

Estrellas

Ernesto Nicola

Palma de Mallorca, 25-11-2021



Contenido de la charla

1 Mecanismos Estelares

- Generación de Energía
- Balance Energético
- Composición

2 Caracterización de las Estrellas

- Parámetros Principales
- Diagramas Hertzsprung-Russell
- Clasificación Estelar

3 Evolución Estelar

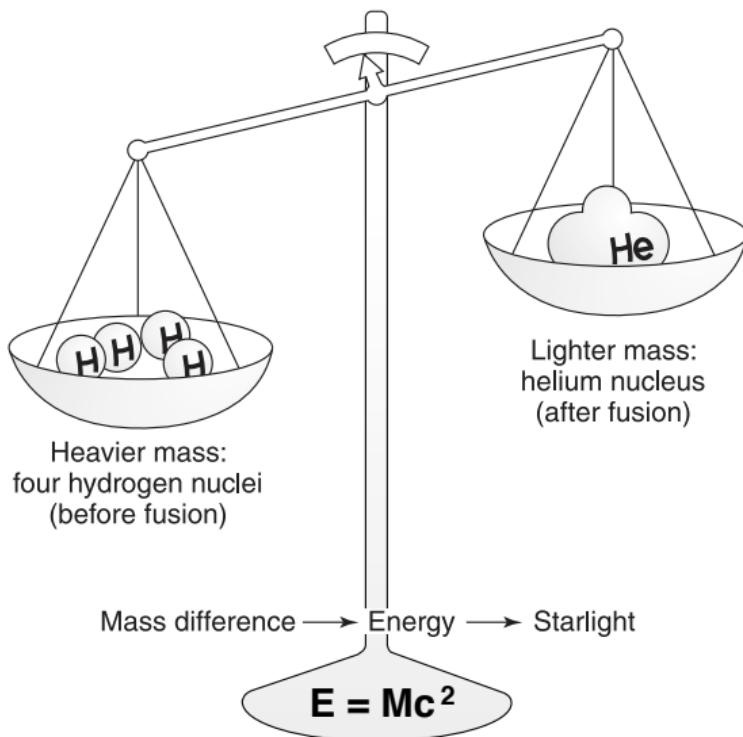
- Estrellas Rojas
- Estrellas Amarillas
- Estrellas Blancas
- Estrellas Azules
- Síntesis

Mecanismos Estelares

Mecanismos Estelares

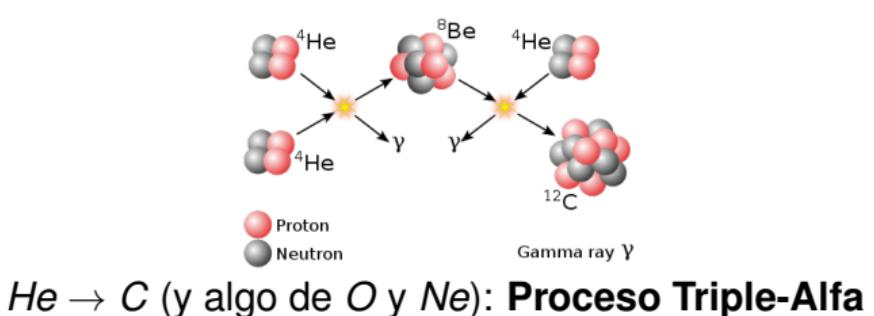
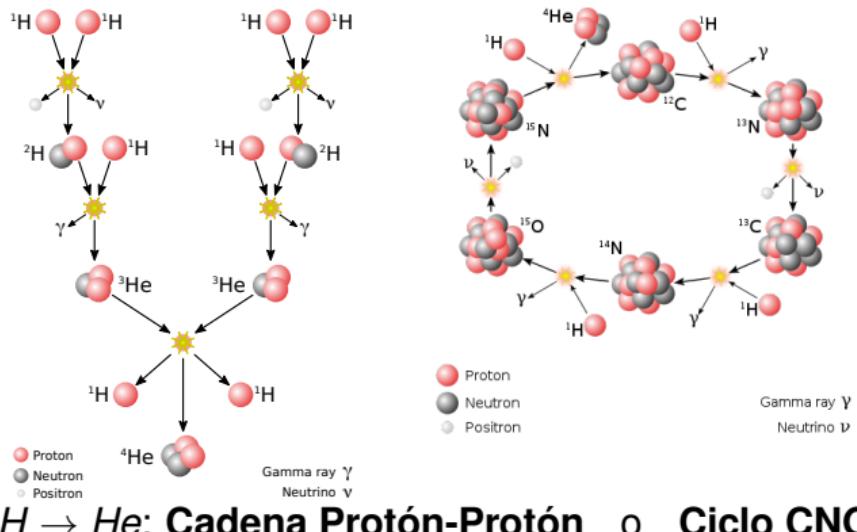
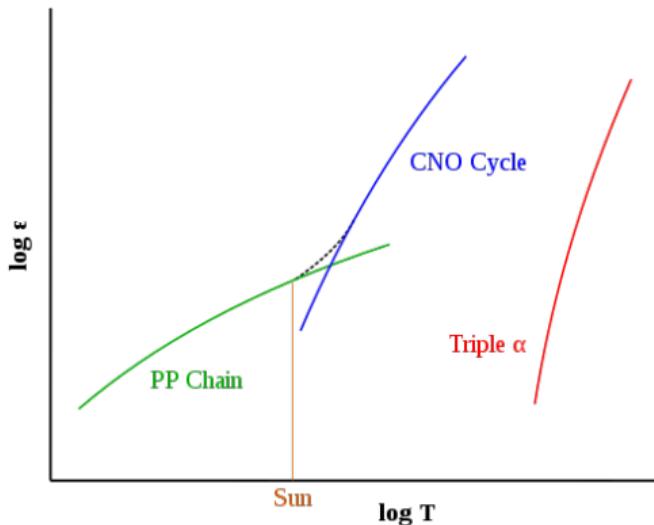
1. Generación de Energía

Fusión Nuclear en el Interior de una Estrella

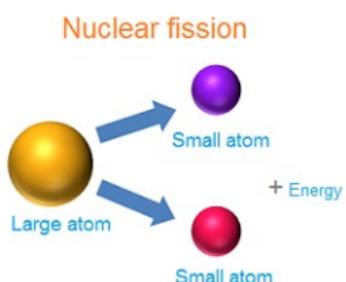
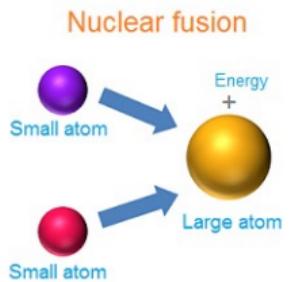
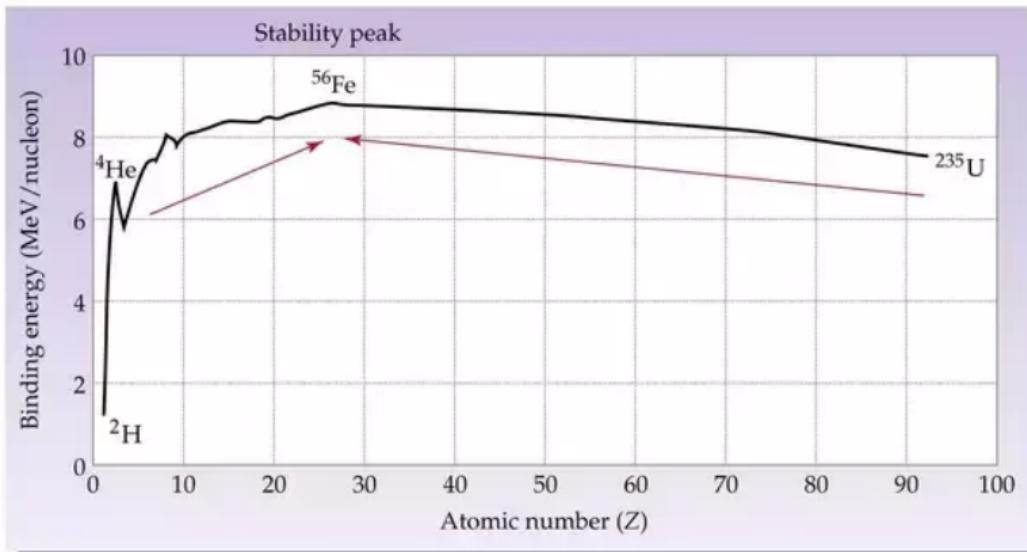


- La fuente principal de energía de una estrella es la fusión del Hidrógeno en la cual se convierten 4 núcleos de Hidrógeno en uno de Helio, liberando energía.
- Dependiendo de la masa de la estrella, en estadios más tardíos, también puede fusionar otros elementos (e.g.: Helio, Carbono, etc.) obteniendo energía.
- Clave: $E = mc^2$; al ser c muy grande, un pequeño cambio en la masa genera una gran cantidad de energía.

Fusión Nuclear en el Interior del Sol



Energía producida al unir o partir un átomo



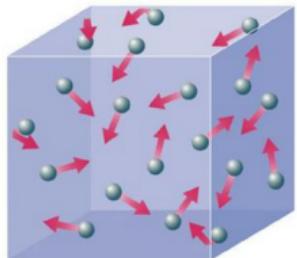
- La fusión de átomos pequeños (entre H y Fe) produce energía: núcleo liviano + núcleo liviano = núcleo más pesado + energía
- La fisión de átomos grandes (entre Fe y U) produce energía: núcleo pesado = núcleo más liviano + núcleo más liviano + energía

Mecanismos Estelares

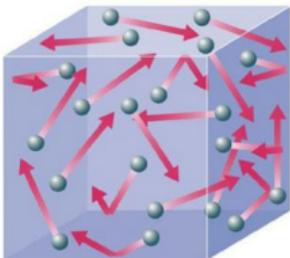
2. Balance Energético

El Tamaño de la Estrella y el Equilibrio Hidrostático

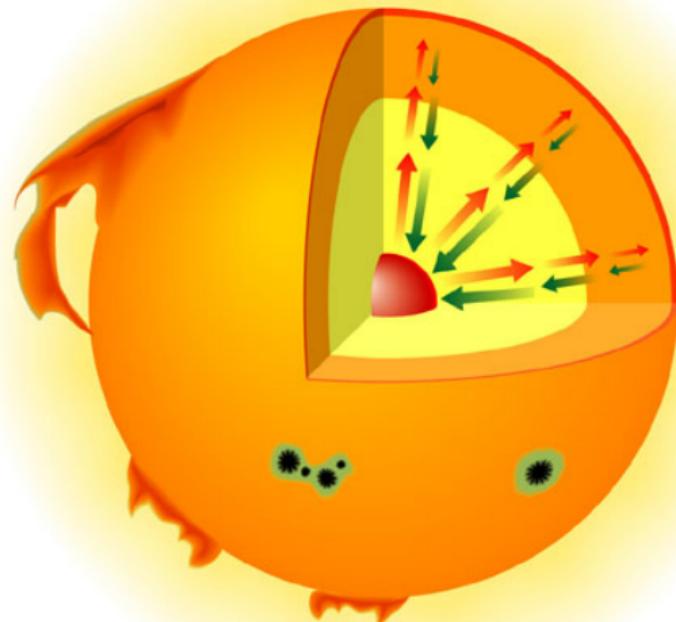
temperatura baja



temperatura alta



pressure →
gravity ←



- El tamaño de la estrella está determinado por el **equilibrio hidrostático** entre la presión debida a la alta temperatura en el interior y la fuerza de la gravedad.

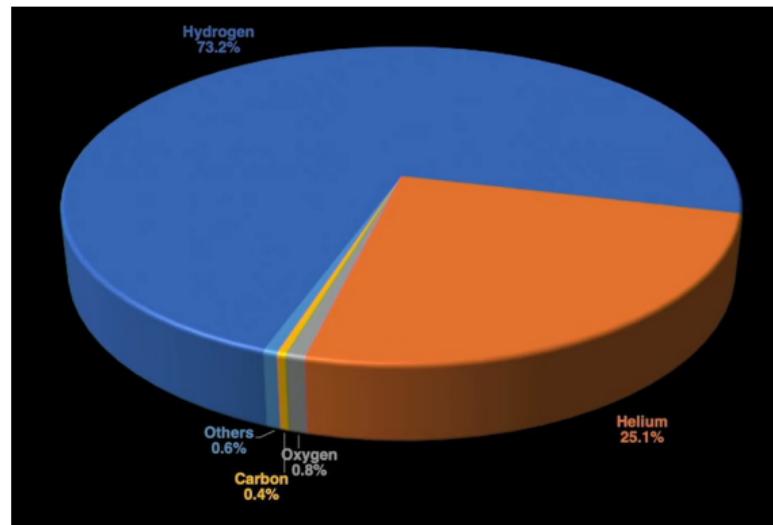
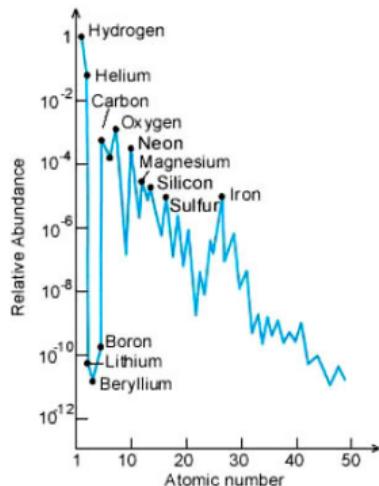
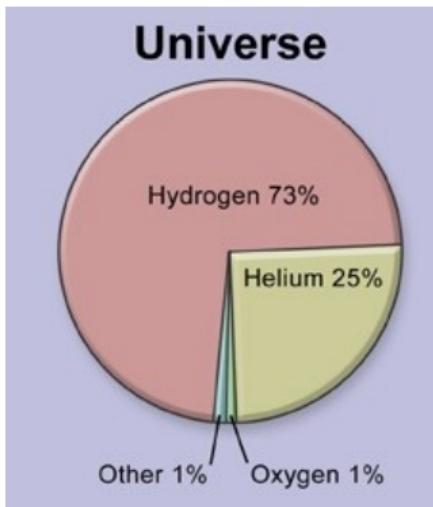
Mecanismos Estelares

3. Composición de una Estrella

Composición de la masa actual de la materia del universo

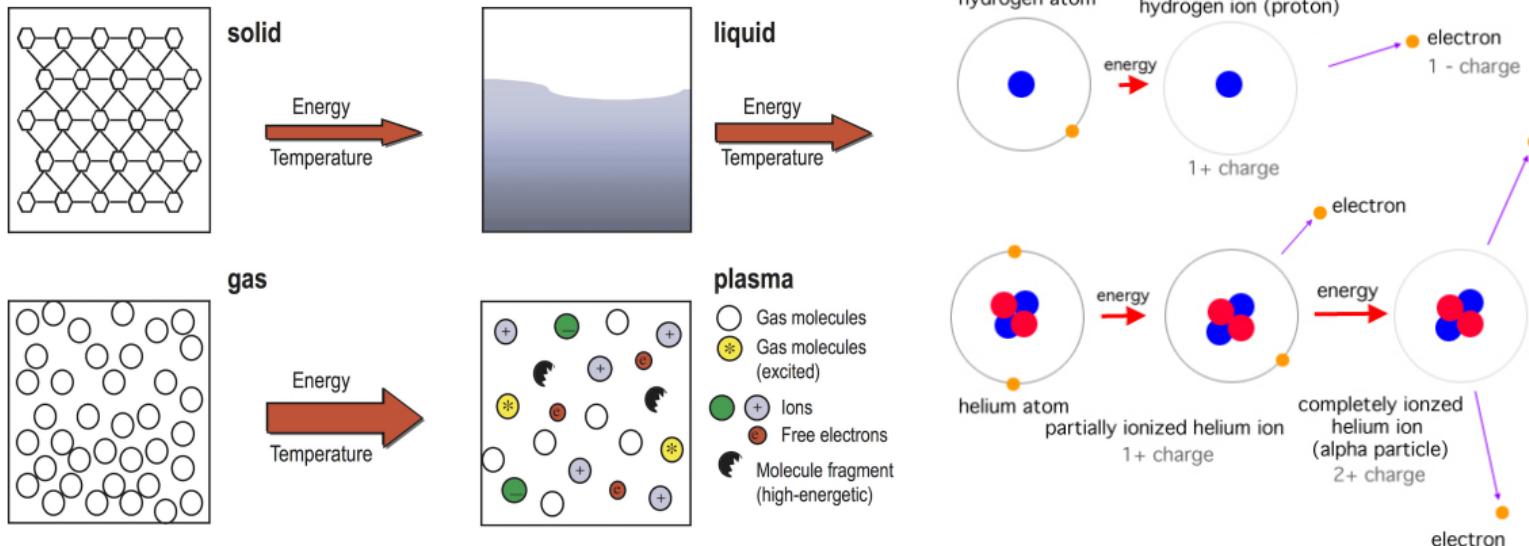
La masa actual de la materia del universo está compuesta de:

- 73% de Hidrógeno
- 24% de Helio
- 1% de Oxígeno
- El resto de los elementos de la tabla periódica suman solo el 1%



- La composición típica de las estrellas es prácticamente la misma que la del Universo

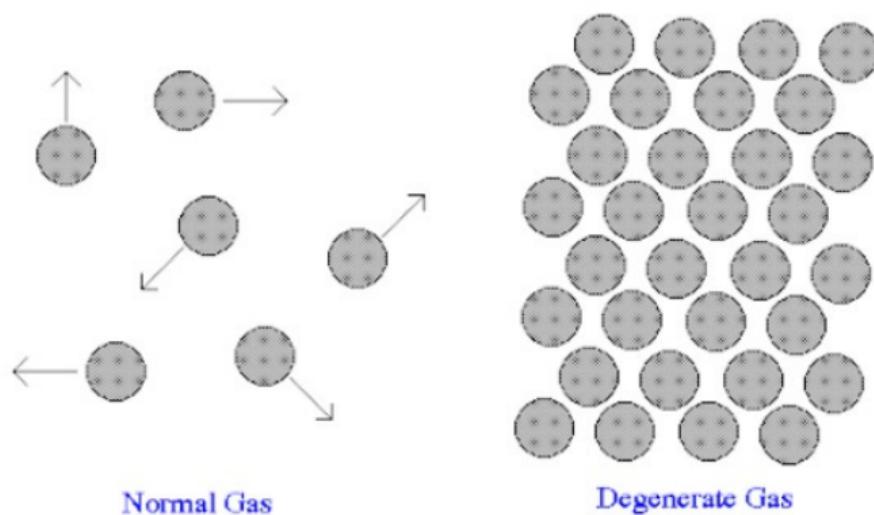
Estado de la Materia dentro de una Estrella: Plasma



- El plasma se puede caracterizar como un gas ionizado
- El plasma es un estado fluido similar al estado gaseoso pero en el que determinada proporción de sus partículas (átomos o moléculas) están cargadas eléctricamente (ionizadas) y no poseen equilibrio electromagnético.
- Los plasmas son buenos conductores eléctricos y sus partículas responden fuertemente a las interacciones electromagnéticas de largo alcance.

Gases o Plasmas a Altísimas Presiones: Materia Degenerada

- Cuando un gas se sujeto a altísimas presiones sus átomos (o núcleos) no pueden moverse libremente, convirtiéndose en materia degenerada

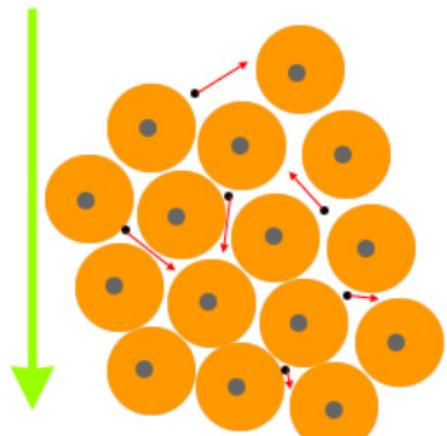


- Degeneración de electrones:
 - los átomos están completamente compactados
 - se observa en enanas blancas
- Degeneración de neutrones:
 - Los núcleos están completamente compactados
 - los electrones son forzados a combinarse con protones para dar lugar a neutrones
 - Efectos cuánticos impiden a los neutrones estar en el mismo sitio
 - Este mecanismo se observa en las estrellas de neutrones

Tipos de materia degenerada:

Gases a Altísimas Presiones: Materia Degenerada

white dwarf



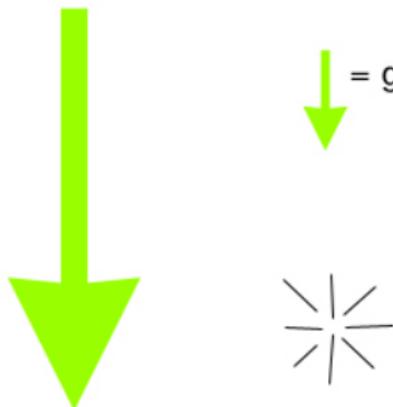
electrons run out of room
to move around nuclei;
are forced into lowest energy
quantum states

neutron star



protons are forced to absorb
electrons to make neutrons;
neutrons squeezed together

black hole



neutrons completely
collapse

Caracterización de las Estrellas

Caracterización de las Estrellas

1. Parámetros Principales

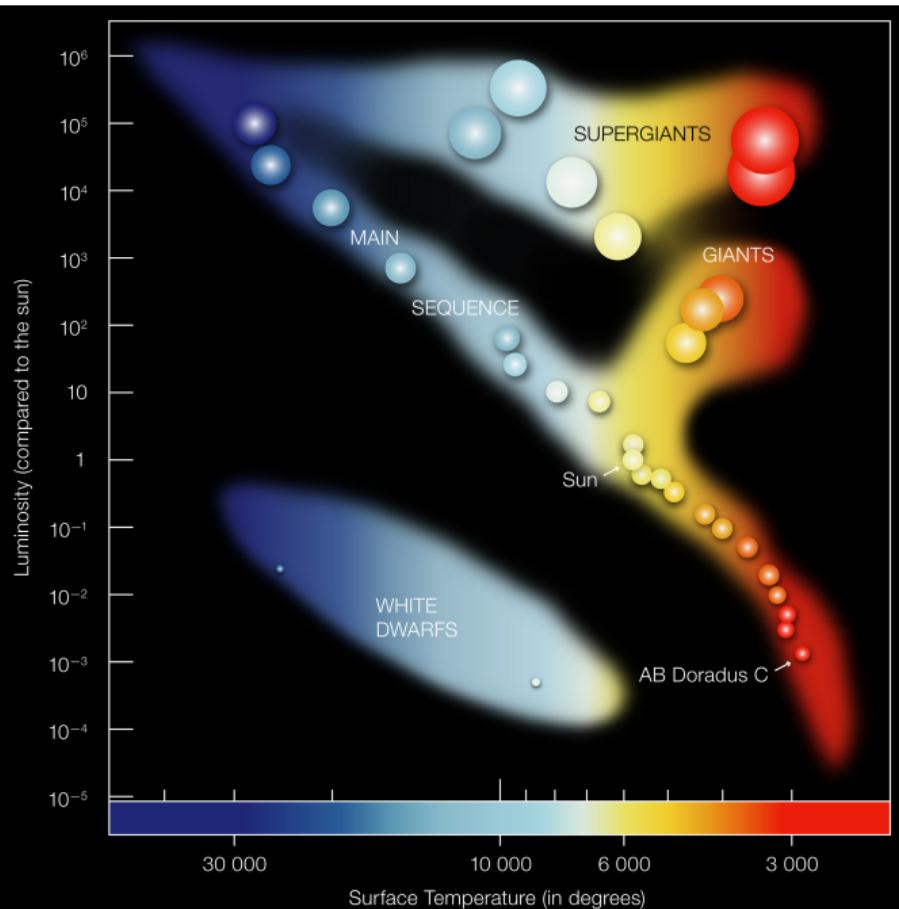
Parámetros Principales de las Estrellas

- Hay cuatro magnitudes relevantes para toda estrella:
 - Luminosidad (\propto Magnitud Absoluta)
 - Diámetro
 - Temperatura Superficial
 - Masa
- A lo largo de la vida de una estrella la luminosidad, el diámetro y su temperatura superficial cambian!
- La Masa de una estrella permanece relativamente constante

Caracterización de las Estrellas

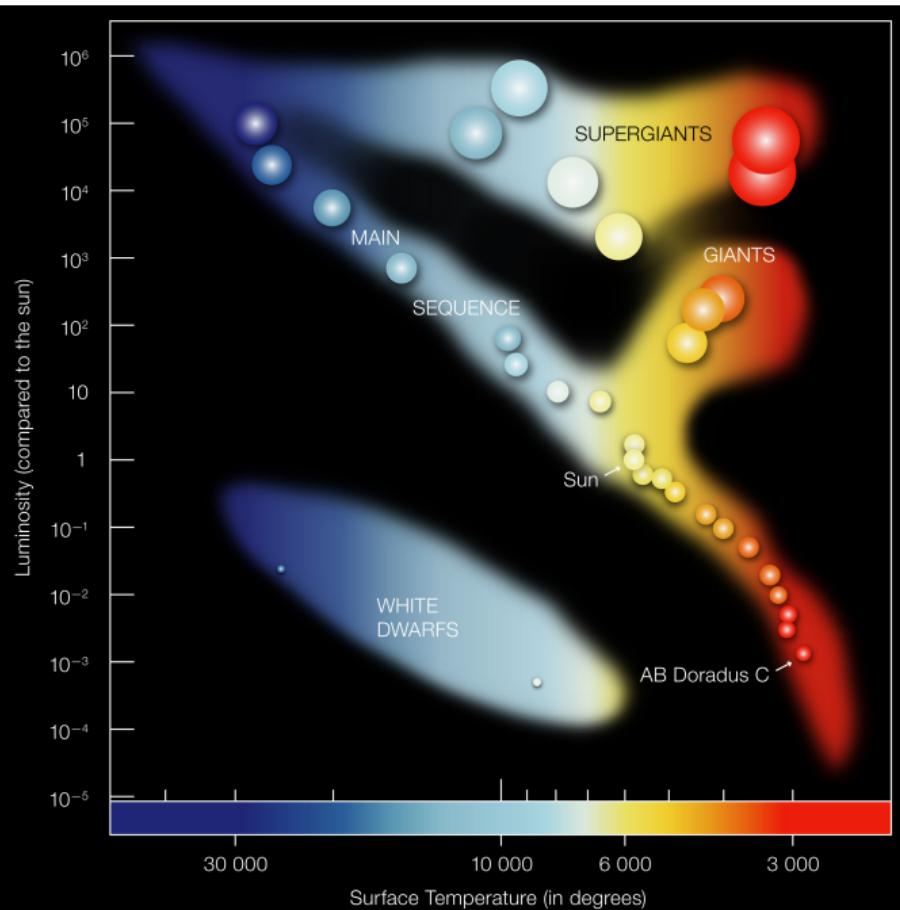
2. Diagrama Hertzsprung-Russell

Diagrama de Hertzsprung-Russell ("Diagrama H-R")



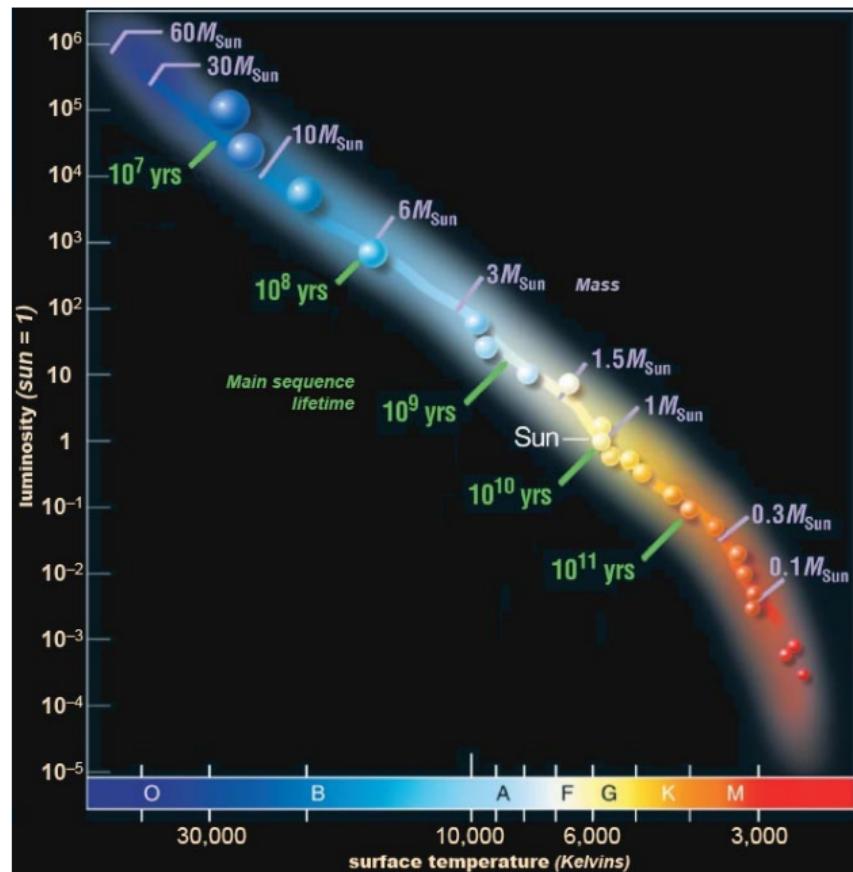
- El diagrama de H-R es la "piedra Rosetta" de las estrellas: nos permite analizar de la diversidad de estrellas existentes
- Eje Horizontal: Temperatura de la superficie de la estrella (notar que a la izquierda están las estrellas más calientes). La temperatura está correlacionada con el color visible de la estrella
- Eje Vertical: Luminosidad de la estrella (típicamente indicado de manera comparativa con la luminosidad del Sol)
- Otras características de las estrellas no incluidas: Tamaño, Masa, Temperatura en el núcleo.

Diagrama de Hertzsprung-Russell ("Diagrama H-R")



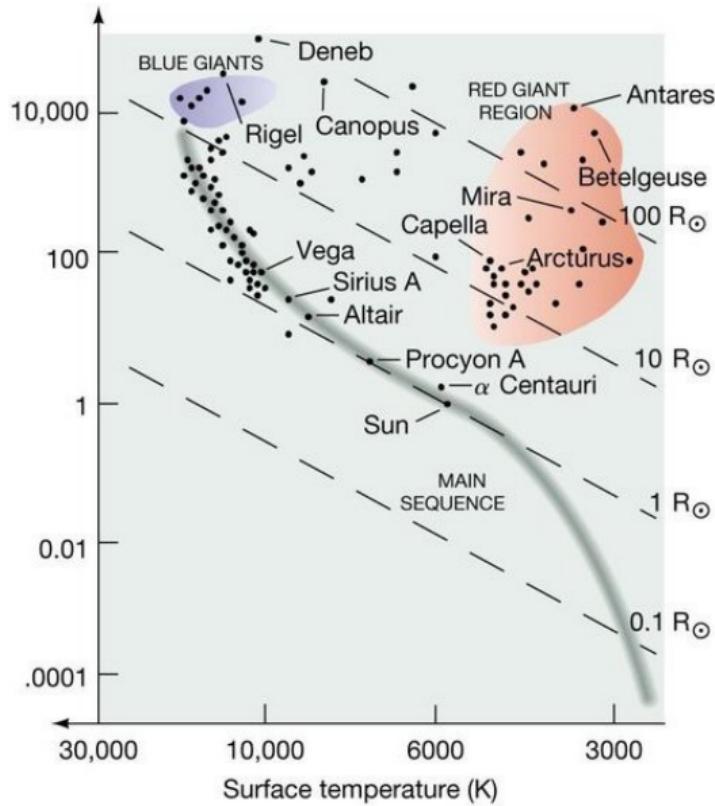
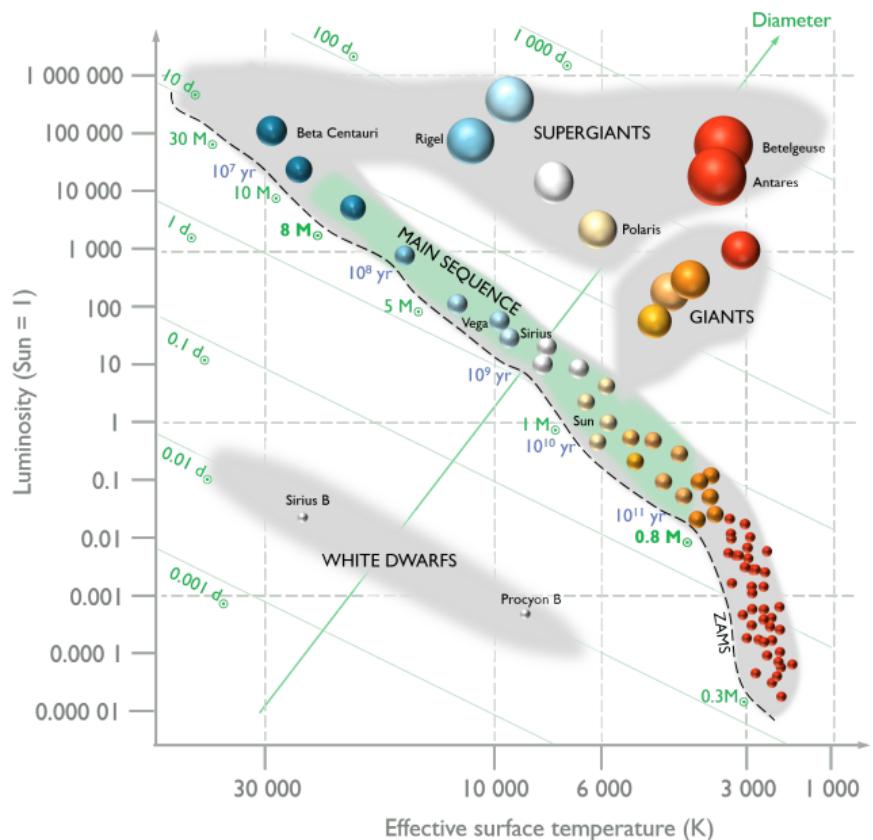
- Zonas del diagrama H-R
 - Secuencia Principal
 - Gigantes Rojas
 - Súper-gigantes Rojas
 - Enanas Blancas

Estrellas en la Secuencia Principal



- La secuencia principal es una "línea" larga debido a la forma que las estrellas generan energía
- En la secuencia principal las estrellas producen energía fusionando H en He en su núcleo
- Las estrellas que fusionan hidrógeno más rápidamente, generarán más calor ya que están produciendo más energía
- La velocidad de fusión en el núcleo depende de la presión el núcleo.
- Estrellas más masivas comprimen más el H en su núcleo y por lo tanto tienen una velocidad de fusión mayor calentándose más que estrellas menos masivas.

Diagrama H-R para algunas estrellas conocidas

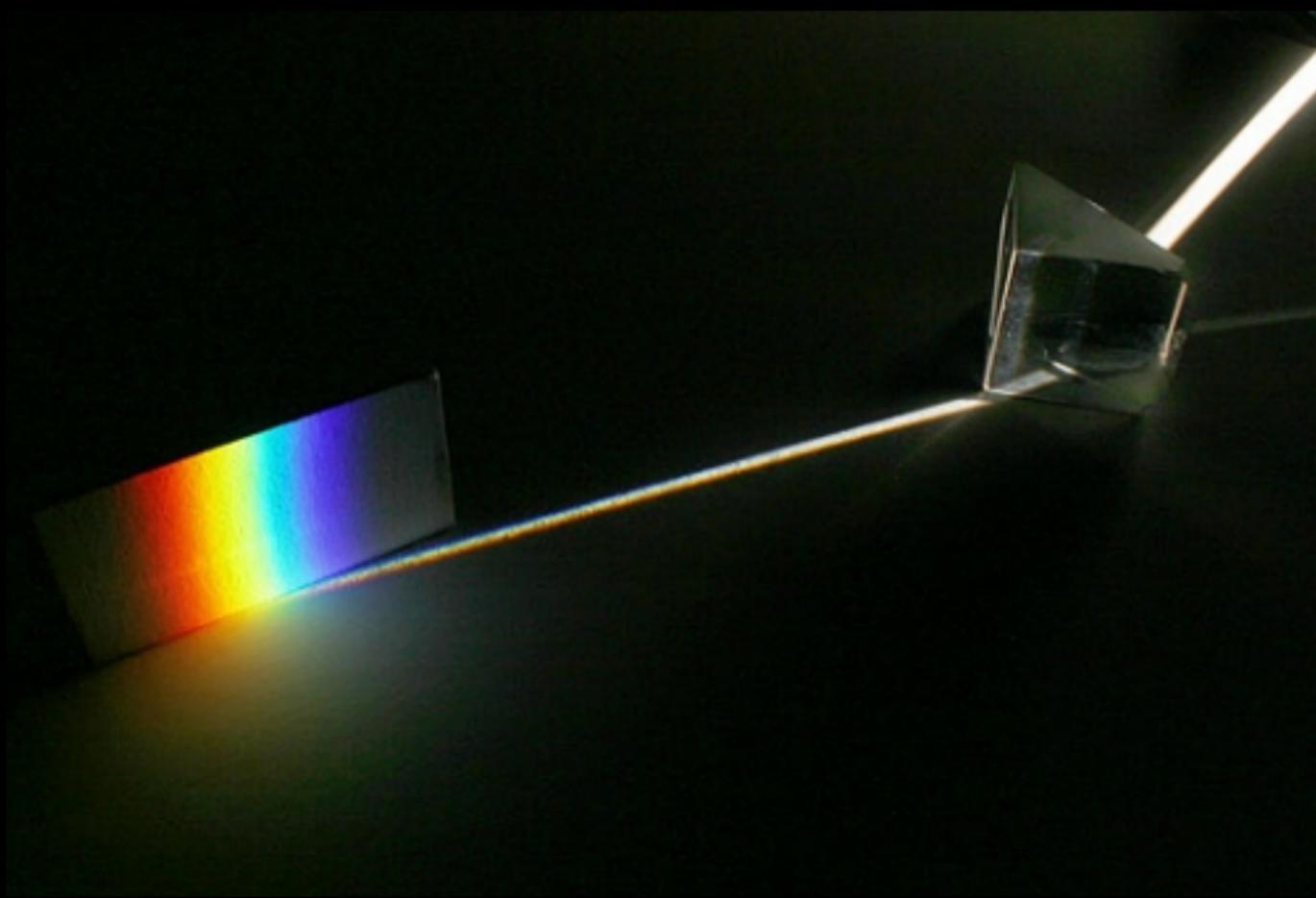


Spectral classification

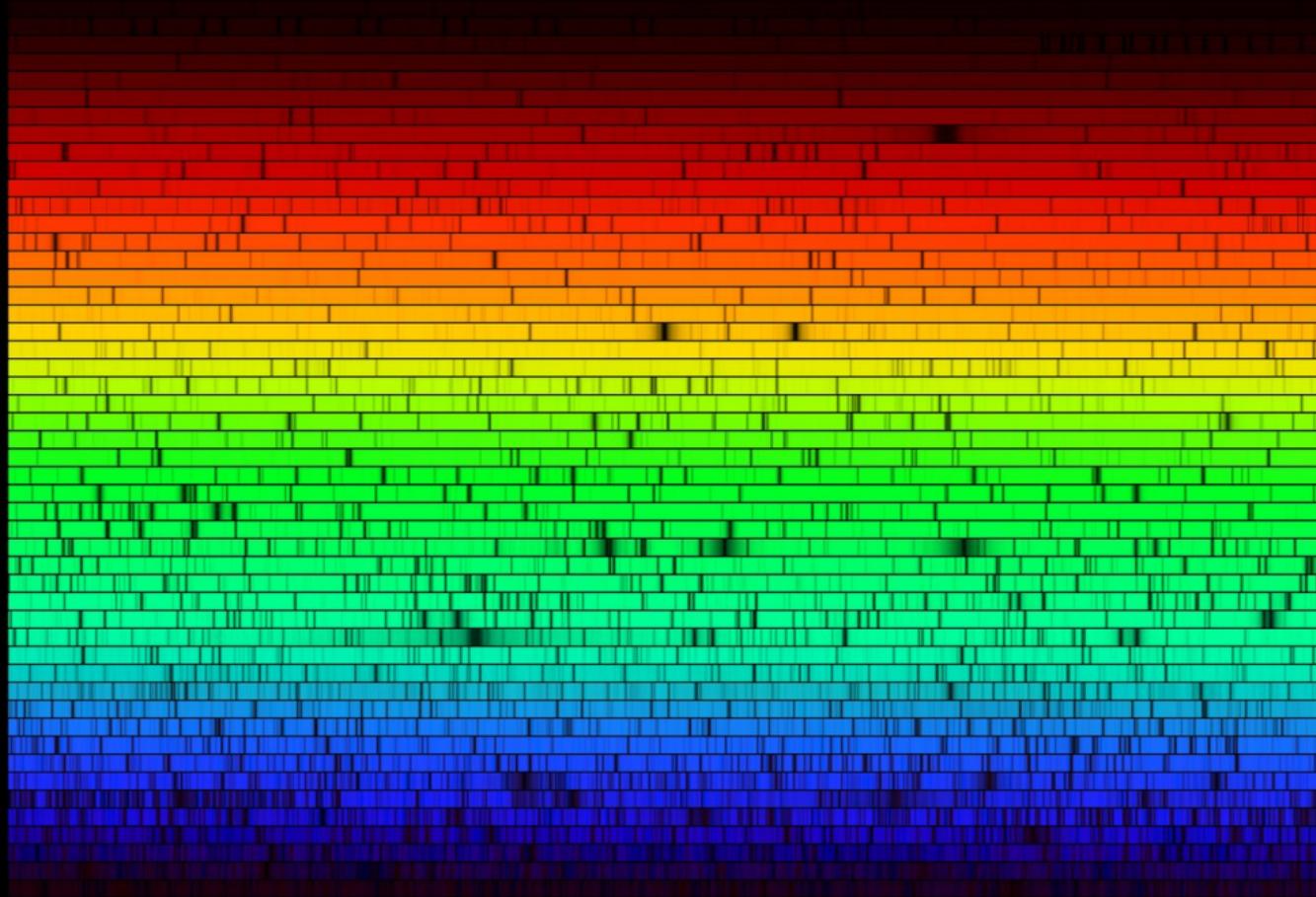
Caracterización de las Estrellas

3. Clasificación Estelar

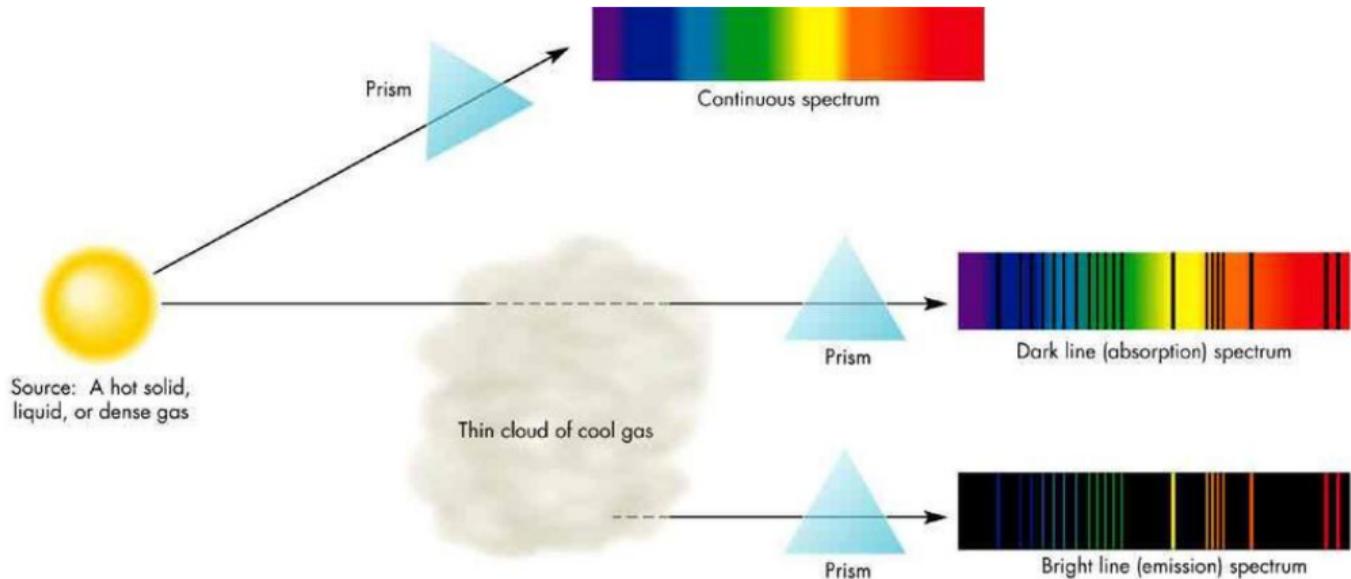
Espectro de la Luz Visible



Espectro de la Luz Visible producido por una Estrella Típica (Sol)

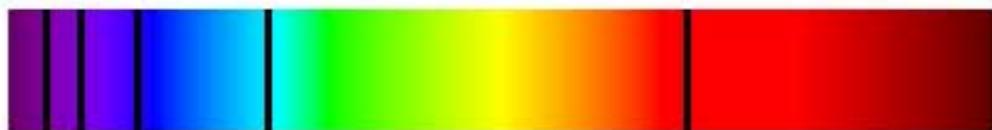


Efecto de una Atmósfera en el Espectro de la Luz Visible



Efecto del Hidrógeno en el Espectro de la Luz Visible

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum

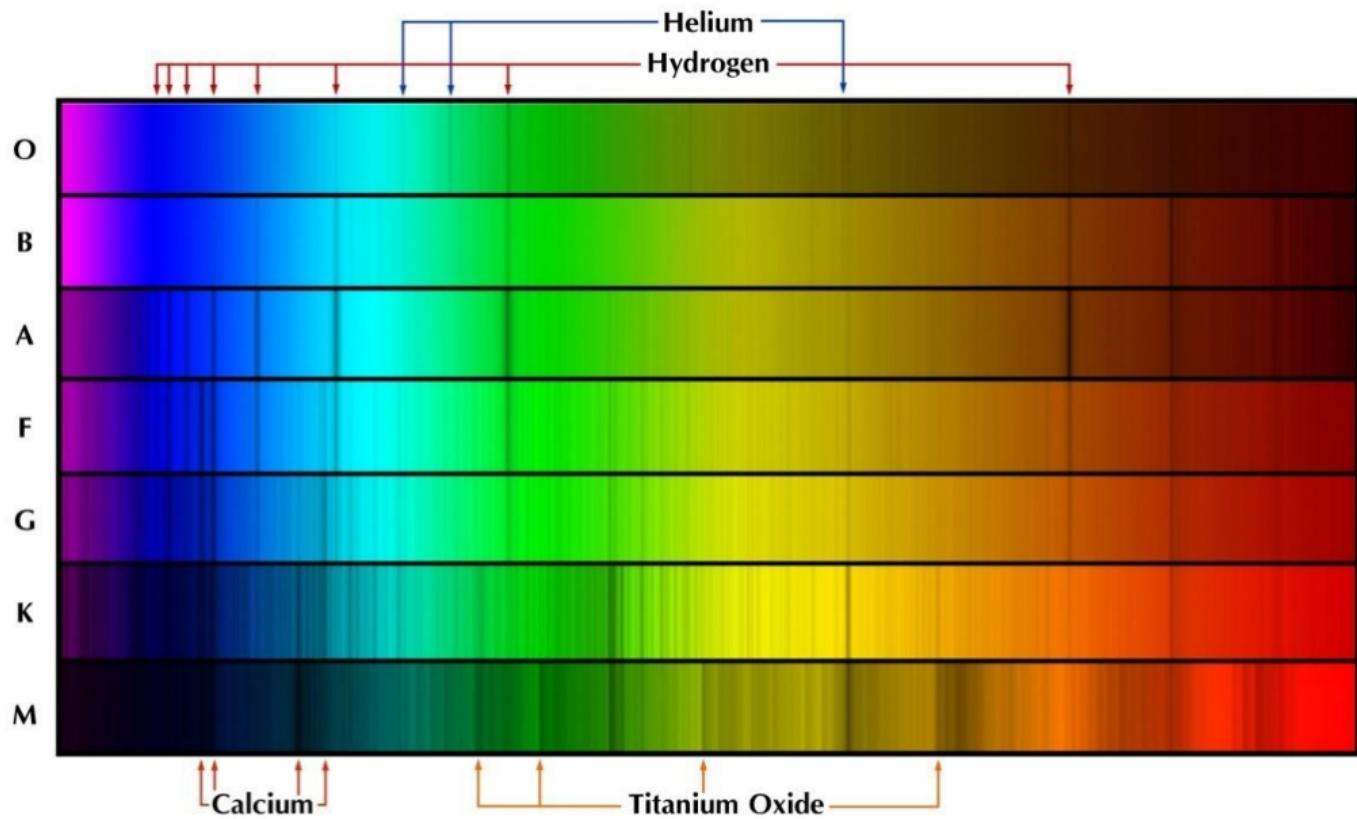


400nm

700nm

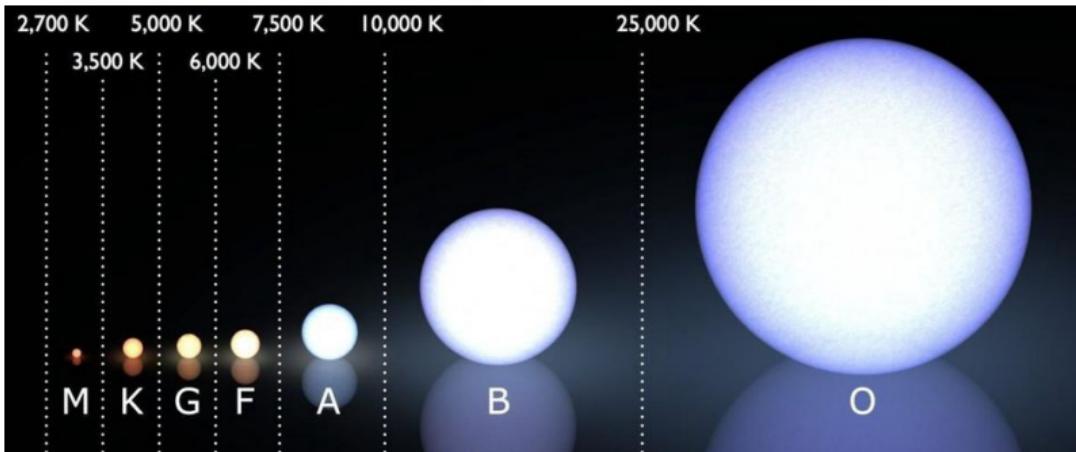
H Alpha Line
656nm
Transition N=3 to N=2

Clasificación Moderna de las Estrellas según su Espectro



Clasificación Moderna de las Estrellas según su Espectro

	Class	Temperature	Apparent color	Hydrogen lines	Other noted spectral features
O	O	$\geq 30,000$ K	blue	Weak	ionized helium lines
B	B	10,000–30,000 K	blue white	Medium	neutral helium
A	A	7,500–10,000 K	white to blue white	Strong	ionized calcium (weak)
F	F	6,000–7,500 K	white	Medium	ionized calcium (weak)
G	G	5,200–6,000 K	yellowish white	Weak	ionized calcium (medium)
K	K	3,700–5,200 K	yellow orange	Very weak	ionized calcium (strong)
M	M	$\leq 3,700$ K	orange red	Very weak	Titanium oxide lines

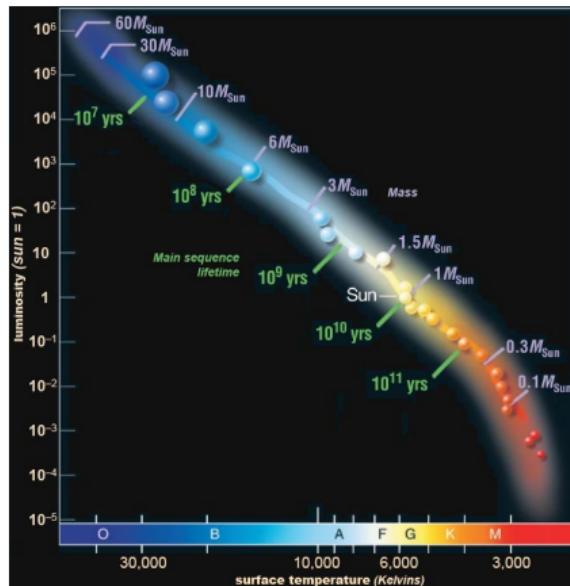


Clasificación de Estrellas en la Secuencia Principal

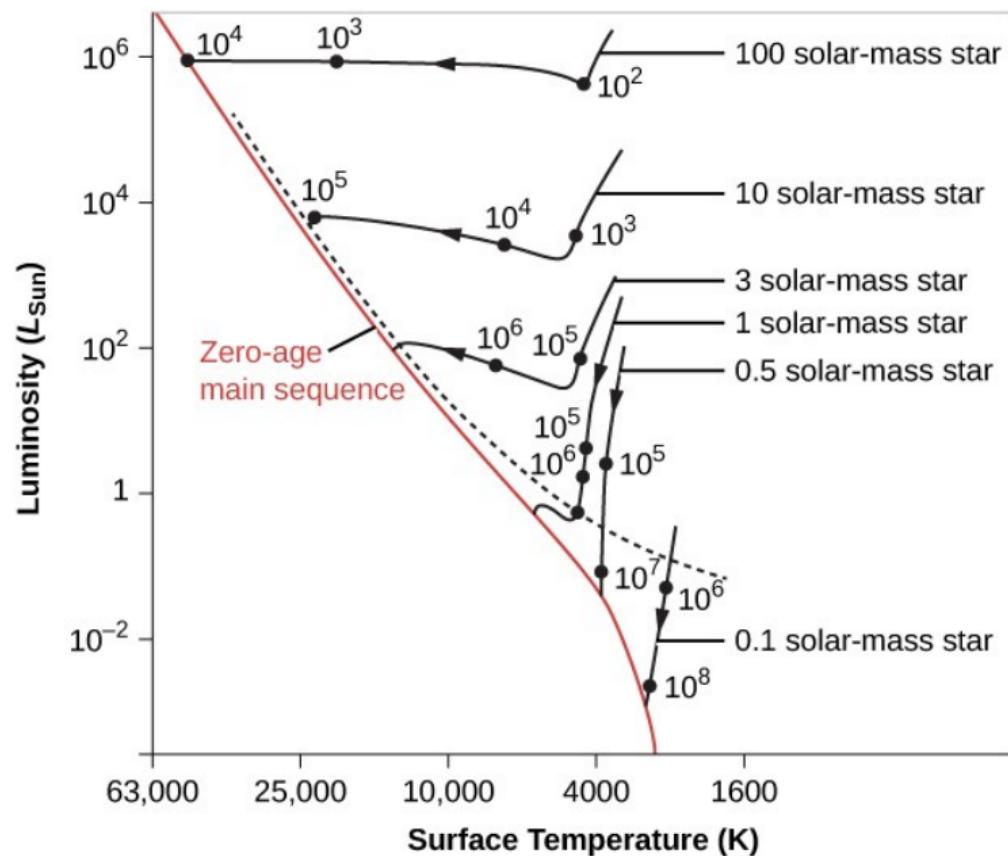
Tipo de Estrella	Masa	Fusión H	Fusión He	Fusión C-Fe	Punto Final
Rojas	$0.1 < \frac{M}{M_{Sol}} < 0.5$	si	no	no	Enana Blanca
Amarillas	$0.5 < \frac{M}{M_{Sol}} < 8$	si	si	no	Nebulosa Planetaria + Enana Blanca
Blancas	$8 < \frac{M}{M_{Sol}} < 20$	si	si	si	Supernova + Remanente de Supernova + Estrella de Neutrones
Azules	$20 < \frac{M}{M_{Sol}} < \sim 100$	si	si	si	Supernova + Remanente de Supernova + Agujero Negro

Clasificación de Estrellas en la Secuencia Principal

Tipo	~Clasif.	Masa	Temperatura (sup.)	Prevalencia
Rojas	M, K	$0.1 < \frac{M}{M_{\text{Sol}}} < 0.5$	$3000K < T_{\text{sup}} < 5000K$	$\sim 90\%$
Amarillas	G, F	$0.5 < \frac{M}{M_{\text{Sol}}} < 8$	$5000K < T_{\text{sup}} < 8000K$	$\sim 10\%$
Blancas	A, B	$8 < \frac{M}{M_{\text{Sol}}} < 20$	$8000K < T_{\text{sup}} < 25000K$	$\sim 1\%$
Azules	O	$20 < \frac{M}{M_{\text{Sol}}} < \sim 100$	$25000K < T_{\text{sup}}$	$\sim 0.1\%$

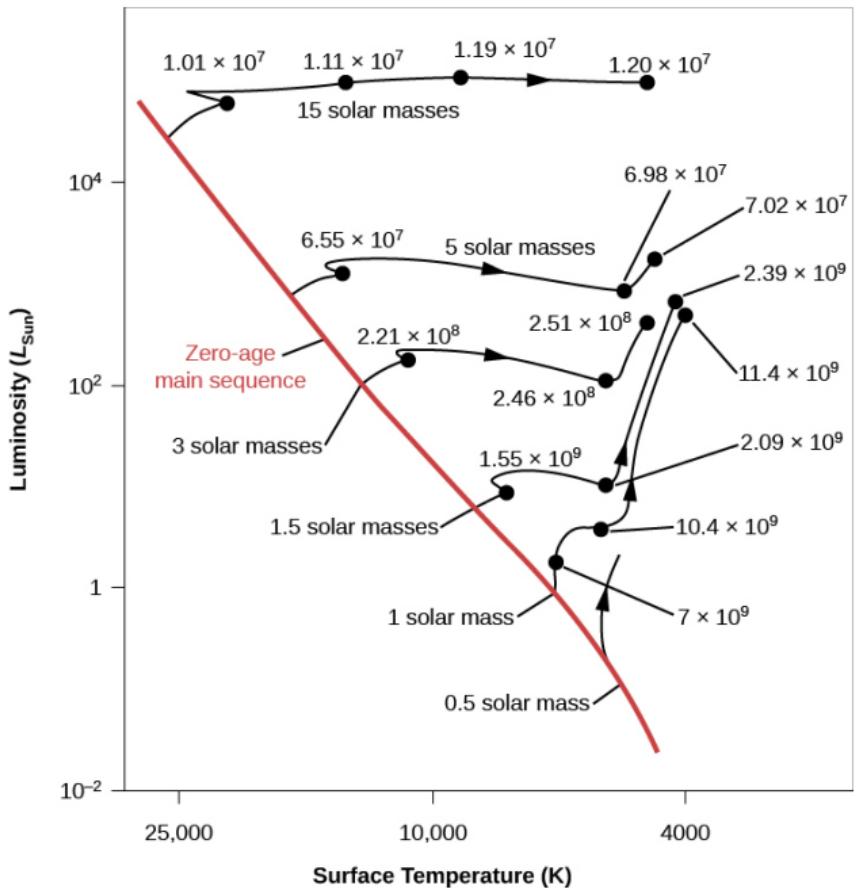


Trayectorias en el Diagrama H-R de Proto-estrellas contrayéndose



- Trayectorias de proto-estrellas de distinta masa inicial contrayéndose
- Los números en cada trayectoria es el tiempo en años que tarda en pasar por cada punto
- Inicialmente las proto-estrellas no son visibles ya que están rodeadas de una capa material opaco que está cayendo sobre la estrella (este material desaparece aproximadamente donde está la línea punteada).

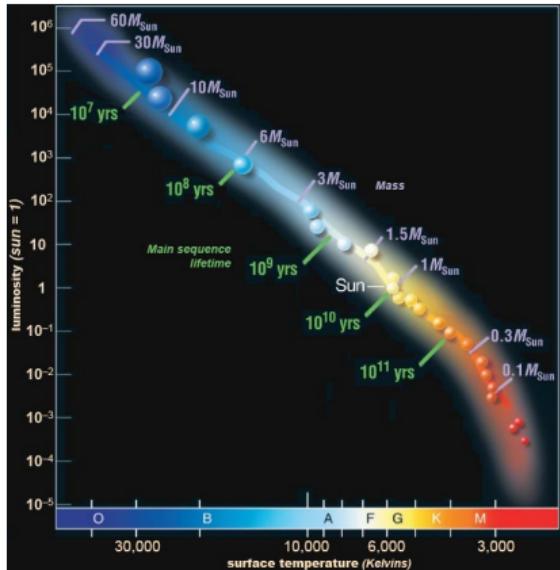
Trayectorias en el Diagrama H-R después de la Secuencia Principal



- Trayectorias de estrellas de distinta masa hasta alcanzar la fase de gigante roja o super-gigante roja
- Las estrellas más masivas, envejecen más rápido, pasando más rápido por cada una de las etapas en su vida

Tiempo de Vida de las Estrellas

Masa [M_{Sol}]	Luminosidad [L_{Sol}]	Vida [años]
0.5	0.03	180.000.000.000
0.75	0.3	30.000.000.000
1.0	1	11.000.000.000
1.5	5	3.300.000.000
3	60	550.000.000
15	17.000	10.000.000
25	80.000	3.400.000

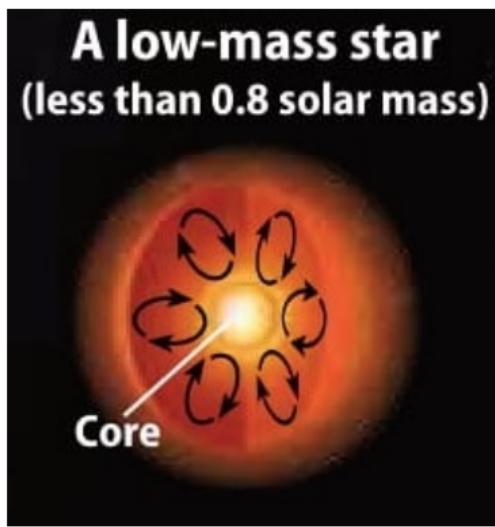
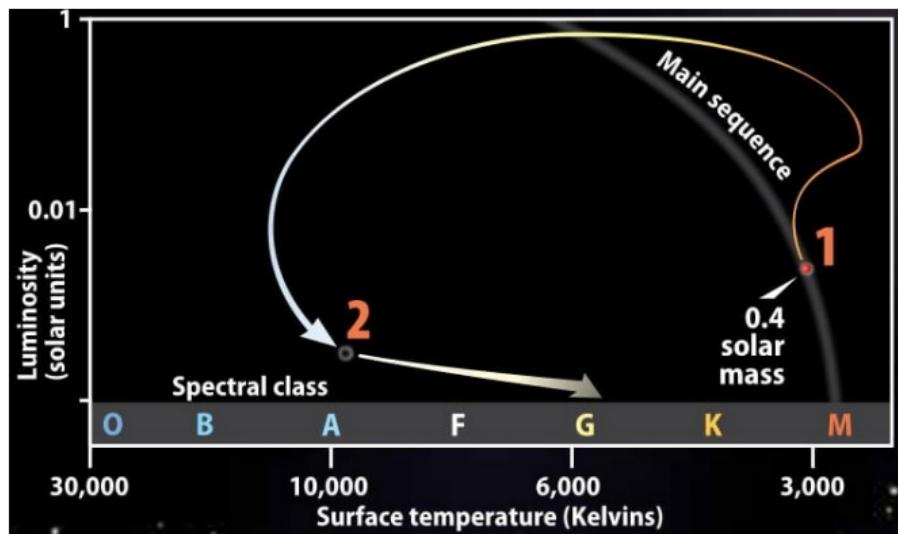


Evolución Estelar

Evolución Estelar

1. Estrellas Rojas ($0.1 < \frac{M}{M_{Sol}} < 0.5$)

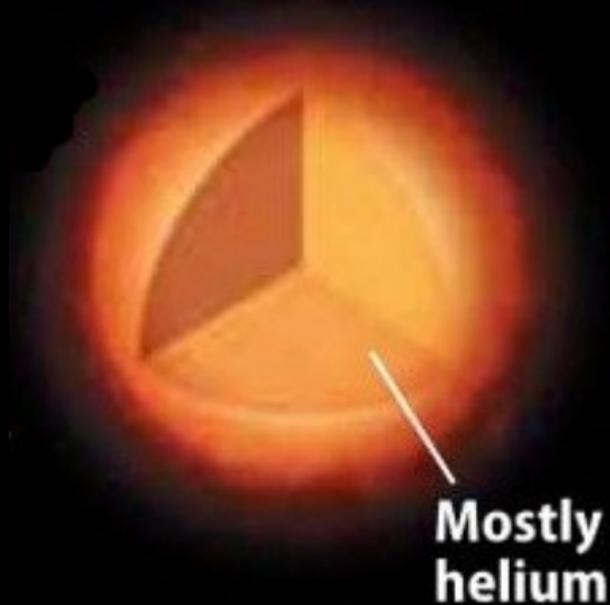
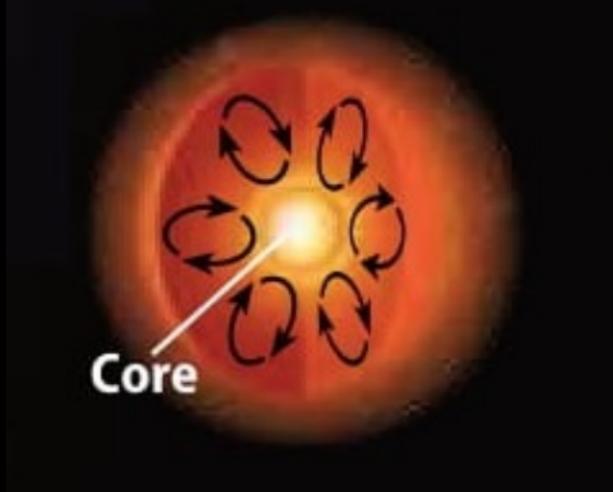
Evolución de las Estrellas Rojas ($0.1 < M/M_{Sol} < 0.5$)



- Las estrellas rojas tienen vidas larguísimas (mayores a la edad actual del universo)
- El núcleo de la estrella nunca alcanza la temperatura necesaria para fusionar He .
- Debido a que la convección mezcla continuamente los componentes de la estrella, prácticamente todo el H de la estrella es convertido en He
- Este tipo de estrellas no llegan a tener una fase de gigante roja
- El estadio final es una enana blanca (que eventualmente se convierte en una enana negra)

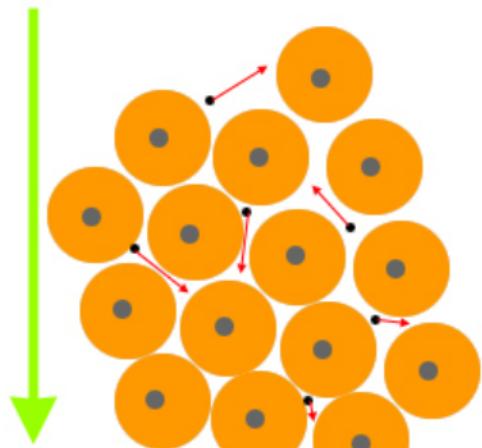
Interior y Núcleo de una Estrella Roja

**A low-mass star
(less than 0.8 solar mass)**



Producto Final de la Evolución: Enana Blanca de Helio

white dwarf



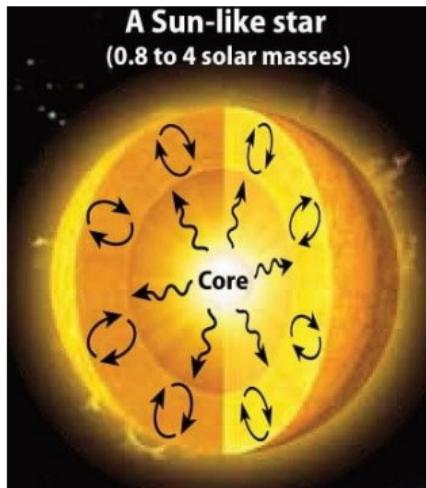
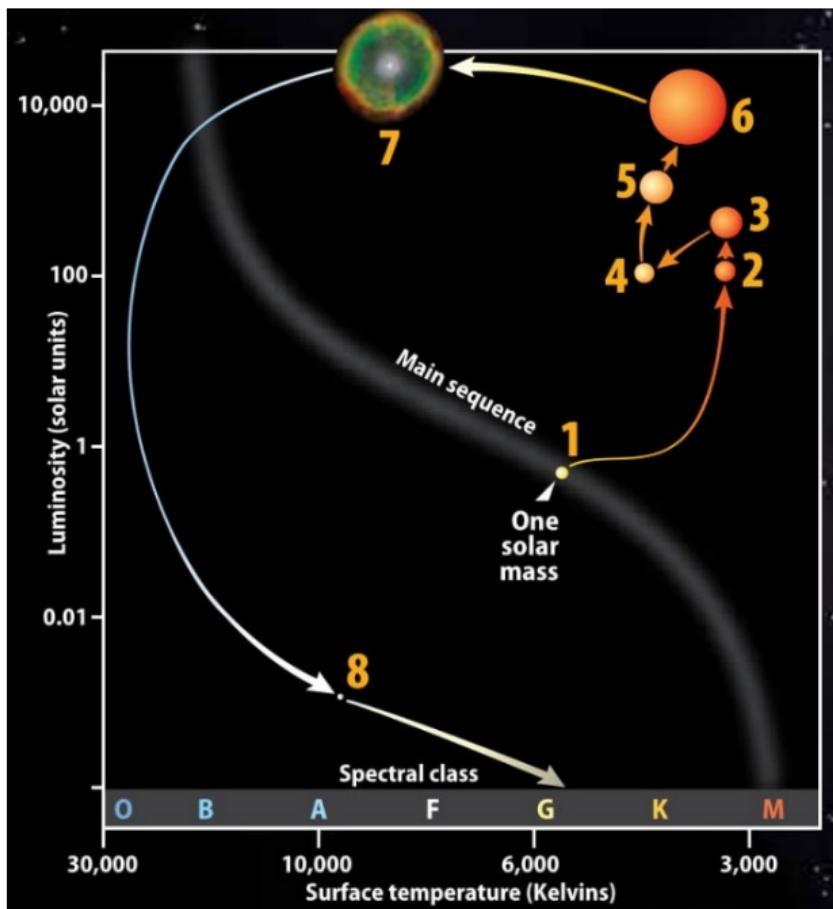
electrons run out of room
to move around nuclei;
are forced into lowest energy
quantum states

- La vida de la estrella roja termina en una enana blanca de Helio
- La masa de la enana blanca es similar a la masa inicial de la estrella pero su diámetro es similar al de la tierra
- La enana blanca está hecha de materia súper-densa!

Evolución Estelar

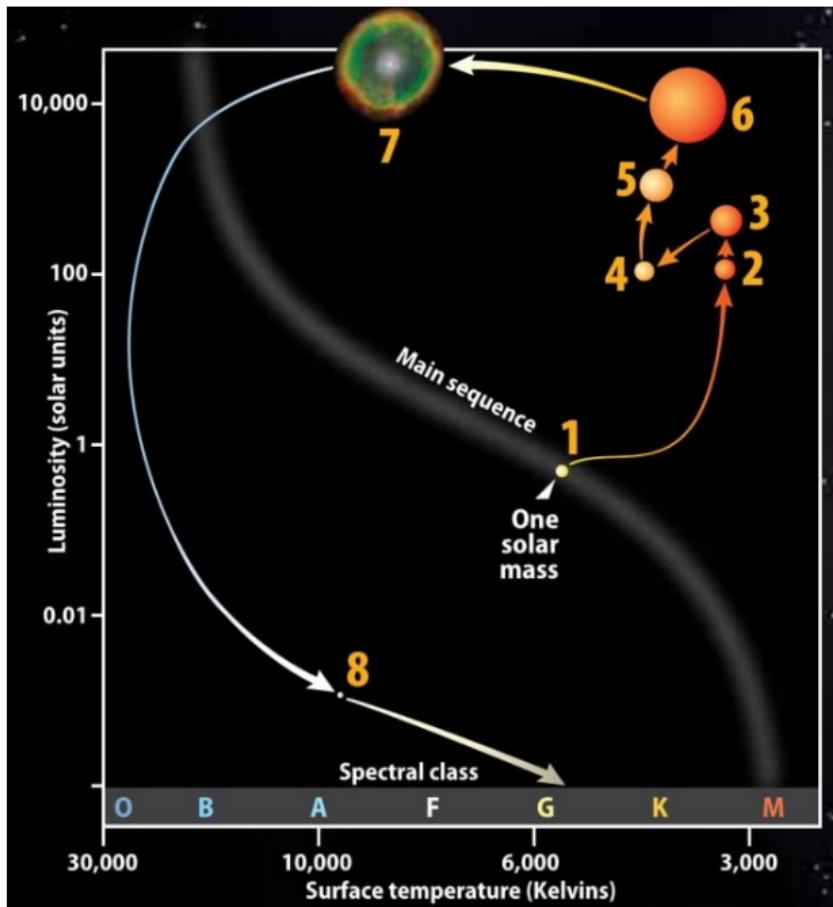
2. Estrellas Amarillas ($0.5 < \frac{M}{M_{Sol}} < 8$)

Evolución de las Estrellas Amarillas ($0.5 < M/M_{Sol} < 8$)



- Un ejemplo de estrella amarilla es el Sol
- El núcleo de la estrella puede fusionar: $H \rightarrow He$ y $He \rightarrow C$
- Nunca alcanza temperaturas suficientemente altas como para fusionar C o elementos más pesados.

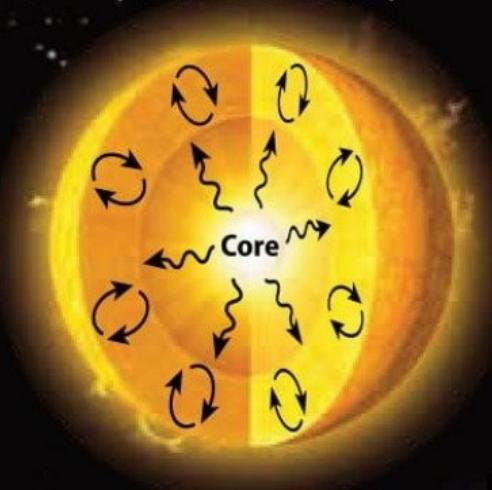
Evolución de las Estrellas Amarillas ($0.5 < M/M_{Sol} < 8$)



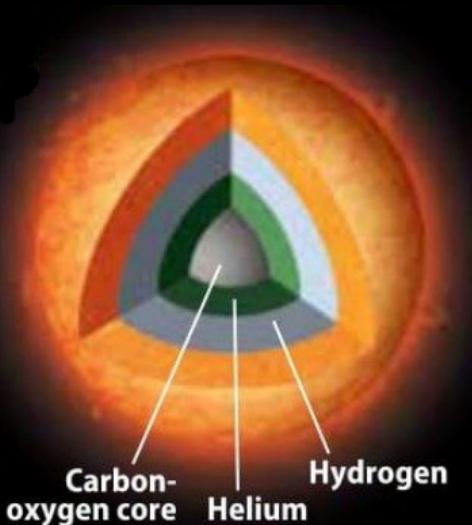
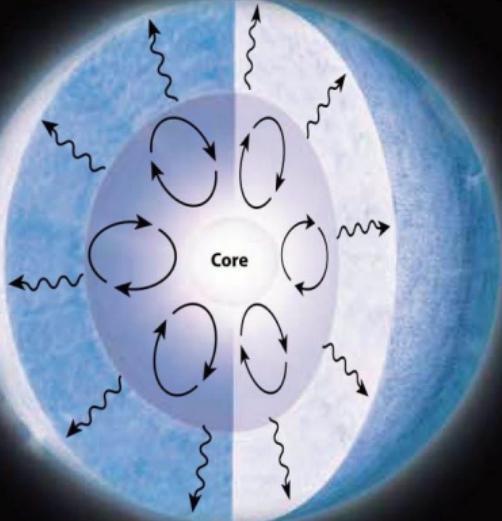
- Solo una pequeña parte del Hidrógeno disponible puede ser fusionado
- Estas estrellas pasan por dos etapas de gigante roja
- Terminan su vida expulsando parte de sus capas exteriores generando una nebulosa planetaria
- El estadio final es una enana blanca (que eventualmente se convierte en una enana negra)
- La enana blanca que se forma está compuesta de átomos degenerados de Helio y Carbono

Interior y Núcleo de una Estrella Amarilla

A Sun-like star
(0.8 to 4 solar masses)



A massive star
(more than 4 solar masses)



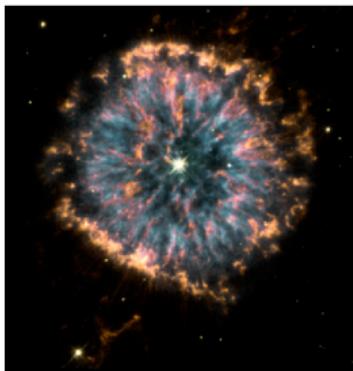
Producto Final de la Evolución: Nebulosa Planetaria



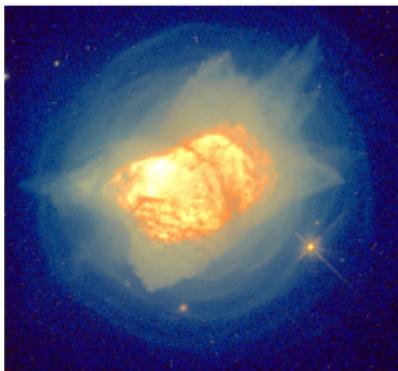
(a)



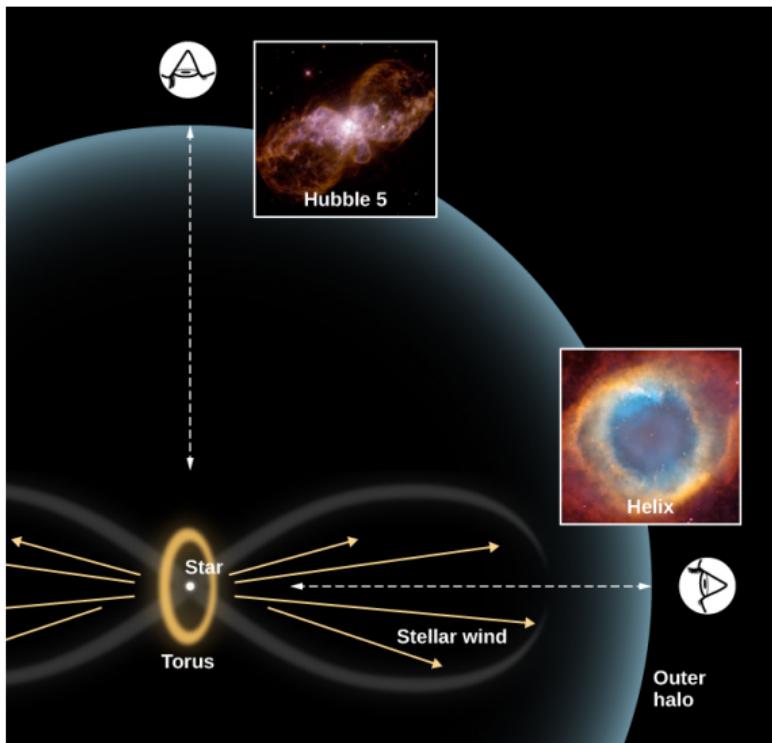
(b)



(c)



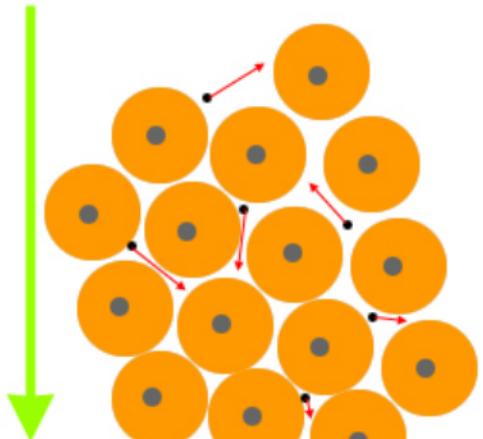
(d)



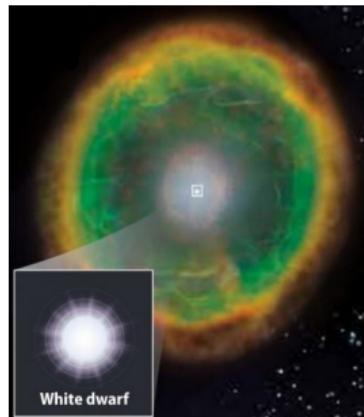
- Las nebulosas planetarias solo duran unos pocos miles de años

Producto Final de la Evolución: Enana Blanca

white dwarf



electrons run out of room
to move around nuclei;
are forced into lowest energy
quantum states

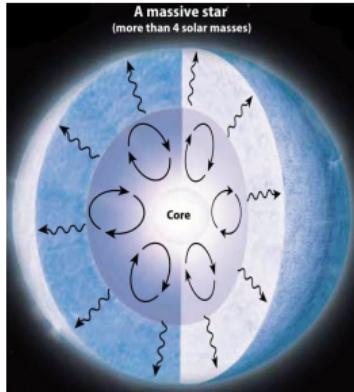
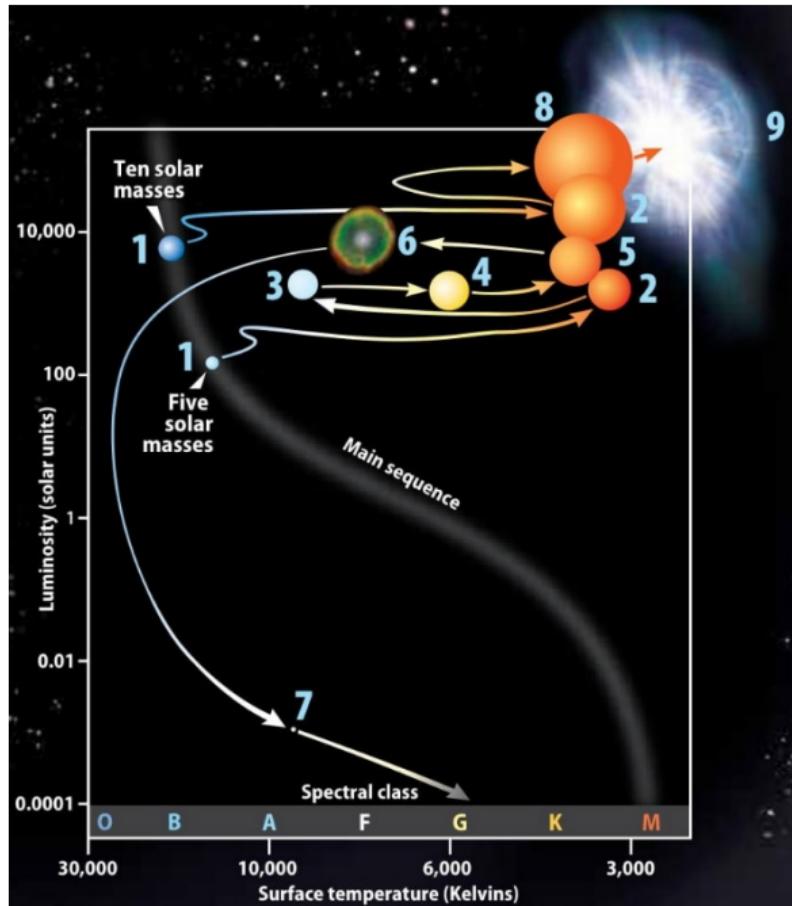


- La vida de la estrella amarilla termina en una enana blanca de Carbono
- La masa de la enana blanca es similar a la masa inicial de la estrella pero su diámetro es similar al de la tierra
- La enana blanca esta hecha de materia súper-densa!
- La masa máxima que puede tener una enana blanca es de $1,4M_{Sol}$ (límite de Chandrasekhar)

Evolución Estelar

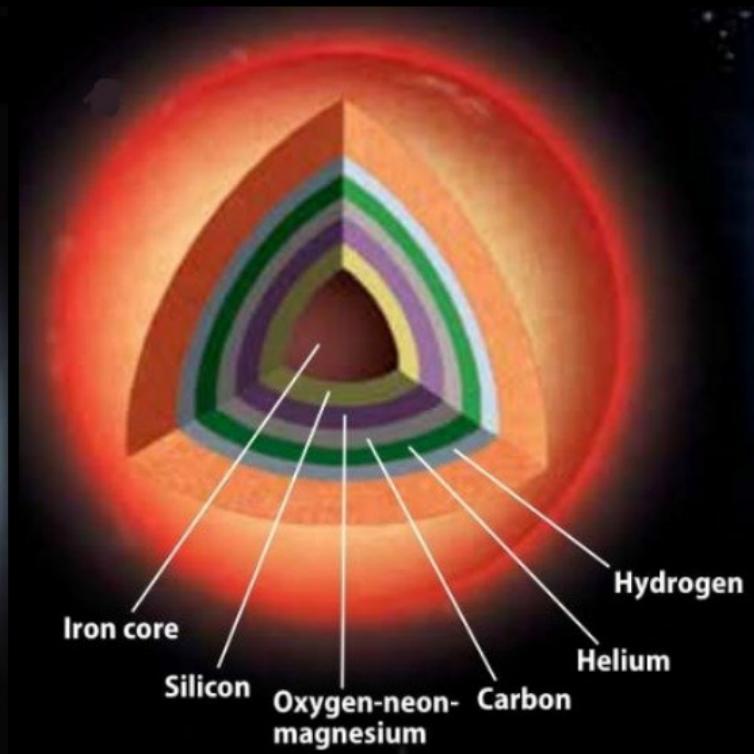
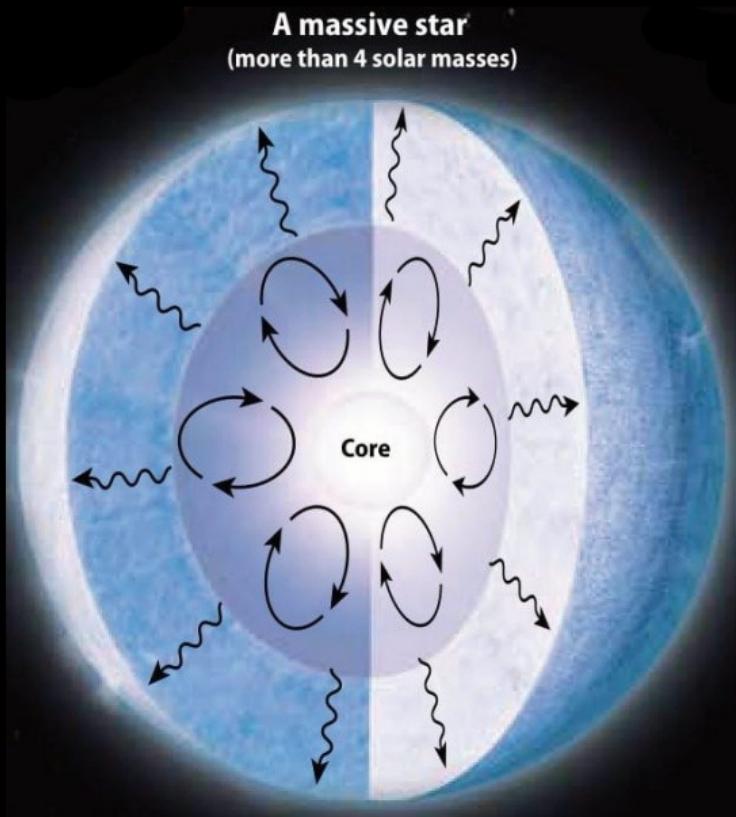
3. Estrellas Blancas ($8 < \frac{M}{M_{Sol}} < 20$)

Evolución de las Estrellas Blancas ($8 < M/M_{\text{Sol}} < 20$)



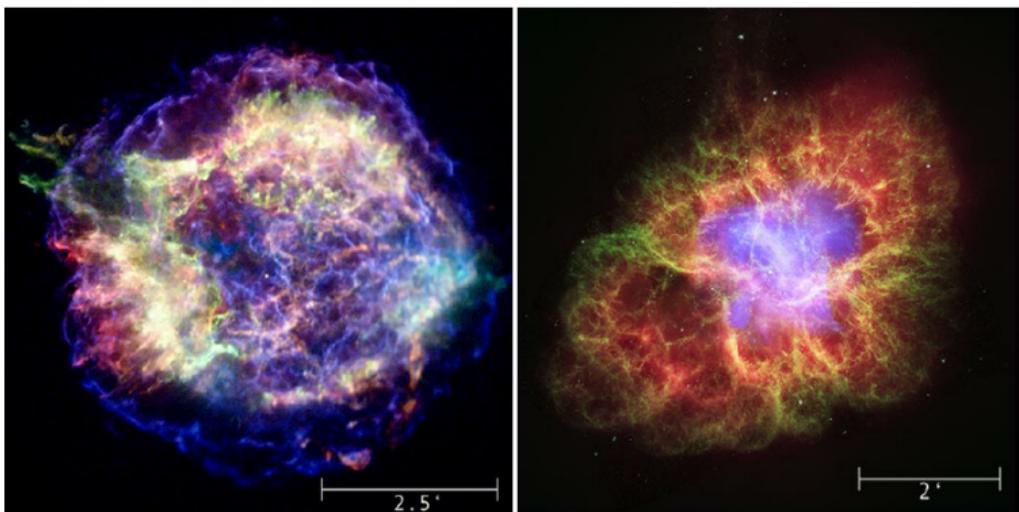
- El núcleo de la estrella puede fusionar: $H \rightarrow He$, $He \rightarrow C$, ... hasta generar Fe
- La vida de la estrella termina abruptamente en una explosión de **supernova**
- El estadio final es una **estrella de neutrones**

Interior y Núcleo de una estrella masiva ($M > 8M_{sun}$)



Producto Final de la Evolución: Supernova de Colapso de Núcleo

- La estrella fusiona primero *H*, luego *He*, para pasar al *C*, y así hasta producir *Fe*
- Sin embargo, en el caso del *Fe*, la reacción de fusión consume energía en vez de producirla, esto hace que las capas exteriores colapsen hacia el centro de la estrella en una fracción de segundo, detonando en una explosión de supernova.
- Esta producción de energía es transitoria y la estrella puede llegar a brillar con tanta luminosidad como la que produce una galaxia entera!
- Como resultado se produce una **remanente de supernova** que con el tiempo se termina dispersando



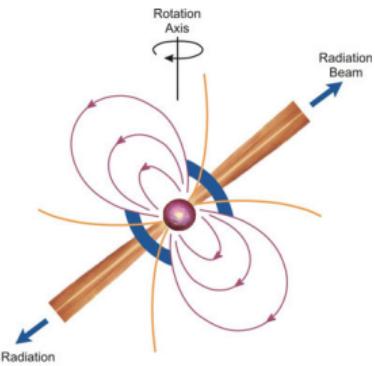
Producto Final de la Evolución: Estrella de Neutrones

neutron star



protons are forced to absorb electrons to make neutrons;
neutrons squeezed together

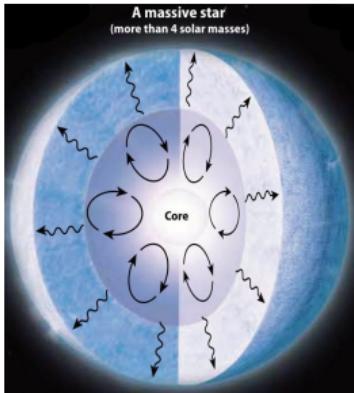
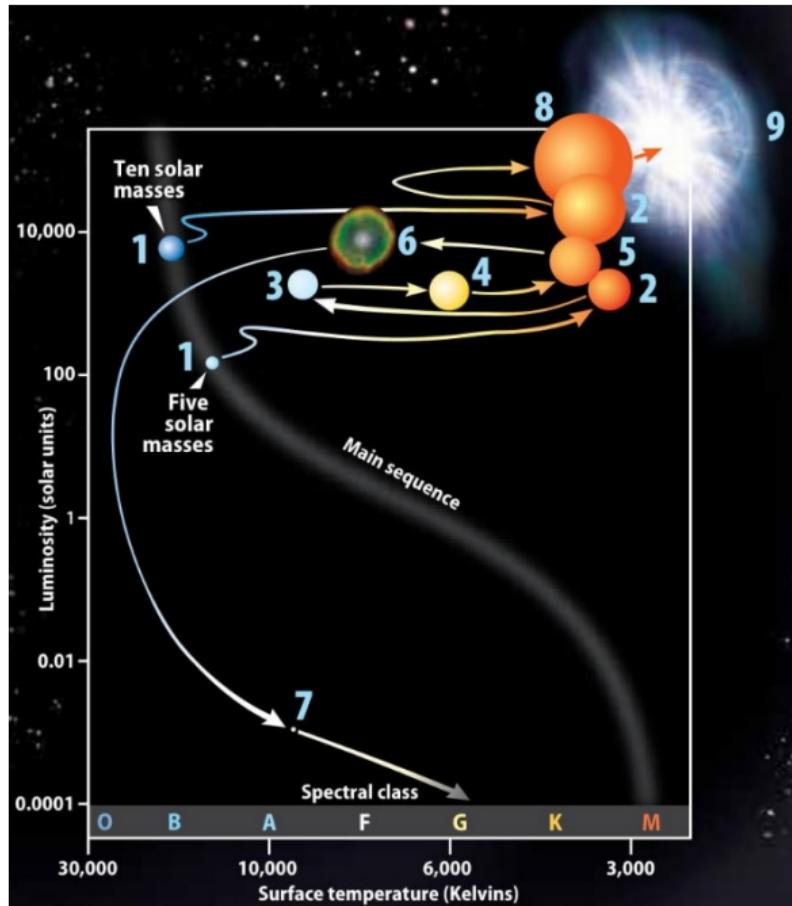
- La vida de la estrella blanca termina en una estrella de neutrones de altísima densidad y solo unos 20km de diámetro
- Los protones y electrones del núcleo se fusionan para dar lugar a neutrones
- La fuerza que repele a los neutrones es la capaz de mantener la estrella de neutrones sin colapsar (siempre que tenga una masas menor que $2,8M_{Sol}$)
- Una estrella de neutrones que rota rápidamente puede dar lugar a un pulsar o a un magnetar:



Evolución Estelar

4. Estrellas Azules ($20 < \frac{M}{M_{Sol}} < \sim 100$)

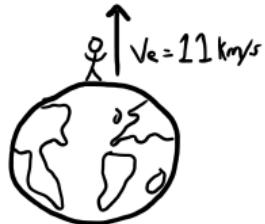
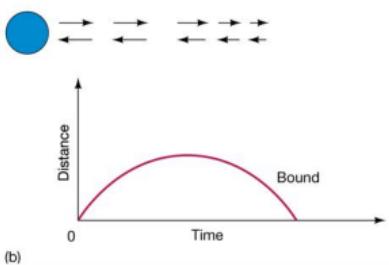
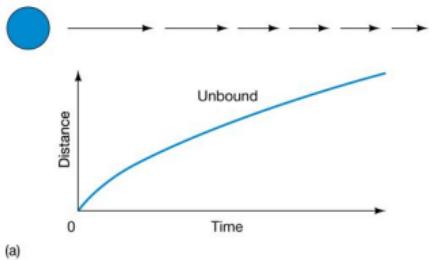
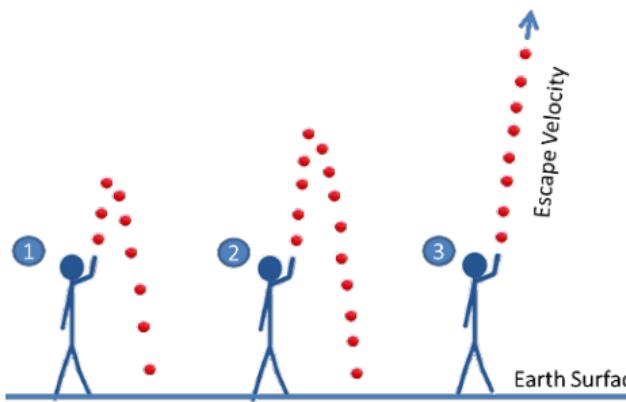
Evolución de las Estrellas Azules ($20 < M/M_{\text{Sol}} < 100$)



- El núcleo de la estrella puede fusionar: $H \rightarrow He$, $He \rightarrow C$, ... hasta generar Fe
- La vida de la estrella termina abruptamente en una explosión de **supernova**
- El estadio final es un **agujero negro!**

Producto Final de la Evolución: Agujero Negro

- Analogía de la velocidad de escape de un cuerpo masivo (eg. la tierra)



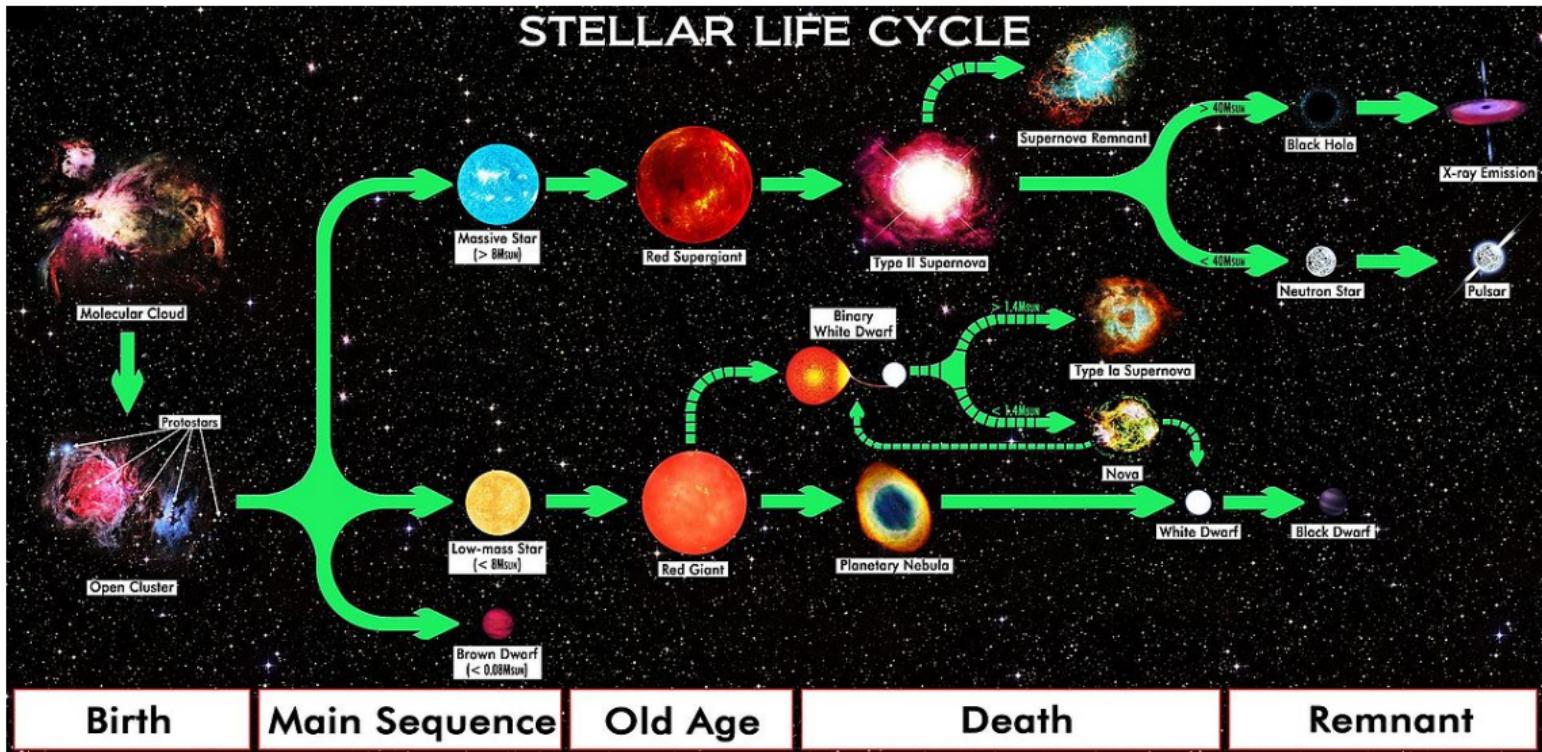
Velocidades de escape:

- Tierra: 11 km/s
- Sol: 600 km/s
- Estrella de neutrones: 150.000 km/s ($1/2$ la velocidad de la luz!)
- Agujero Negro: = vel. de la luz en su "frontera" (el horizonte de sucesos)

Evolución Estelar

5. Síntesis

Ciclo de vida de las Estrellas



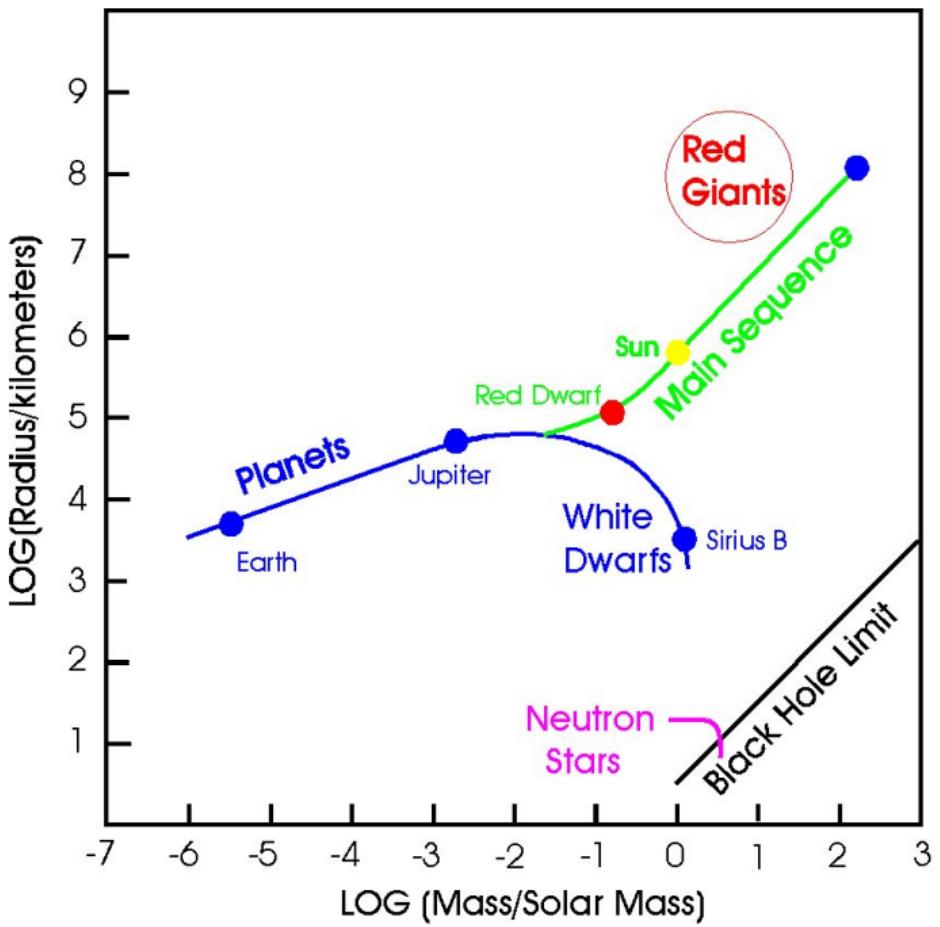
Clasificación de Estrellas en la Secuencia Principal

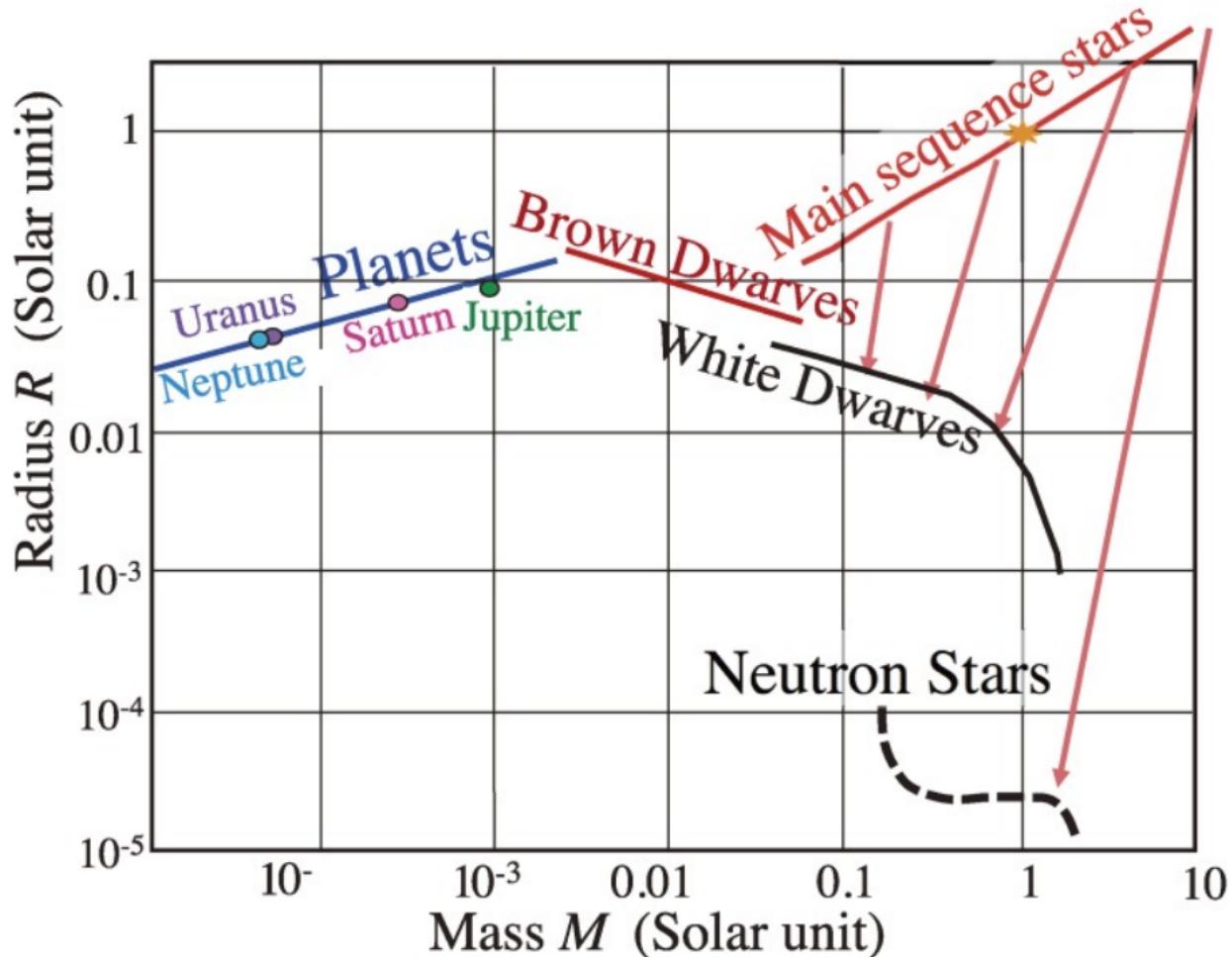
Tipo de Estrella	Masa	Fusión H	Fusión He	Fusión C-Fe	Punto Final
Rojas	$0.1 < \frac{M}{M_{Sol}} < 0.5$	si	no	no	Enana Blanca
Amarillas	$0.5 < \frac{M}{M_{Sol}} < 8$	si	si	no	Nebulosa Planetaria + Enana Blanca
Blancas	$8 < \frac{M}{M_{Sol}} < 20$	si	si	si	Supernova + Remanente de Supernova + Estrella de Neutrones
Azules	$20 < \frac{M}{M_{Sol}} < \sim 100$	si	si	si	Supernova + Remanente de Supernova + Agujero Negro

Material Extra

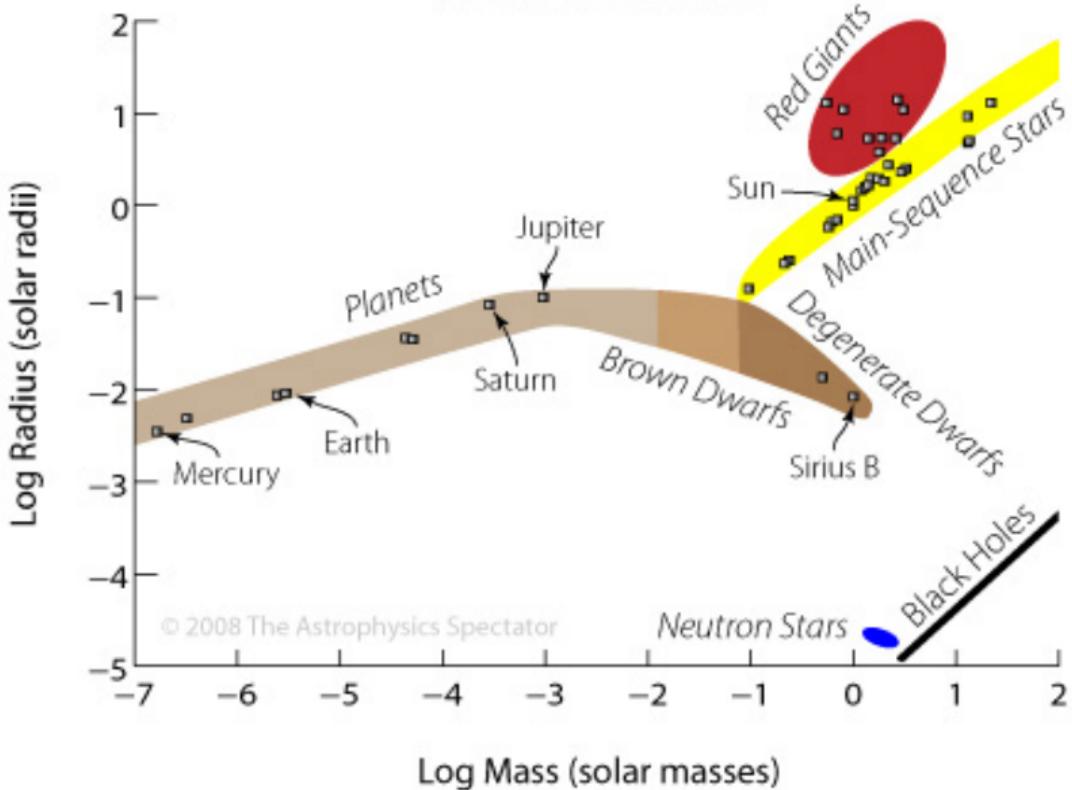
Objetos Subestelares: Enanas Marrones (no son Estrellas!)

- Las enanas marrones son objetos con tamaños intermedios entre las estrellas más pequeñas y los planetas gaseoso gigantes
- El tamaño mínimo para que una estrella fuse Hidrógeno en Helio es de $\sim 0.075M_{Sol}$ ($\sim 75M_{Jup.}$).
- El Litio puede ser fusionado a temperaturas menores que el Hidrógeno
- Objetos con masas $0.075 > M/M_{Sol} > 0.05$
- Objetos de tamaños menores pueden fusionar Deuterio (un isótopo estable del Hidrógeno)
- Las enanas marones se clasifican con las letras M, T y Y
- Se han encontrado alrededor de 2000 enanas marrones
- La mayor parte de la emisión de las enanas marrones es en el infrarrojo
- Las enanas marrones tienen la particularidad que a más masa no tienen más diámetro



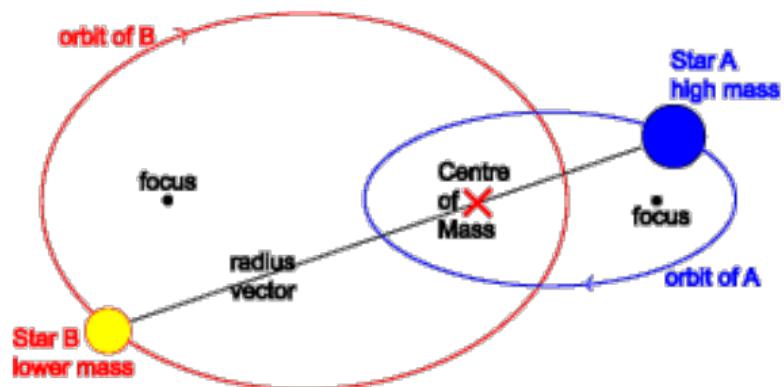


Radius vs. Mass



Sistemas Esteriales: Binarios o Múltiples

- Un sistema estelar (binario o múltiple) es la agrupación de dos o más estrellas que orbitan en torno a un centro de gravedad común, ligadas por la fuerza de gravedad.
- Los sistemas de estrellas binarios y múltiples son comunes en el Universo.
- El mecanismo de formación estelar resulta en sistemas de más de una estrella tan a menudo o más que generando estrellas solitarias (como el Sol).
- Entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{2}$ de las estrellas en el firmamento son sistemas binarios.



Orbits of Stars in a Binary System

¿Cómo es la vida de las estrellas?

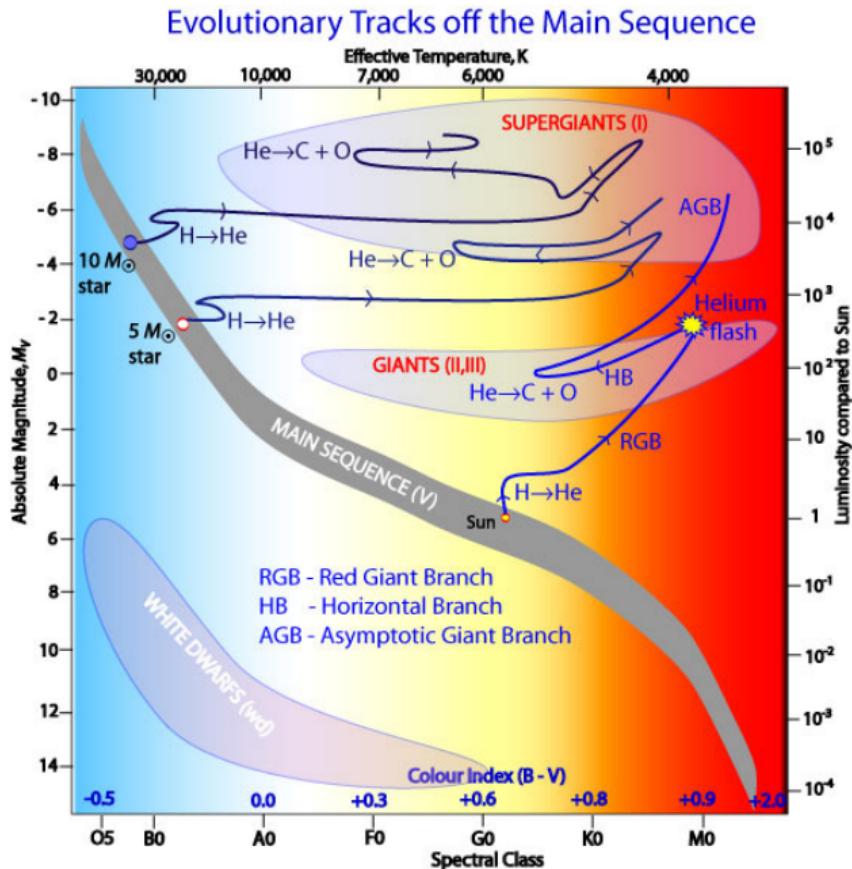


Diagrama Hertzsprung-Russell Expandido (por XKCD)

