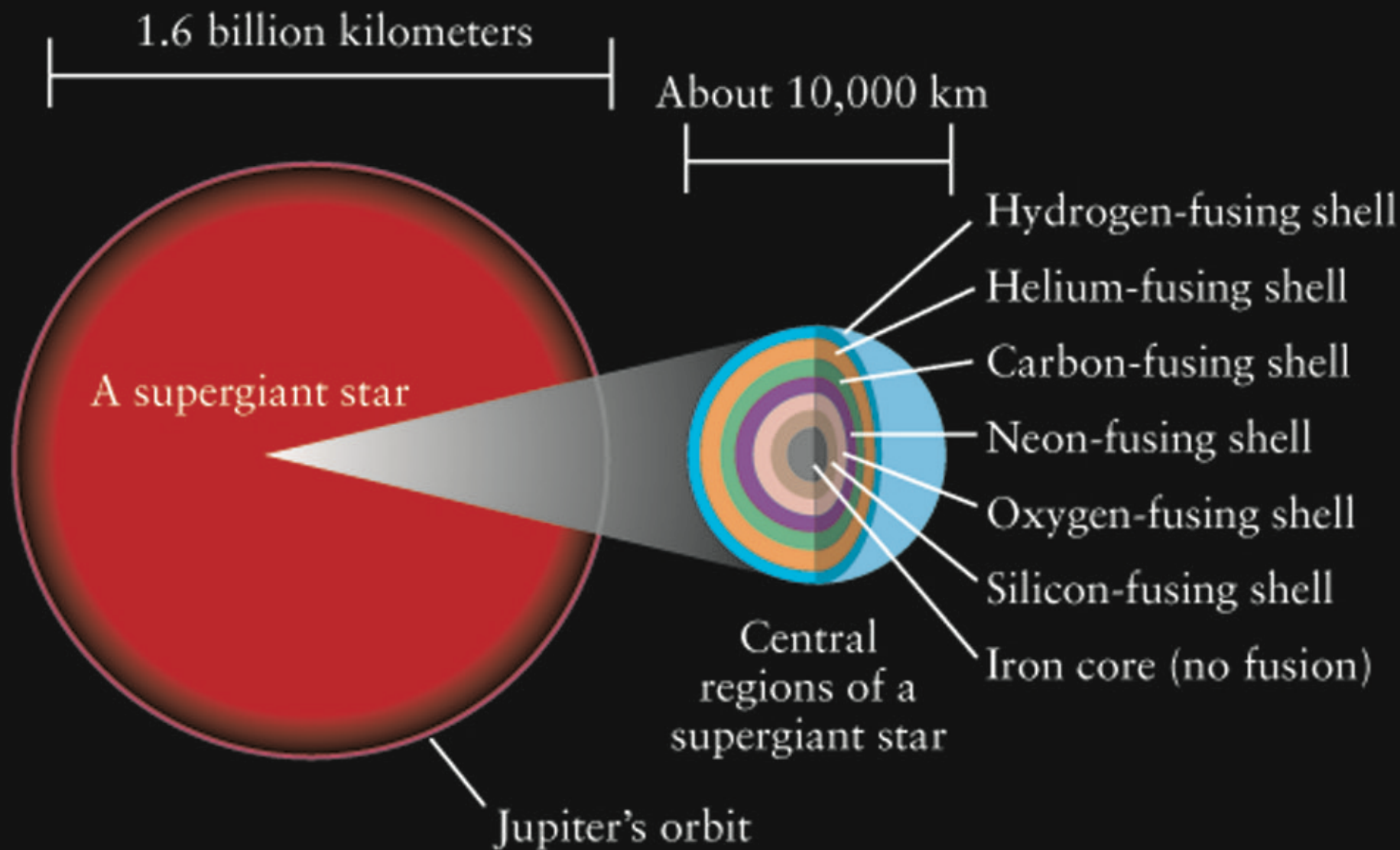
# Super-gigantes

¿Qué sucede con las estrellas de masa alta cuando agotan su combustible de He ?

- Tienen suficiente energía gravitacional para calentarse hasta  $6 \times 10^8$  K.
- Fusión de C en O
- C se ha agotado, se colapsa hasta que el núcleo esté suficientemente caliente para la fusión de O.
- El ciclo se repite.
- $O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow Si \rightarrow Fe$







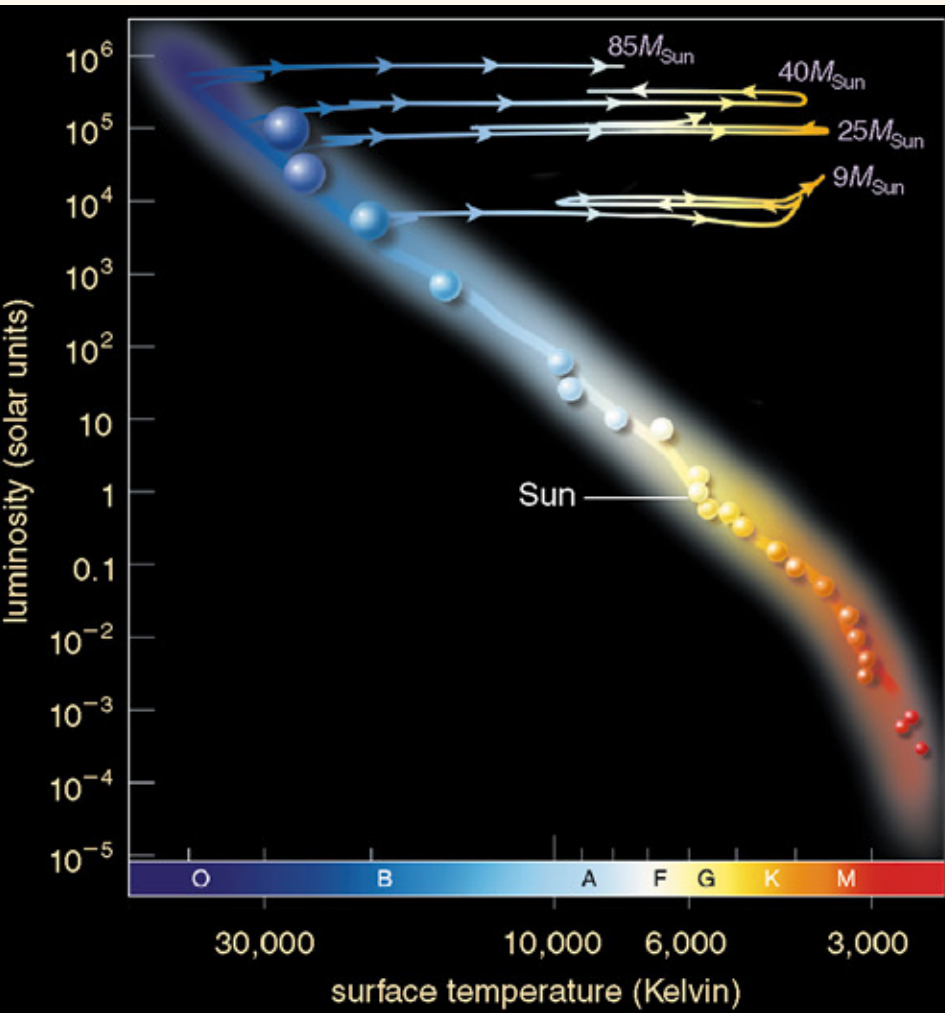
# Estrella de $20 M_{\text{sol}}$ :

- Fusión de H por  $10^7$  años
- Fusión de He por  $10^6$  años
- Fusión de C por 300 años
- Fusión de O por 200 días
- Fusión de Si por 2 días
- → super nova de tipo II

# Super-gigantes en el diagrama H-R

Como las rótulas de fusión alrededor del núcleo aumentan en número:

- La presión térmica va a ser más fuerte que la gravedad en las capas externas.
- La superficie de la estrella se expande y se enfría.
- La estrella se mueve hacia la parte superior derecha del diagrama HR.
- Se convierte en una super-gigante roja (ejemplo: Betelgeuse).



Para las estrellas más masivas:

El núcleo evoluciona demasiado rápido para que las capas externas respondan – explotan antes de que puedan convertirse en una super-gigante roja.

# Betelgeuse – supergigante roja



Jan 2019

Dec 2019

# El problema de hierro (Fe)

El supergigante tiene un núcleo inerte de Fe que se colapsa y se calienta.

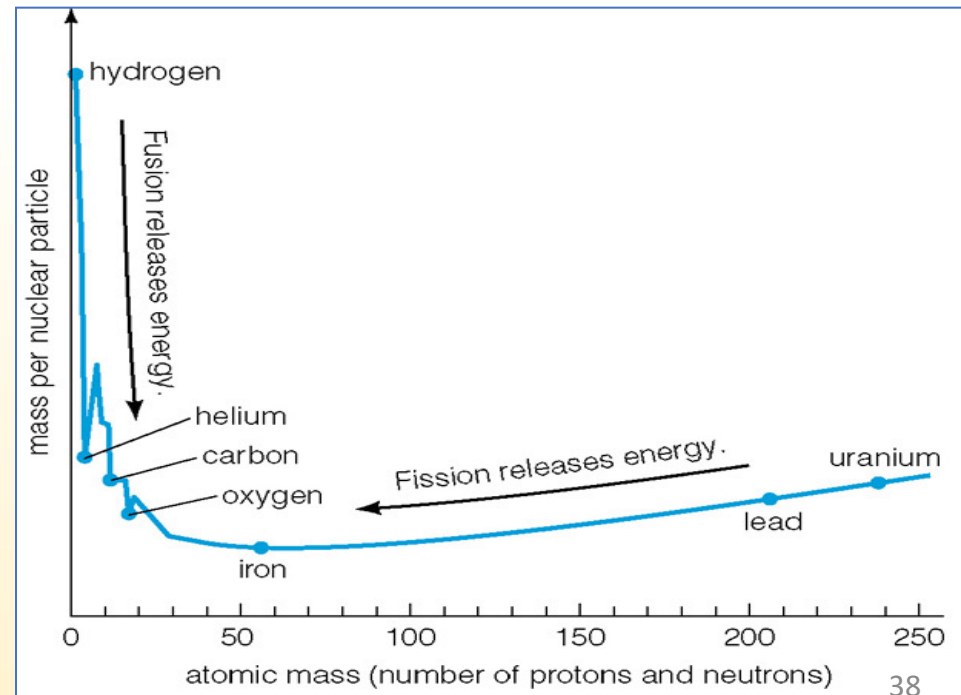
Fe no puede fusionarse.

Tiene la menor masa por partículas nucleares de cualquier elemento

No se puede fusionar en otro elemento sin crear masa

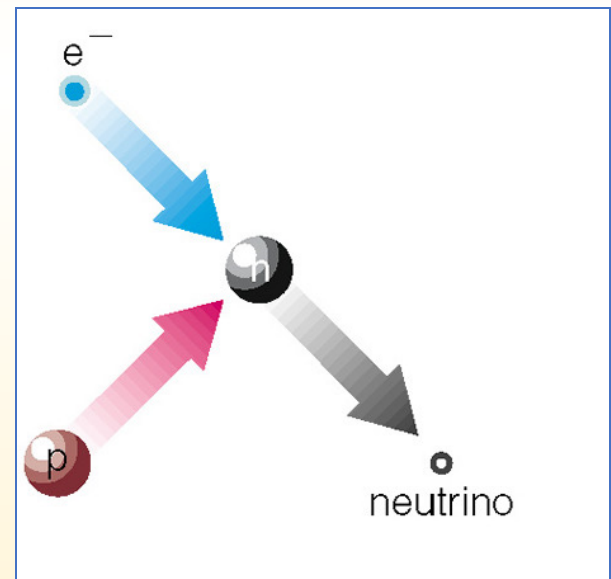
Por lo tanto el núcleo de Fe sigue al colapso hasta que es detenido por la degeneración de electrones.

(Como una enana blanca)



# Supernova

- PERO ... la fuerza de la gravedad aumenta cuando la masa de núcleo de Fe aumenta.
- La gravedad supera la degeneración de electrones
- Los electrones se estrellan contra protones y producen neutrones.
- El núcleo de neutrones colapsa hasta que es bruscamente detenido por la degeneración de neutrones - esto toma sólo unos segundos !
- El núcleo retrocede y envía el resto de la estrella a volar al espacio



# Supernova



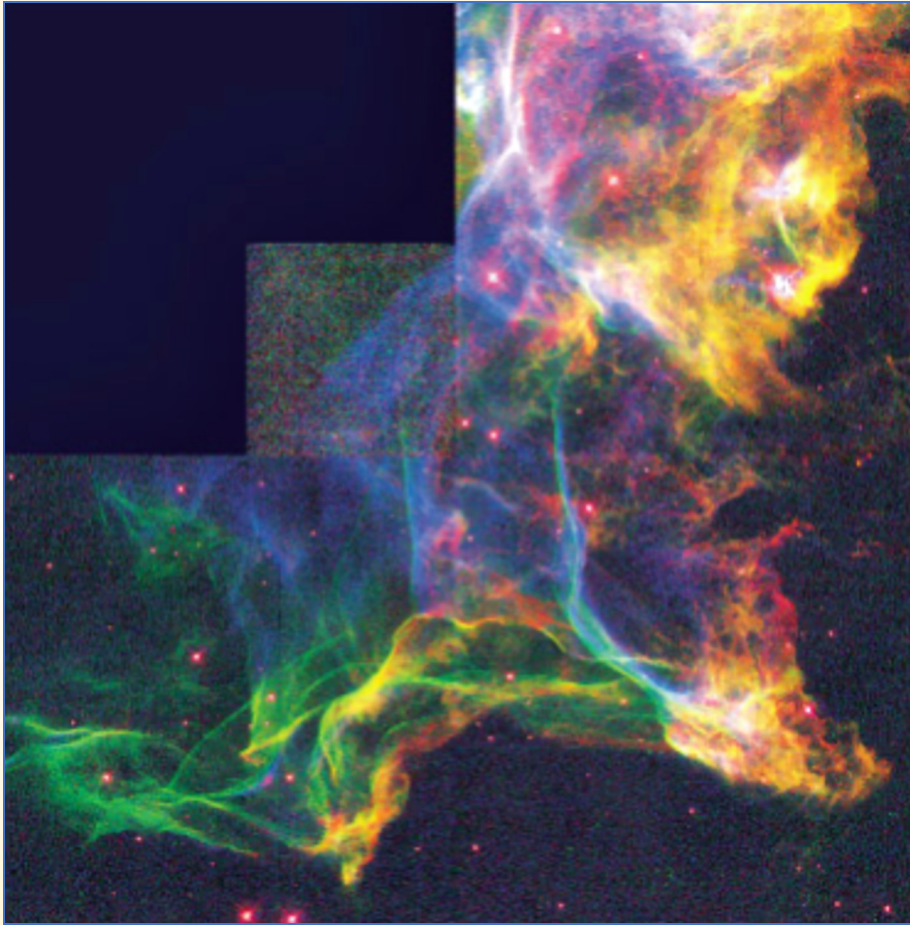
La cantidad de energía liberada es tan grande, que la mayoría de los elementos más pesados que el Fe se crean en este instante !

En el último milenio, cuatro supernovas se han observado en nuestra parte de la Vía Láctea: en 1006, 1054, 1572 y 1604.

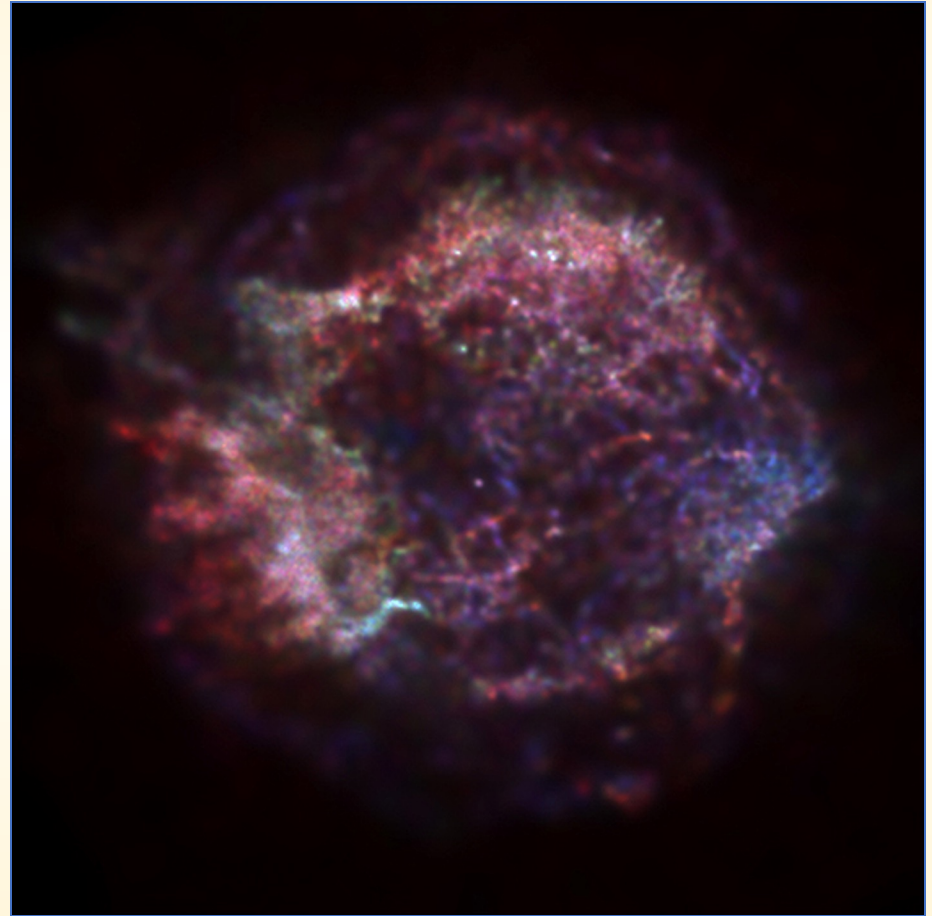
*Crab Nebula* (Nebulosa del Cangrejo) en *Taurus*  
supernova explotó en 1054



# Más Supernovae



*Veil Nebula*



*Supernova de Tycho (X-rays)*  
Explotó en 1572

# Estrellas binarias cercanas

La mayoría de las estrellas no son individuales – son sistemas binarios o múltiples. Estrellas binarias complican nuestro modelo de la evolución estelar. Recuerde que la masa determina el camino de la vida de una estrella. Dos estrellas en un sistema binario pueden estar lo suficientemente cerca para que exista una transferencia de masa de una a la otra. Ganando o perdiendo masa va a cambiar la ruta de la vida de una estrella. Por ejemplo, considera la estrella Algol en la constelación de Perseo. Algol es una estrella binaria eclipsante formado por

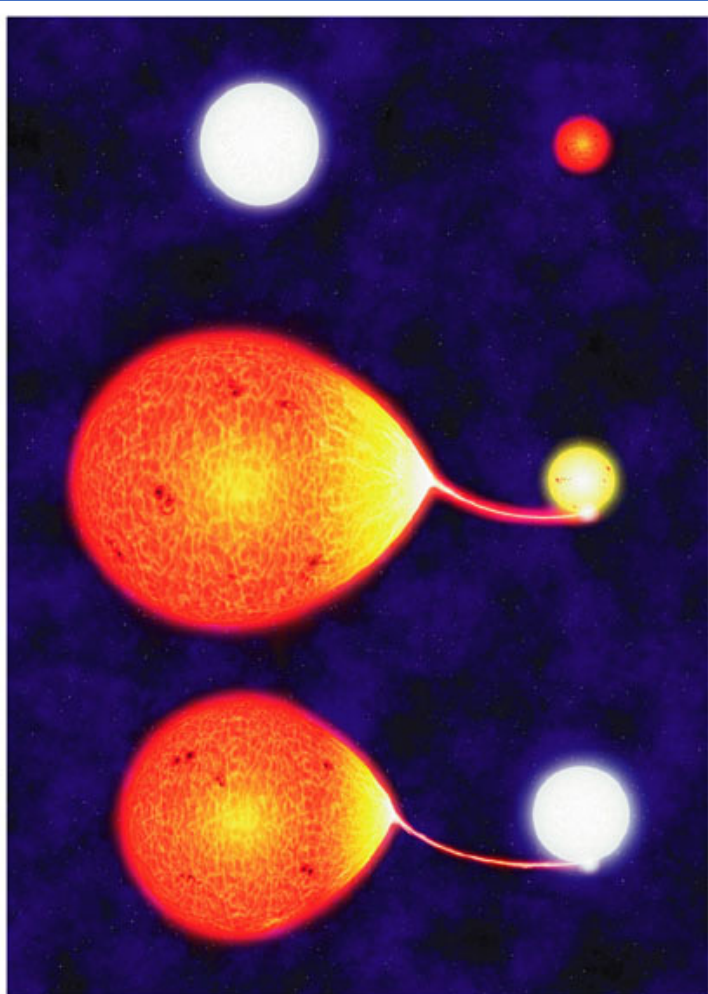
una estrella de secuencia principal con masa  $M = 3,7 M_{\text{sun}}$

una subgigante con masa  $M = 0,8 M_{\text{sun}}$

- Ya que están en un binario, ambas estrellas nacieron al mismo tiempo. Sin embargo, la estrella menos masiva, que debería haber evolucionado más lentamente, se encuentra en una etapa más avanzada de la vida. Esta aparente contradicción con nuestro modelo de la evolución estelar se conoce como la **Paradoja de Algol**.

# La Paradoja de Algol

- Esta paradoja se explica por el intercambio de masa.
- La estrella sub-gigante de 0.8 Msun solía ser la más masiva de las dos estrellas.



Cuando el binario Algol se formó:

se trataba de una estrella de 3 Msun con un compañero de 1,5 Msun.

Como la estrella 3 Msun evolucionó hasta convertirse en una gigante roja, las fuerzas de marea comenzaron a deformar la estrella y su superficie estaba bastante cerca de la otra estrella para que la gravedad de la otra estrella sacara materia.

Como resultado del intercambio de masa, hoy ...el gigante perdió 2,2 Msun y se ha encogido en una estrella subgigante y el compañero es ahora una estrella de MS de 3,7 Msun