

# Estrellas

Ernesto Nicola

*Curso de Iniciación a la Astronomía 2022, 1er trimestre*  
Palma de Mallorca, 2022-03-10



# Contenido de la charla

## 1 Mecanismos Estelares

- Generación de Energía
- Balance Energético
- Composición de una Estrella

## 2 Caracterización de las Estrellas

- Parámetros Principales
- Diagrama de Hertzsprung-Russell
- Clasificación Moderna de las Estrellas

## 3 Evolución Estelar

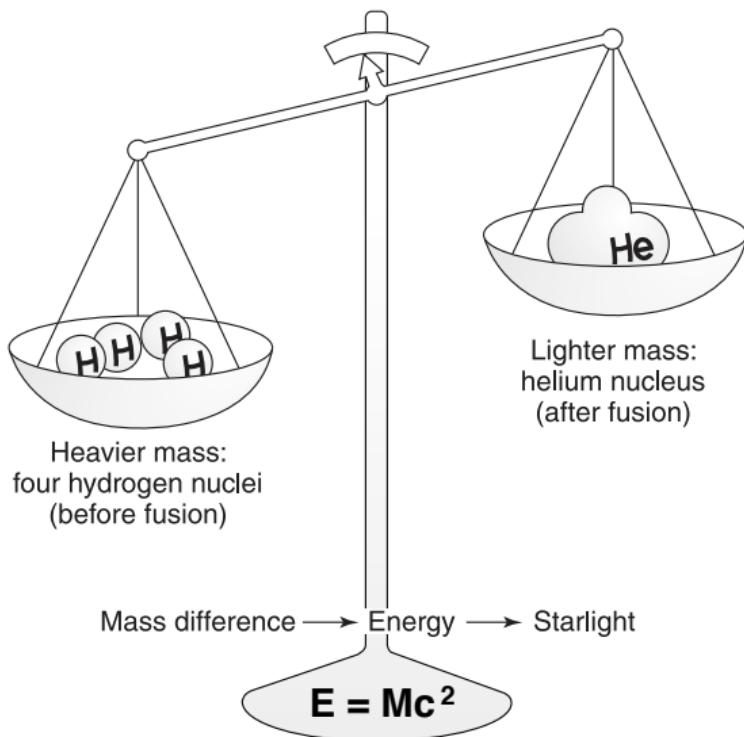
- Clasificación Simplificada de las Estrellas
- Estrellas Rojas:  $0.1M_{\odot} < M < 0.5M_{\odot}$
- Estrellas Amarillas:  $0.5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$
- Estrellas Blancas:  $8M_{\odot} < M < 20M_{\odot}$
- Estrellas Azules:  $20M_{\odot} < M < 100M_{\odot}$
- Síntesis

# 1. Mecanismos Estelares

# 1. Mecanismos Estelares

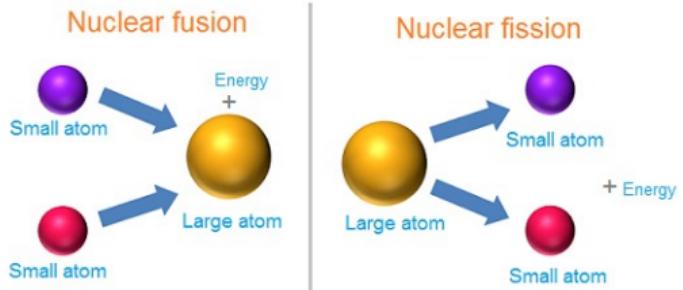
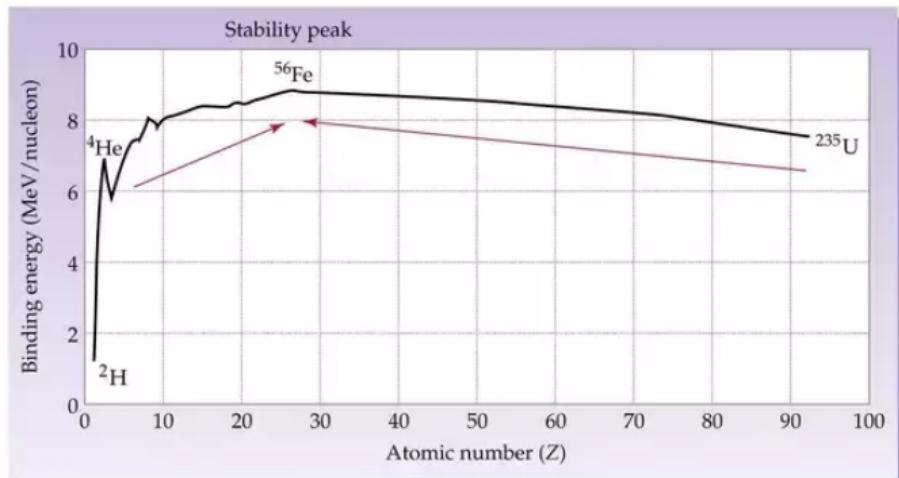
Generación de Energía

# Fusión Nuclear en el Interior de una Estrella



- La fuente principal de energía de una estrella es la fusión del Hidrógeno en Helio. En esta reacción se convierten 4 núcleos de Hidrógeno en uno de Helio, liberando energía.
- En estrellas más masivas, hacia el final de sus vidas, también puede fusionar generando energía otros elementos como: Helio, Carbono, etc.
- Clave:  $E = mc^2$ ; al ser la velocidad de la luz  $c$  muy grande, un pequeñísimo cambio en la masa genera una gran cantidad de energía.

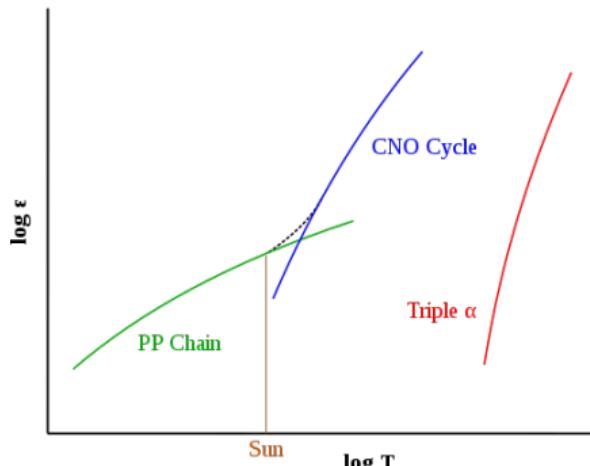
# Energía producida al unir o partir un átomo



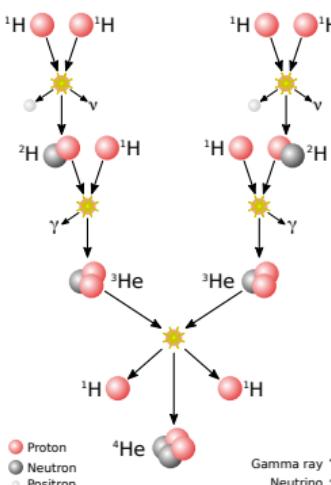
- ① La fusión de átomos pequeños (entre  $H$  y  $Fe$ ) produce energía:  
núcleo liviano + núcleo liviano = núcleo más pesado + energía
- ② La fisión de átomos grandes (entre  $Fe$  y  $U$ ) produce energía:  
núcleo pesado = núcleo más liviano + núcleo más liviano + energía

# Fusión Nuclear en el Interior de una Estrella

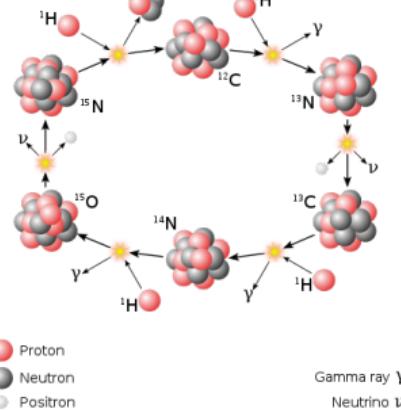
Energía liberada vs. Temperatura:



$H \rightarrow He$   
Cadena Protón-Protón



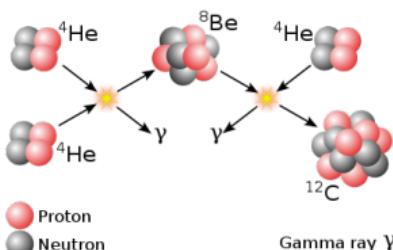
$H \rightarrow He$   
Ciclo CNO



Fuentes de Energía de una Estrella:

- ①  $H \rightarrow He$ : fuente primordial
- ②  $He \rightarrow C$ : fuente secundaria para estrellas más masivas
- ③ Fusión del  $C$  y otros elementos livianos: en las estrellas más grandes

$He \rightarrow C$  (y algo de  $O$  y  $Ne$ ): Proceso Triple-Alfa

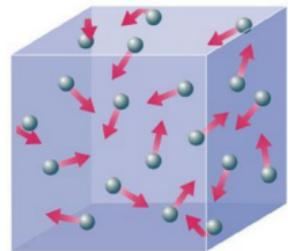


# 1. Mecanismos Estelares

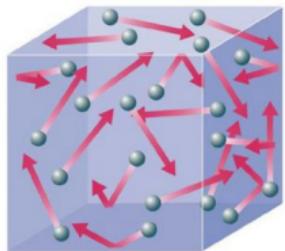
Balance Energético

# El Tamaño de la Estrella y el Equilibrio Hidrostático

temperatura baja



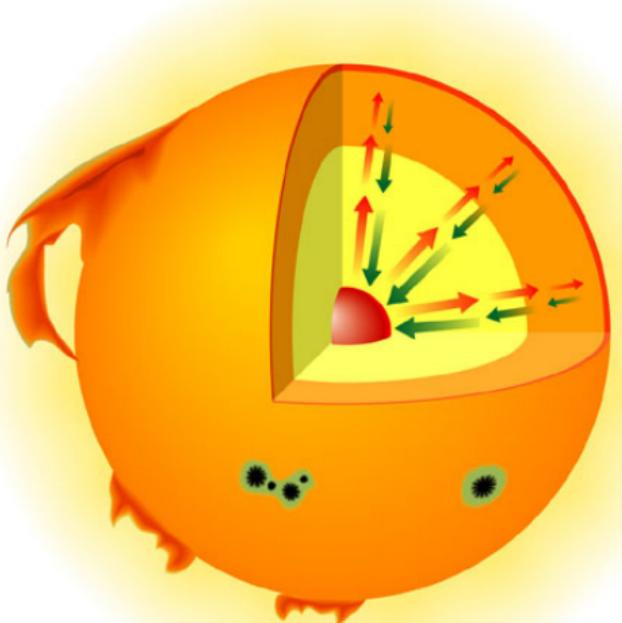
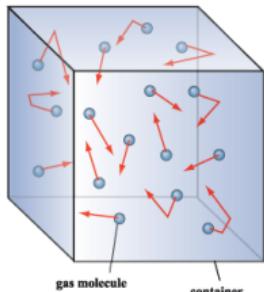
temperatura alta



pressure →  
gravity ←

- El tamaño de la estrella está determinado por el **equilibrio hidrostático** entre

- ① la presión debida a la alta temperatura en el interior y
- ② la fuerza de la gravedad.

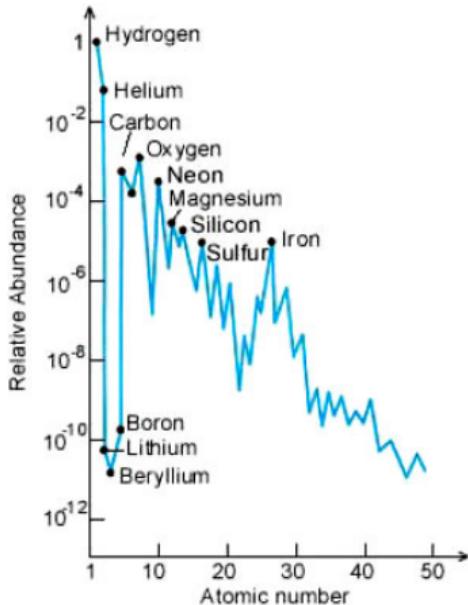
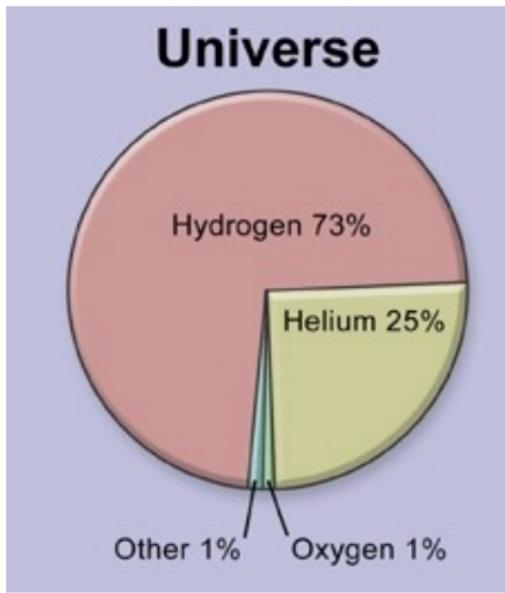


# 1. Mecanismos Estelares

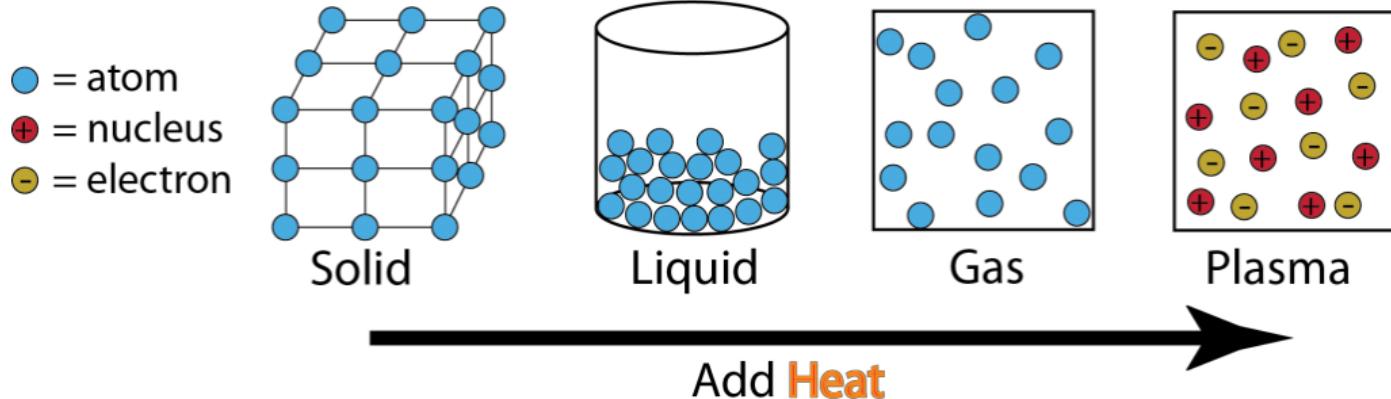
Composición de una Estrella

# Composición de la masa actual de la materia del universo

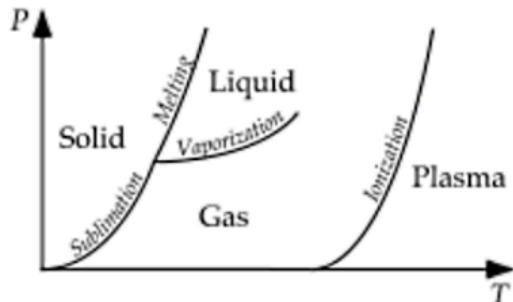
- La masa actual de la materia del universo está compuesta de:
  - 73% de Hidrógeno
  - 24% de Helio
  - 1% de Oxígeno
  - El resto de los elementos de la tabla periódica suman solo el 1%
- La composición típica de las estrellas es prácticamente la misma que la del Universo



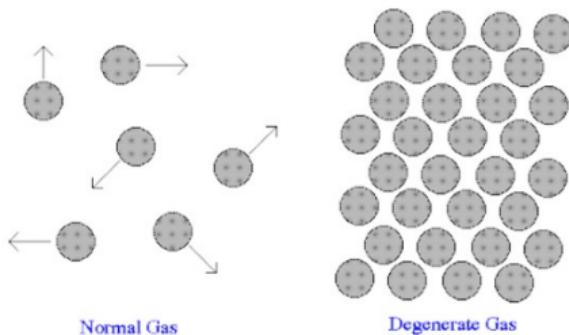
# Estado de la Materia dentro de una Estrella: Plasma



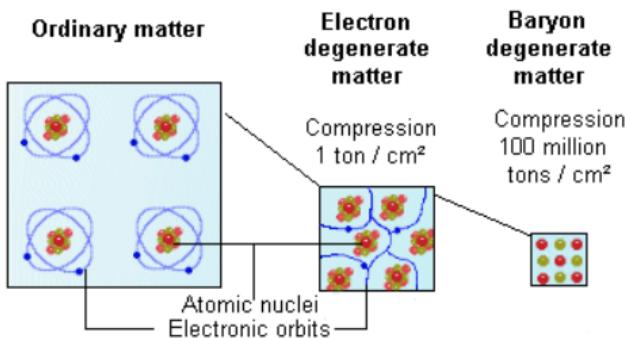
- El plasma se puede caracterizar como un gas ionizado
- El plasma es un estado de la materia similar al estado gaseoso pero en el que determinada proporción de sus partículas (átomos o moléculas) están cargadas eléctricamente (ionizadas) y no poseen equilibrio electromagnético.
- Los plasmas son buenos 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 es sometido a altísimas presiones, sus átomos (o núcleos) no pueden moverse libremente, convirtiéndose en materia degenerada



Tipos de materia degenerada:

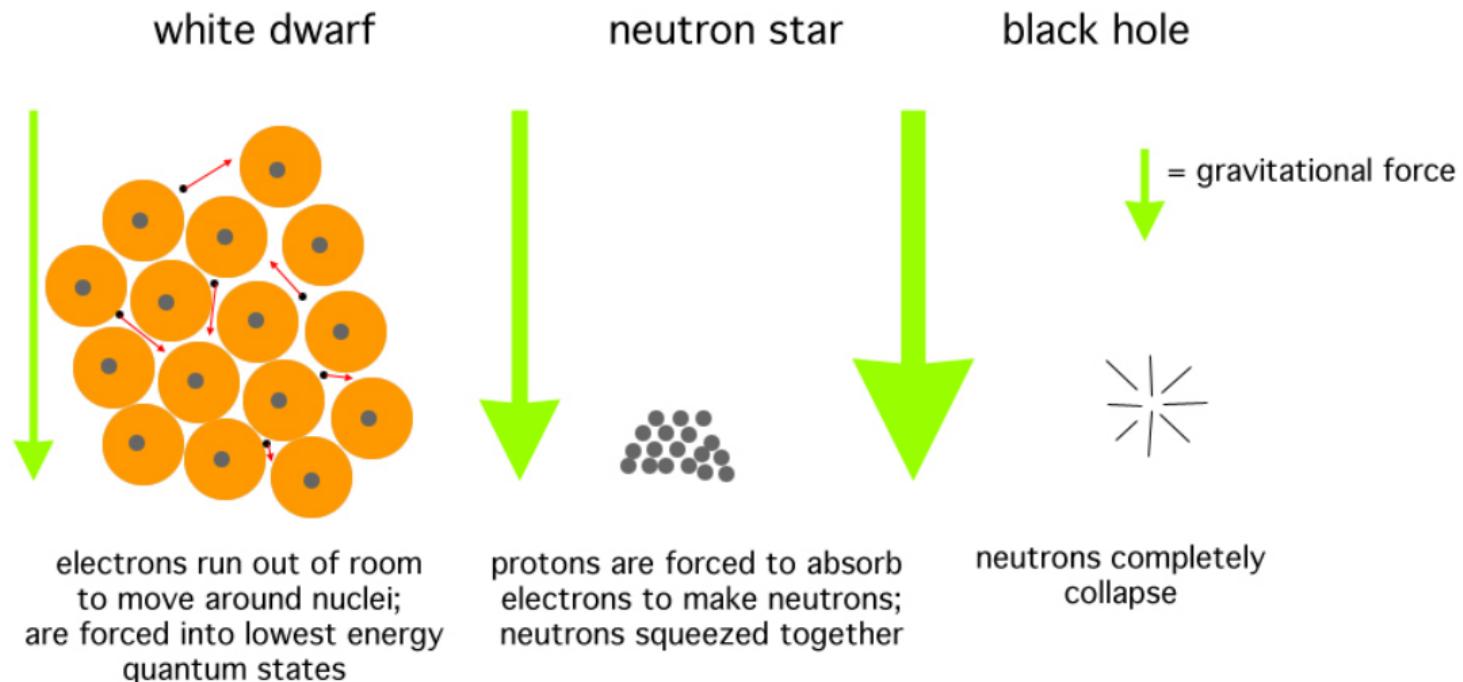
## 1 Degeneración de electrones:

- Los átomos están completamente compactados
- Este mecanismo se observa en **enanas blancas**
- Densidad típica:  $\propto 1t/cm^2$

## 2 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**
- Densidad típica:  
 $\propto 100.000.000t/cm^2$

# Gases a Altísimas Presiones: Materia Degenerada



- Normalmente la toda materia de una estrella se encuentra en estado de **plasma**
- Sin embargo, al final de su vida, parte de la materia de una la estrella puede convertirse en **materia degenerada**

## 2. Caracterización de las Estrellas

## 2. Caracterización de las Estrellas

Parámetros Principales

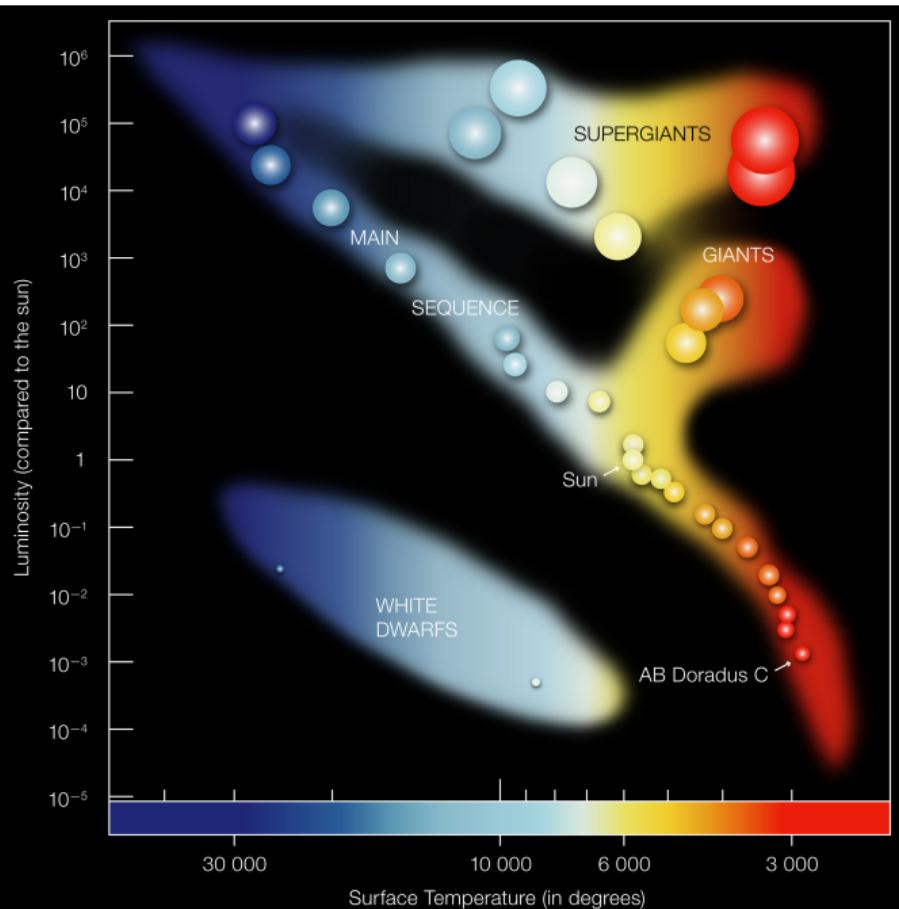
# Parámetros Principales de las Estrellas

- Hay cuatro magnitudes relevantes para toda estrella
  - 1 Luminosidad ( $\propto$  Magnitud Absoluta)
  - 2 Diámetro
  - 3 Temperatura Superficial
  - 4 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

## 2. Caracterización de las Estrellas

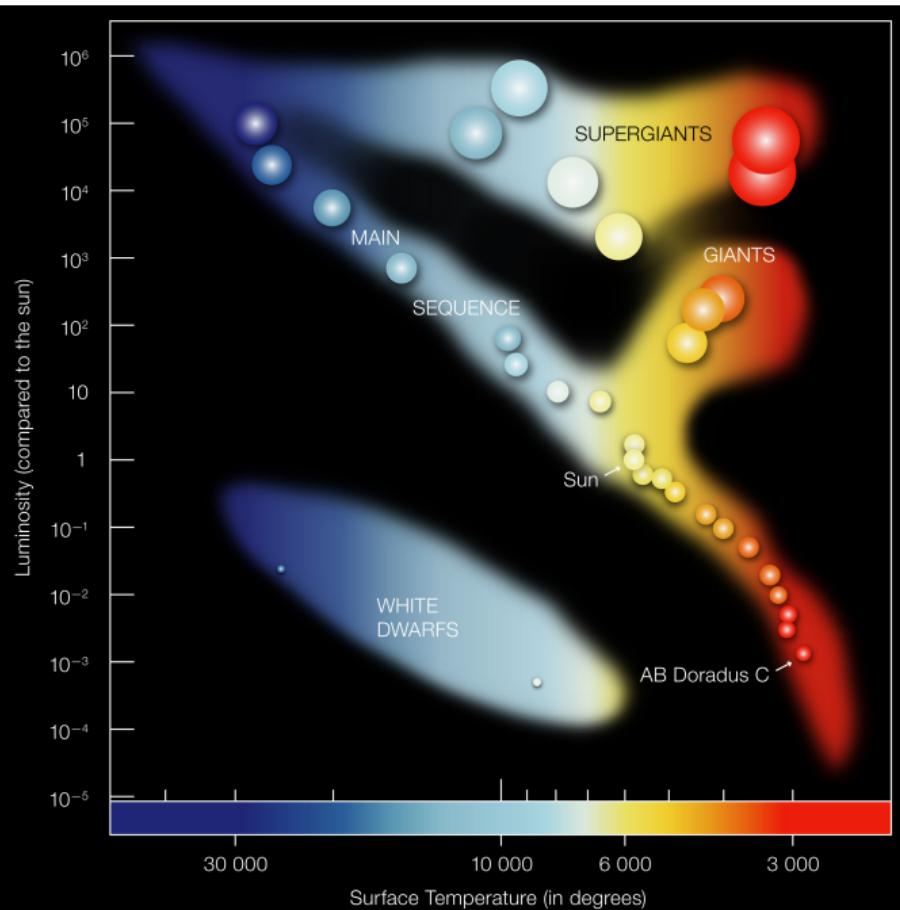
Diagrama de Hertzsprung-Russell

# 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: Diámetro, Masa, Temperatura en el núcleo.

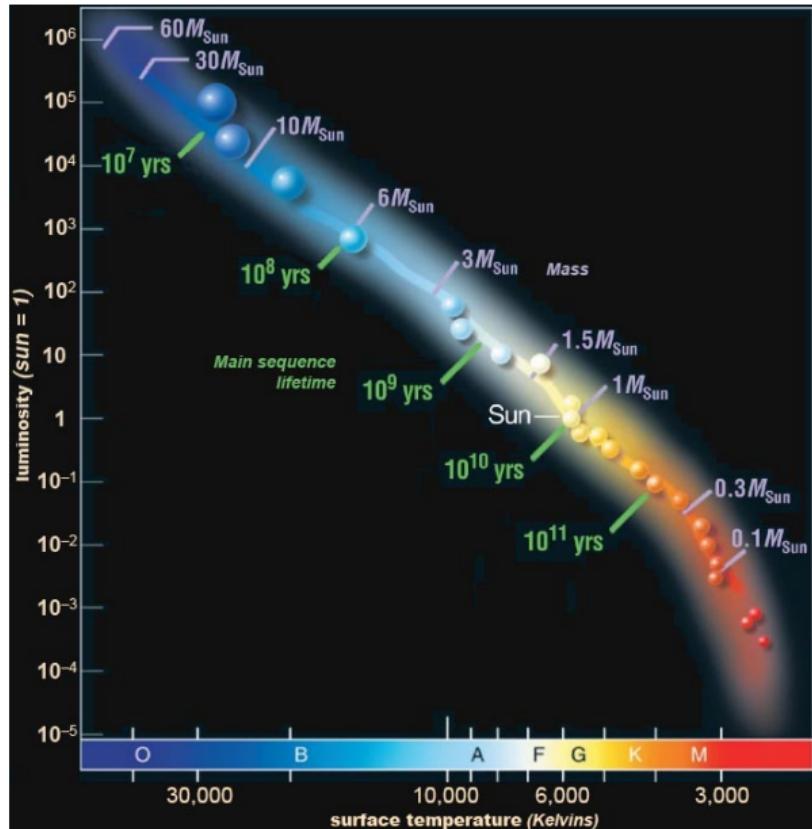
# Diagrama de Hertzsprung-Russell ("Diagrama H-R")



- Zonas del diagrama H-R:

- 1 Secuencia Principal
- 2 Gigantes Rojas
- 3 Súper-gigantes
- 4 Enanas Blancas

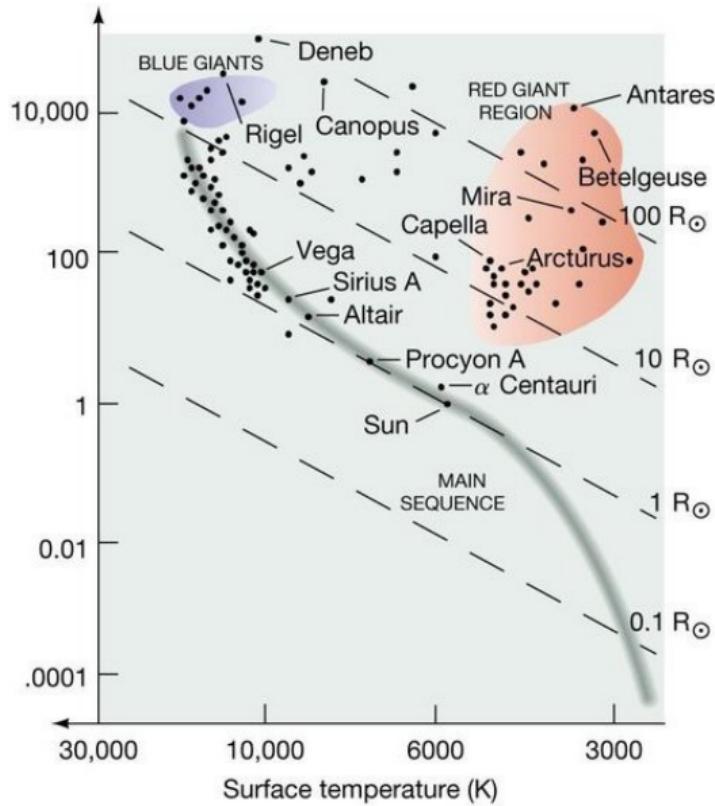
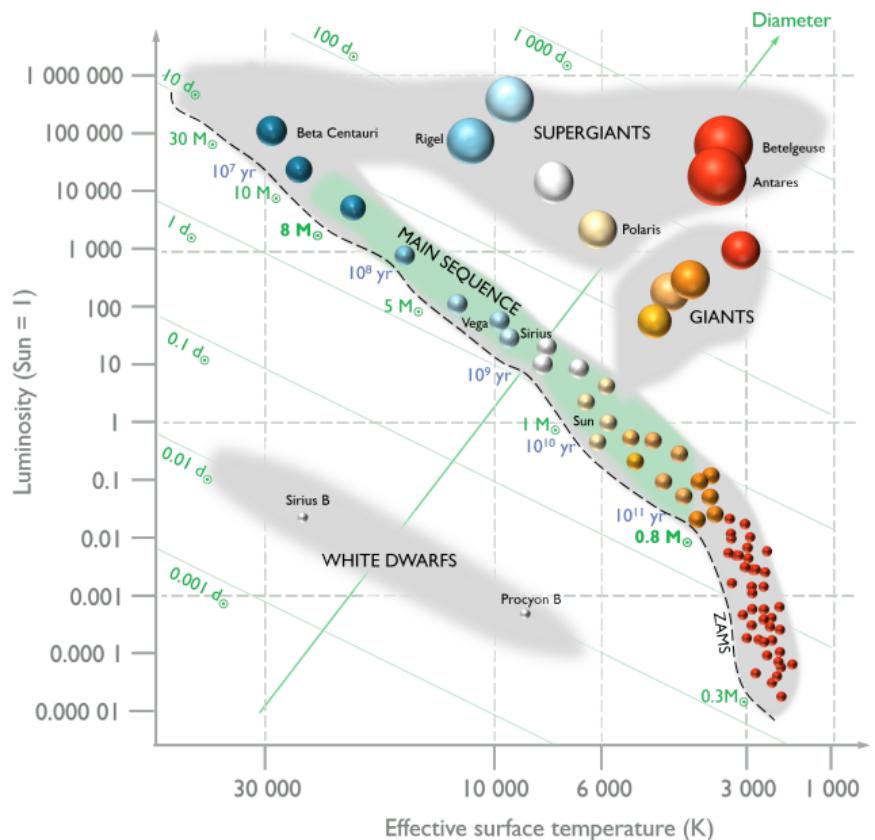
# Estrellas en la Secuencia Principal



La mayoría de las estrellas están en (o cerca de) "línea" en el diagrama H-R. Esta zona es llamada la **secuencia principal**:

- En la secuencia principal las estrellas producen energía fusionando  $H$  en  $He$  en su núcleo
- La velocidad de fusión de  $H$  depende de la presión en el núcleo de la estrella: la reacción es más rápida si la presión es mayor
- 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.
- Las estrellas con menos masa tienen  $\propto 0,1 M_\odot$  y las más masivas llegan a  $\propto 100 M_\odot$

# Diagrama H-R para algunas estrellas conocidas

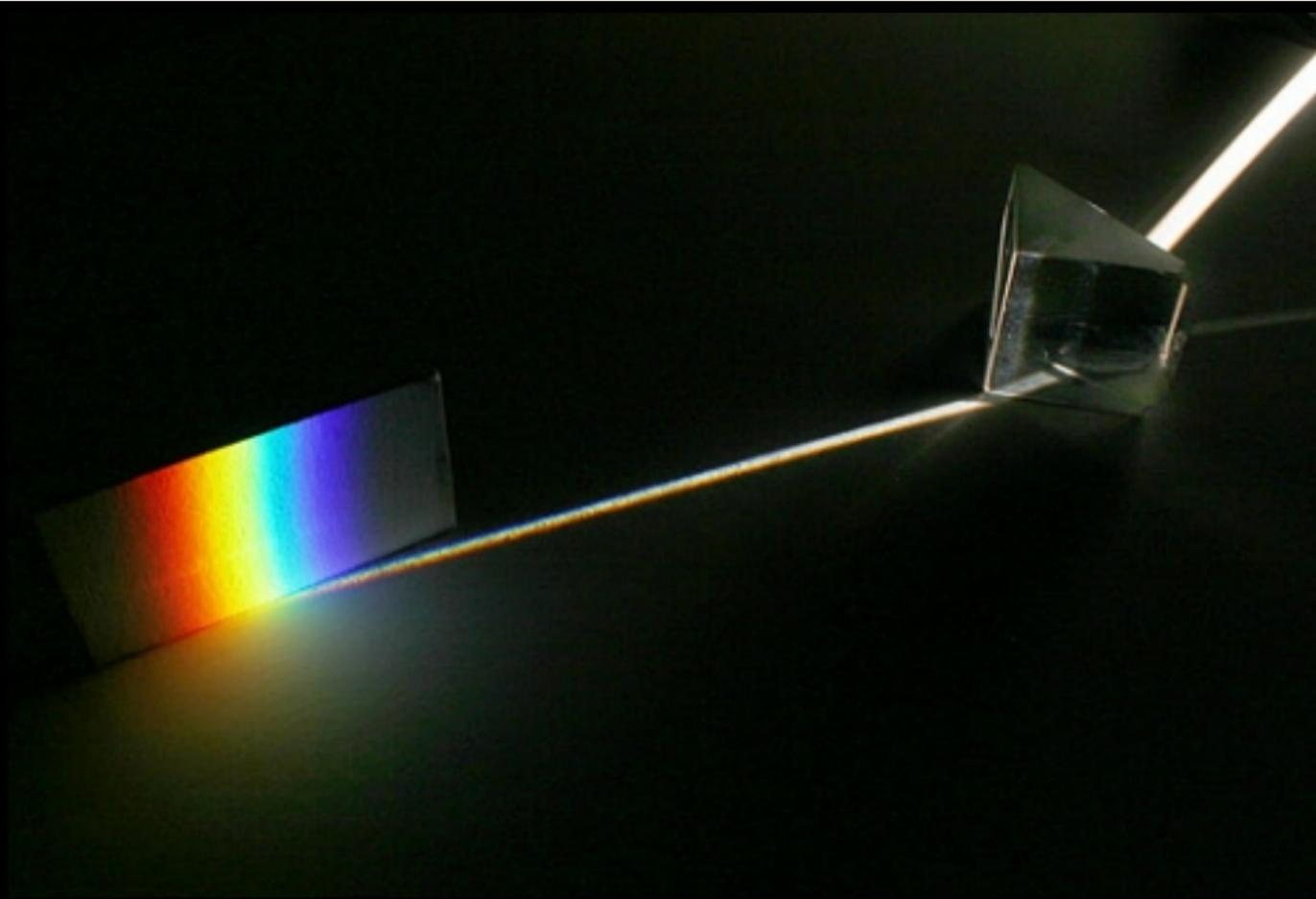


Spectral classification

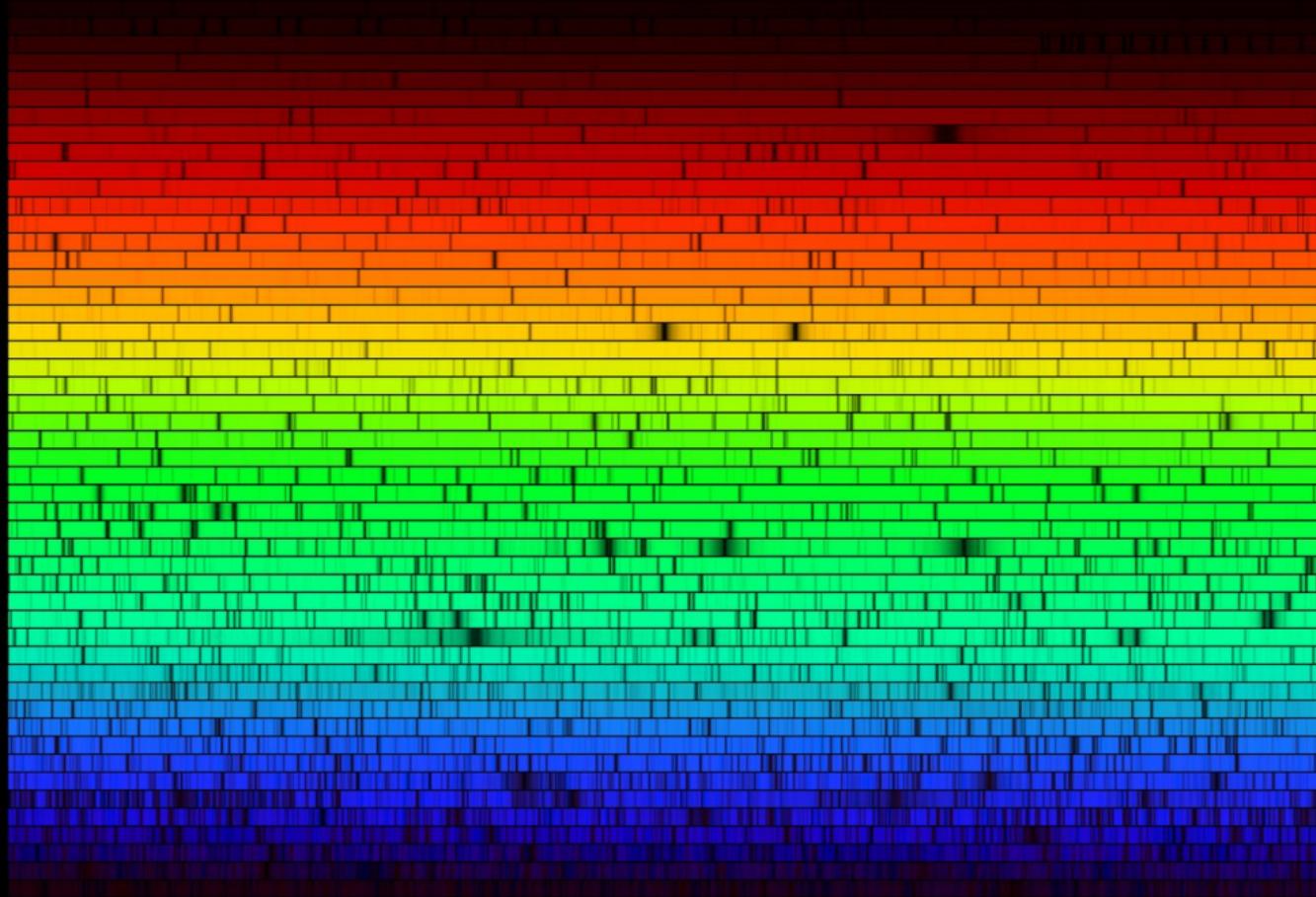
## 2. Caracterización de las Estrellas

Clasificación Moderna de las Estrellas

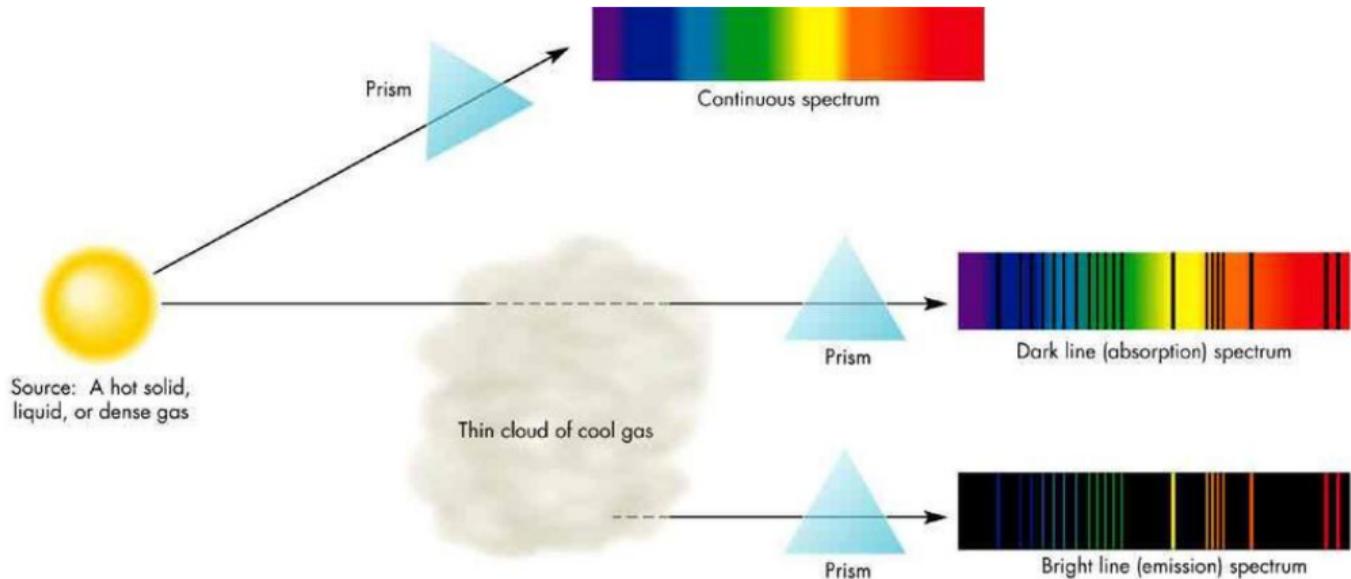
# Espectro de la Luz Visible



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

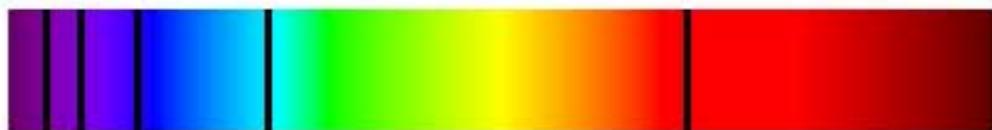


# Efecto de una Atmósfera en el Espectro de la Luz Visible



# Efecto del Hidrógeno en el Espectro de la Luz Visible

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum

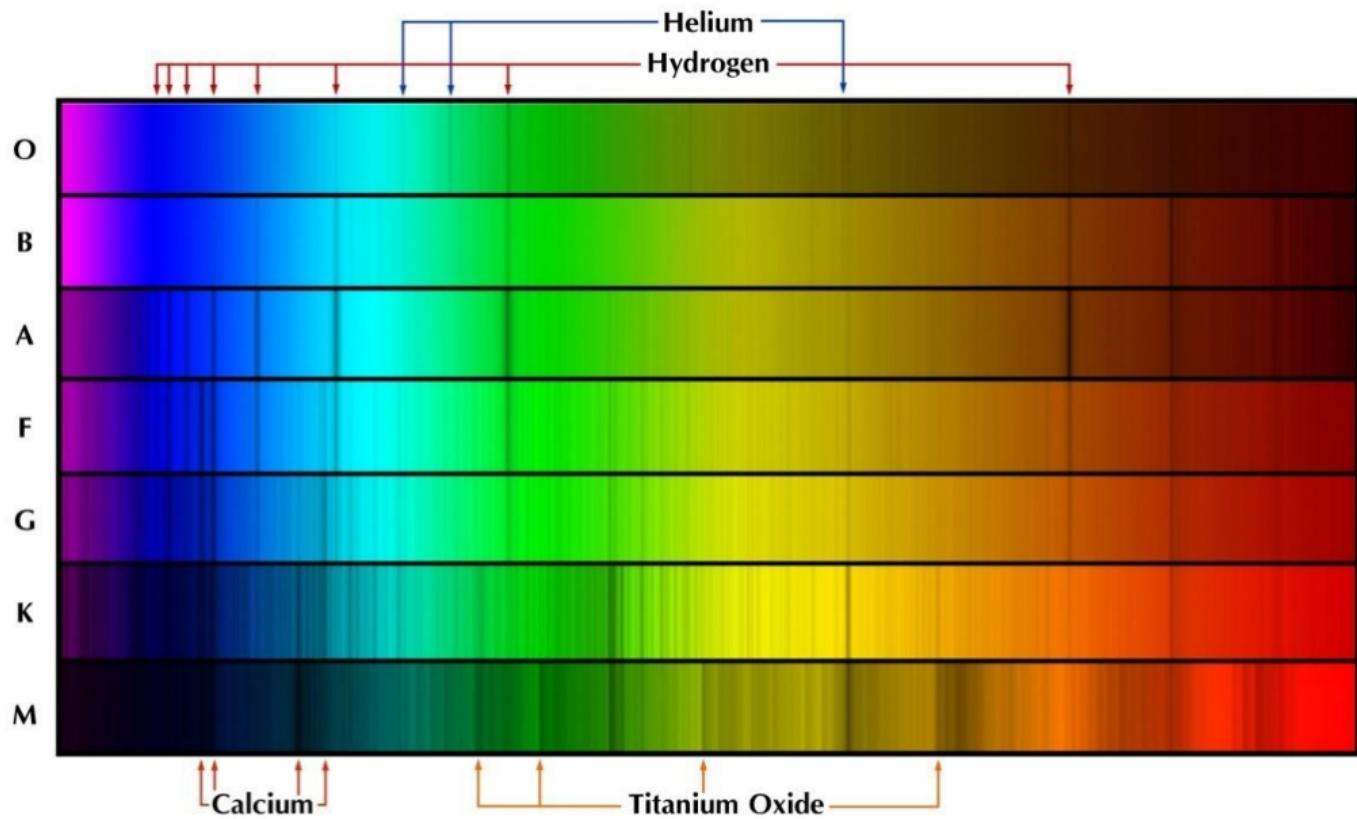


400nm

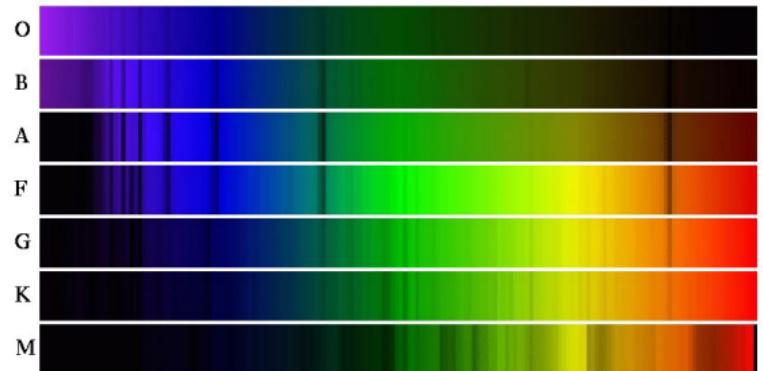
700nm

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

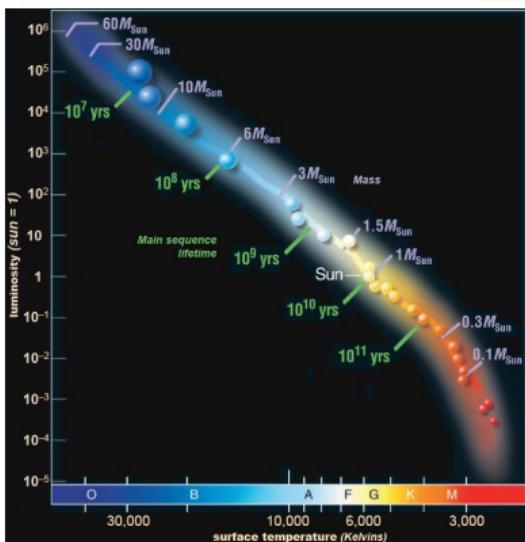
# Clasificación Moderna de las Estrellas según su Espectro



# Clasificación Moderna de las Estrellas según su Espectro

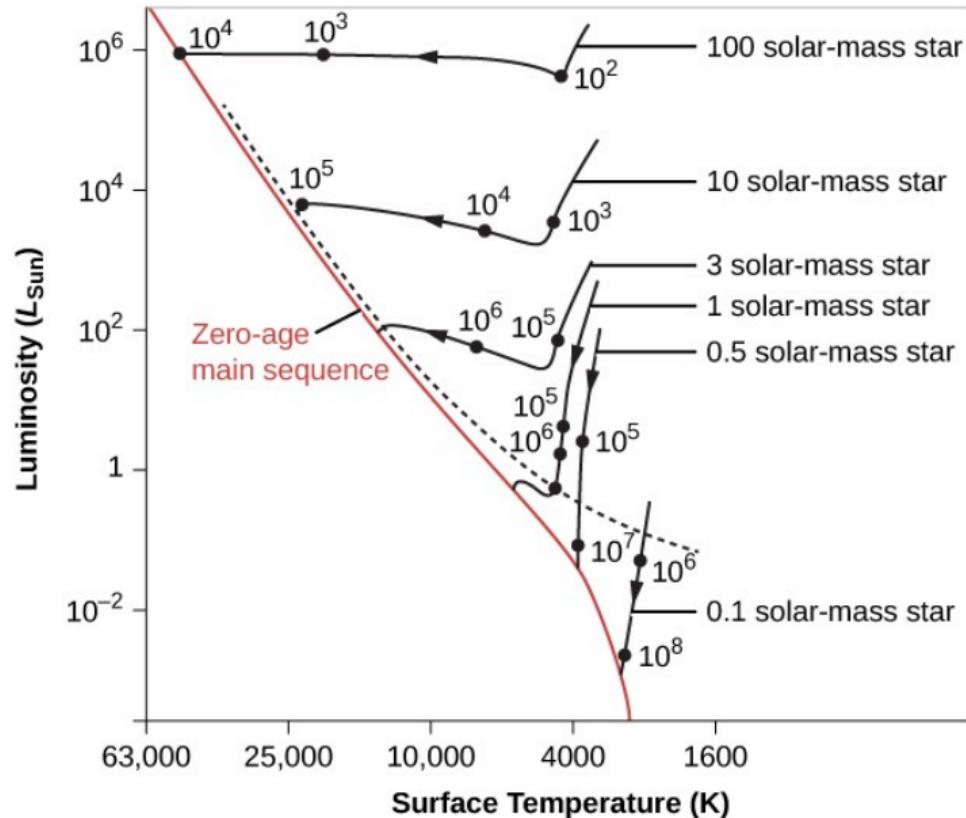


Class	Temperature	Apparent color	Hydrogen lines	Other noted spectral features
O	$\geq 30,000$ K	blue	Weak	ionized helium lines
B	10,000–30,000 K	blue white	Medium	neutral helium
A	7,500–10,000 K	white to blue white	Strong	ionized calcium (weak)
F	6,000–7,500 K	white	Medium	ionized calcium (weak)
G	5,200–6,000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



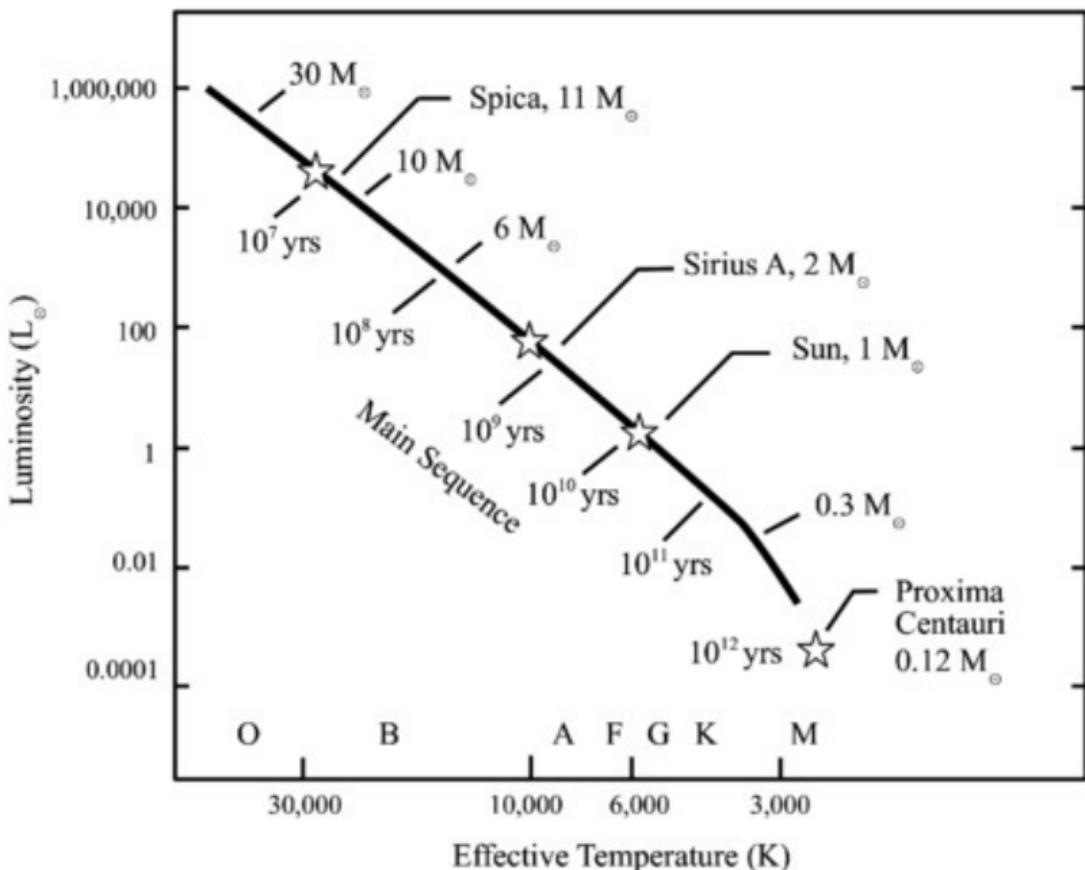
# Estrellas antes de alcanzar la Secuencia Principal

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



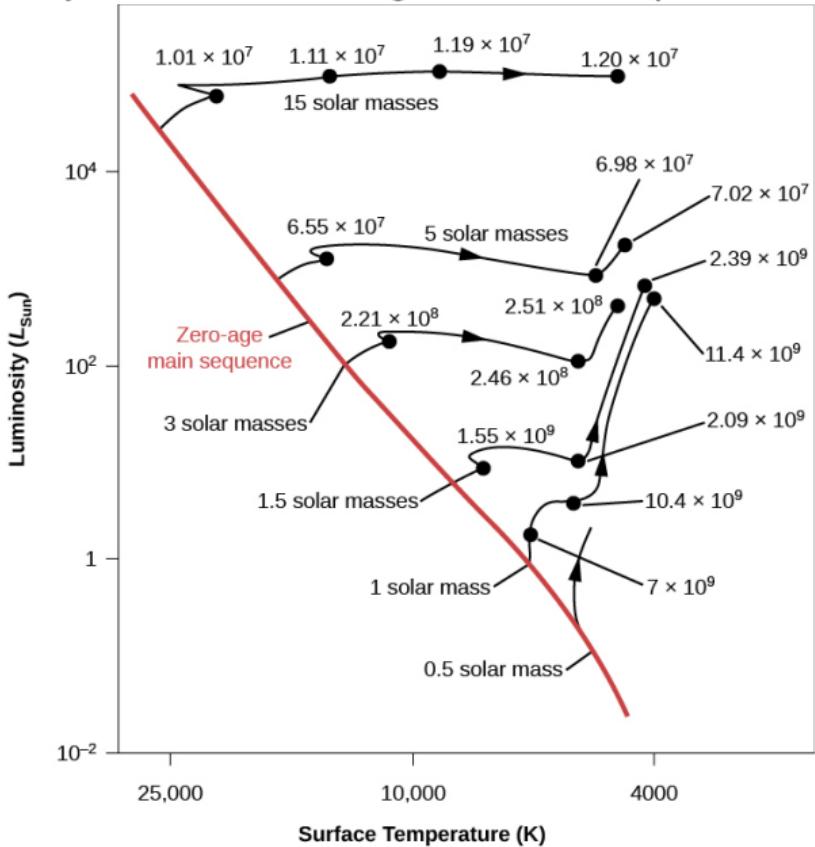
- Trayectorias de proto-estrellas de distinta masa inicial contrayéndose
- Los números en cada trayectoria es el tiempo en años que tarda en pasar por cada punto
- Inicialmente las proto-estrellas no son visibles ya que están rodeadas de una capa material opaco que está cayendo sobre la estrella (este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

# Estrellas en la Secuencia Principal



# Estrellas después de la Secuencia Principal

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

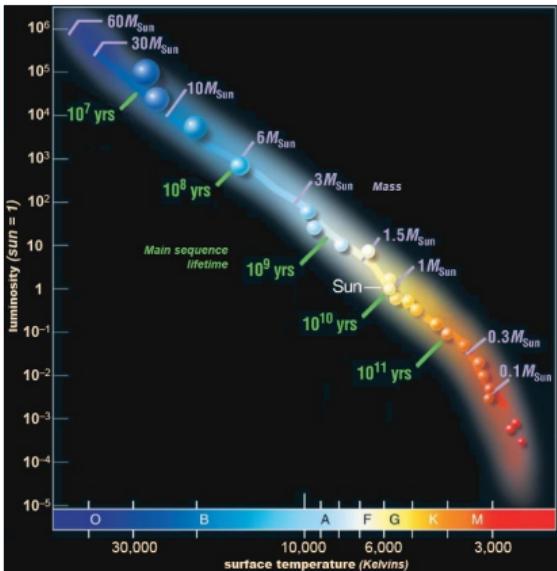


- Trayectorias de estrellas de distinta masa hasta alcanzar la fase de gigante roja o super-gigante roja
- Las estrellas más masivas, envejecen más rápido, pasando más rápido por cada una de las etapas en su vida

# Tiempo de Vida de las Estrellas

Masa [ $M_{\odot}$ ]	Luminosidad [ $L_{\odot}$ ]	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

Recordar: Edad del Universo 13.800.000.000 años



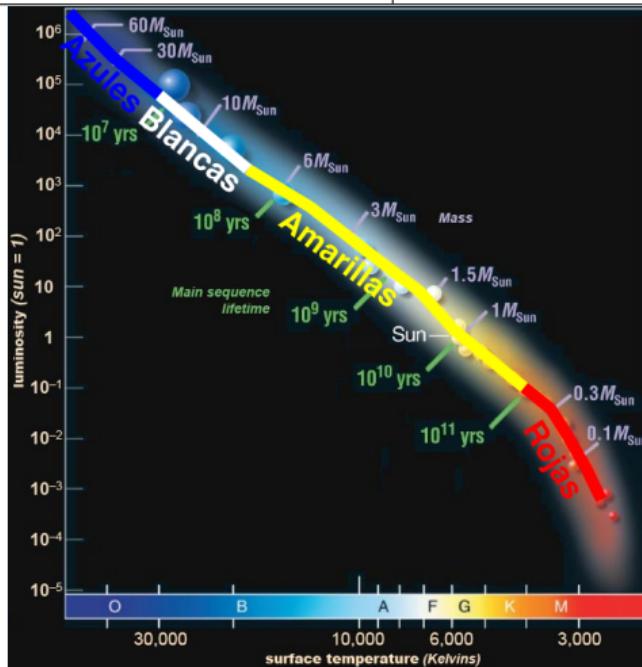
### 3. Evolución Estelar

### 3. Evolución Estelar

Clasificación Simplificada de las Estrellas

# Clasificación Simplificada de Estrellas en la Secuencia Principal

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



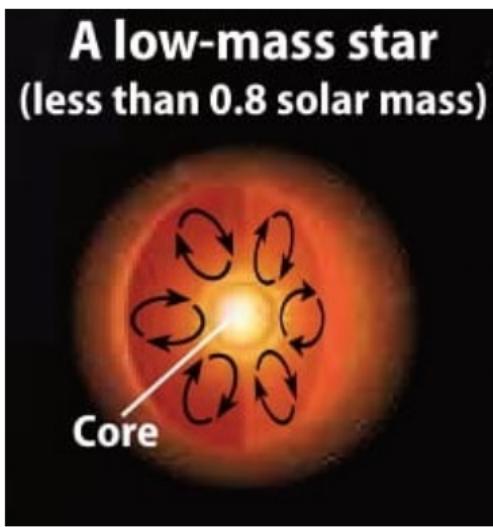
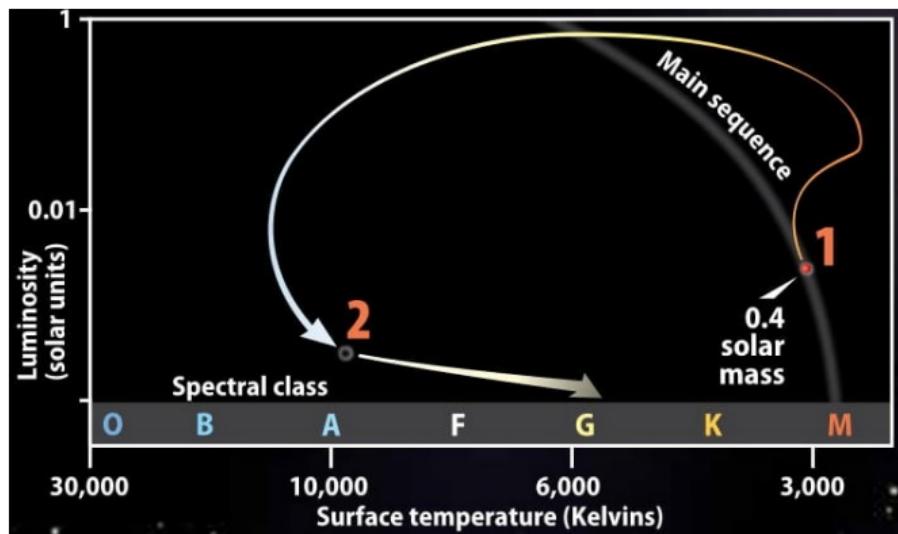
# Clasificación Simplificada de Estrellas en la Secuencia Principal

Tipo de Estrella	Masa	Fusión H	Fusión He	Fusión C-Fe	Punto Final
Rojas	$0.1 < \frac{M}{M_{\odot}} < 0.5$	✓	x	x	Enana Blanca
Amarillas	$0.5 < \frac{M}{M_{\odot}} < 8$	✓	✓	x	Nebulosa Planetaria + Enana Blanca
Blancas	$8 < \frac{M}{M_{\odot}} < 20$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Estrella de Neutrones
Azules	$20 < \frac{M}{M_{\odot}} < \sim 100$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Agujero Negro

### 3. Evolución Estelar

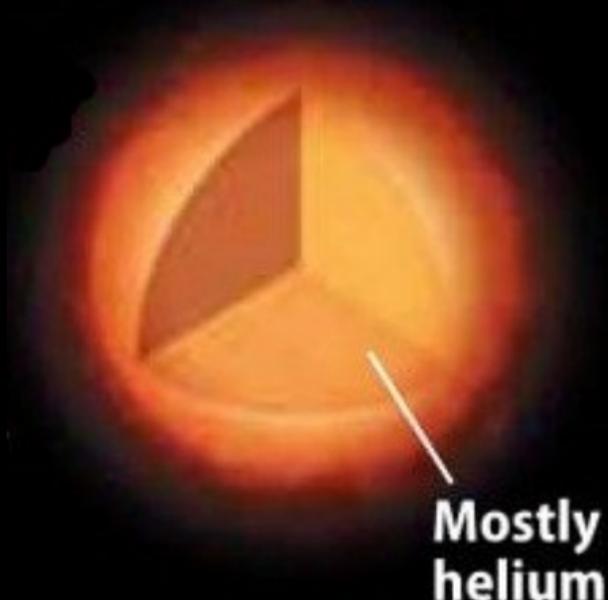
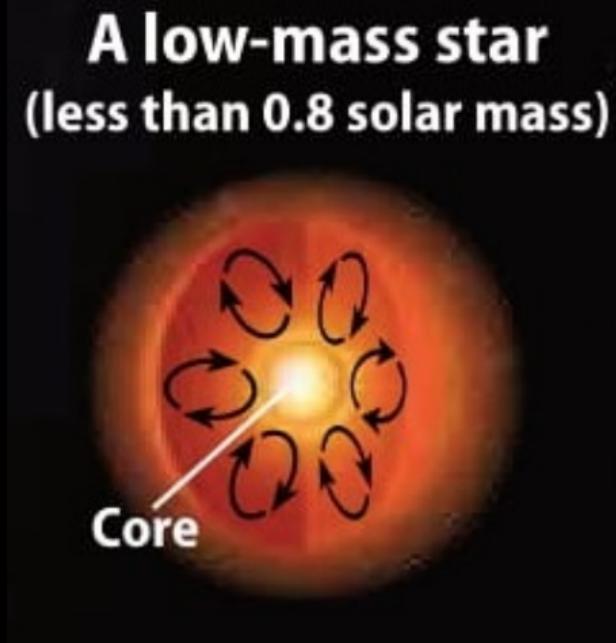
Estrellas Rojas ( $0.1M_{\odot} < M < 0.5M_{\odot}$ )

# Evolución de las Estrellas Rojas ( $0.1M_{\odot} < M < 0.5M_{\odot}$ )



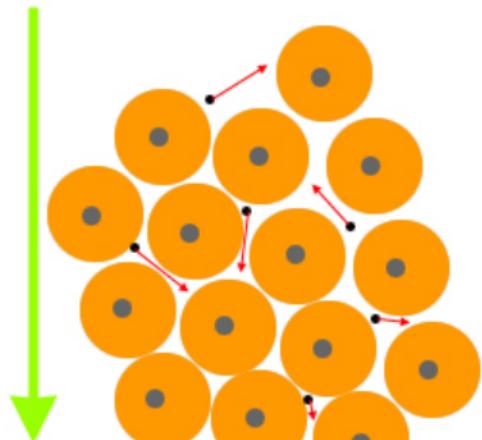
- Las estrellas rojas tienen vidas larguísimas (mayores a la edad actual del universo)
- El núcleo de la estrella nunca alcanza la temperatura necesaria para fusionar  $He$ .
- Debido a que la convección mezcla continuamente los componentes de la estrella, prácticamente todo el  $H$  de la estrella es 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



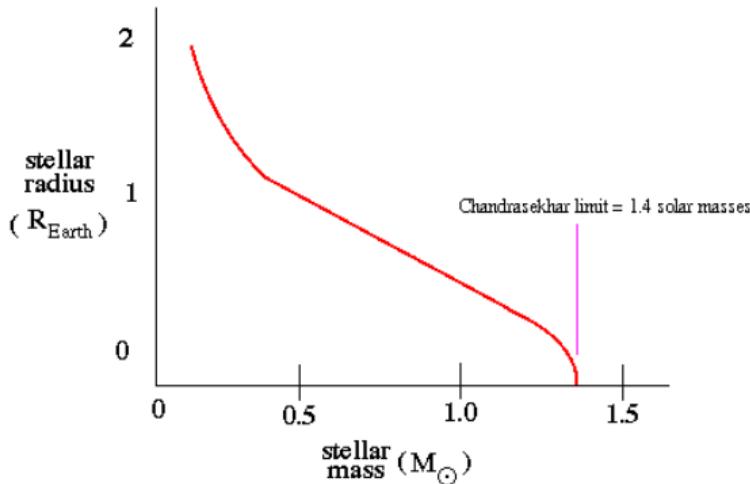
# Producto Final de la Evolución: Enana Blanca de Helio

white dwarf



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

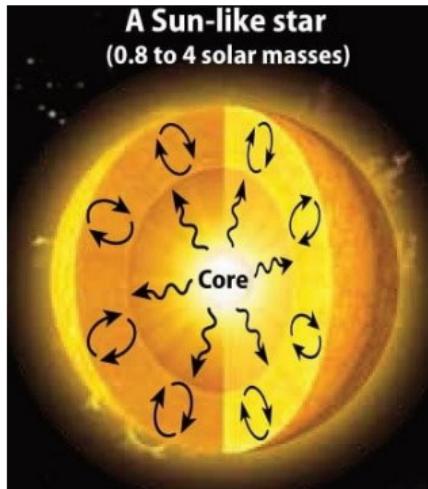
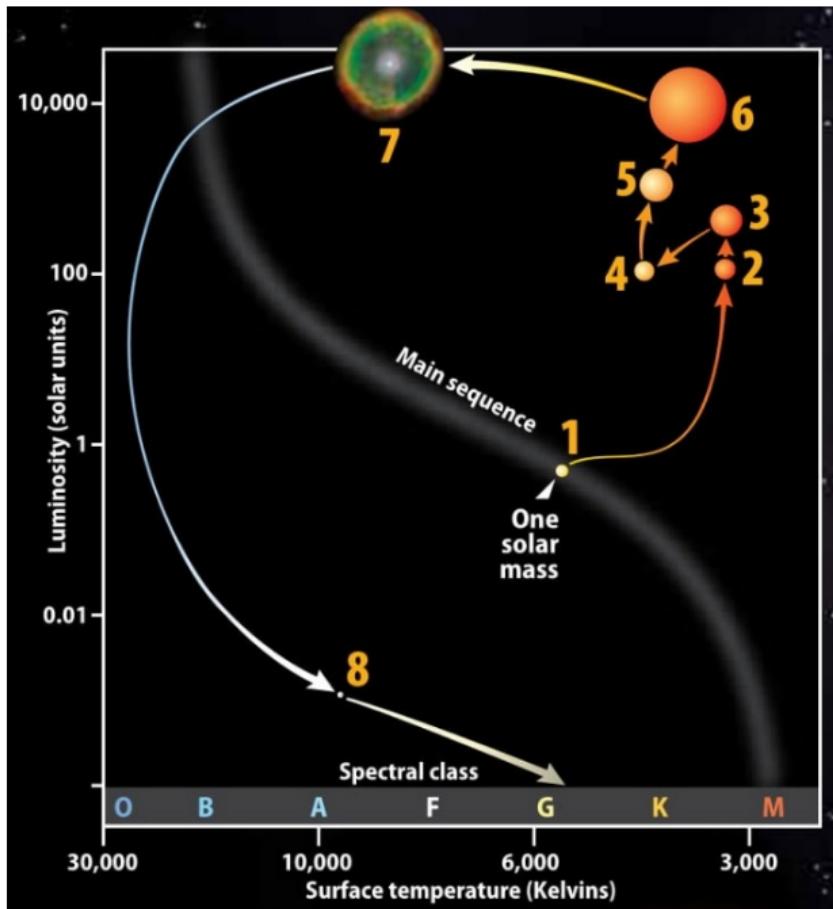
- La vida de la estrella roja termina en una enana blanca de *He*
- La masa de la enana blanca es similar a la masa inicial de la estrella pero su diámetro es similar al de la tierra
- La enana blanca esta hecha de materia súper-densa!



### 3. Evolución Estelar

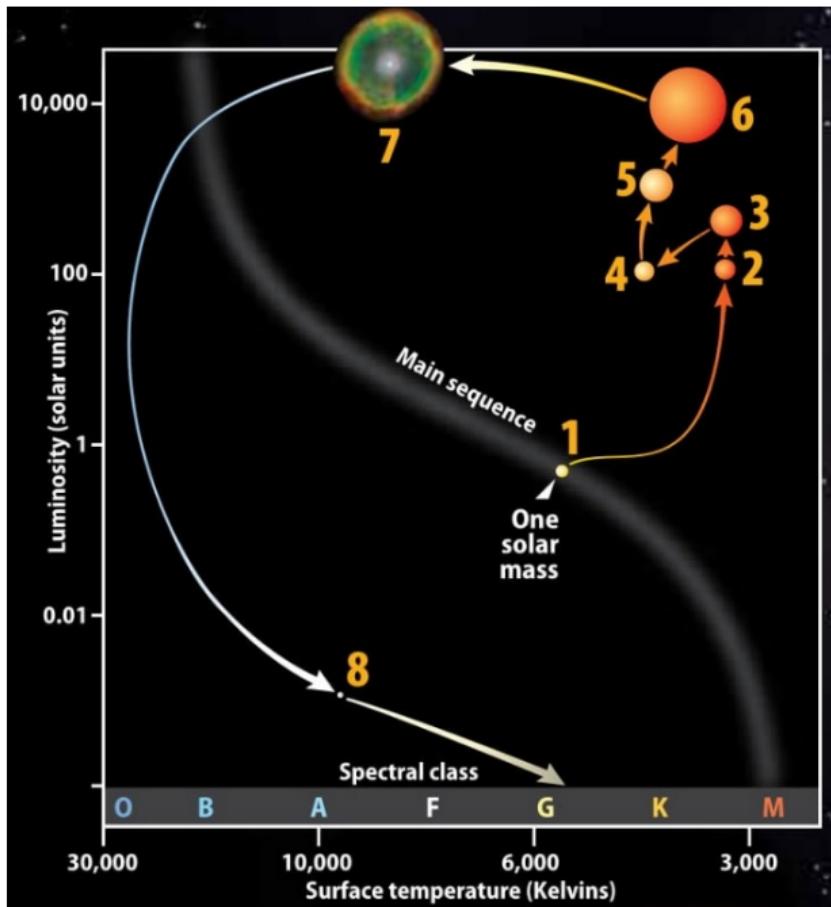
Estrellas Amarillas ( $0.5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$ )

# Evolución de las Estrellas Amarillas ( $0.5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$ )



- 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.

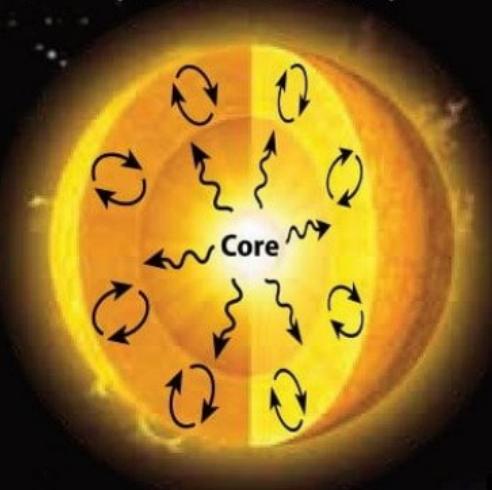
# Evolución de las Estrellas Amarillas ( $0.5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$ )



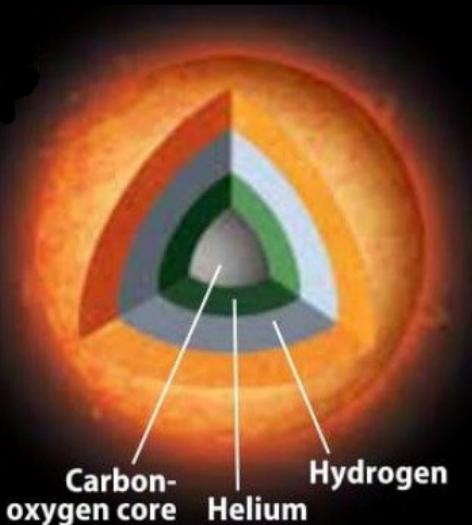
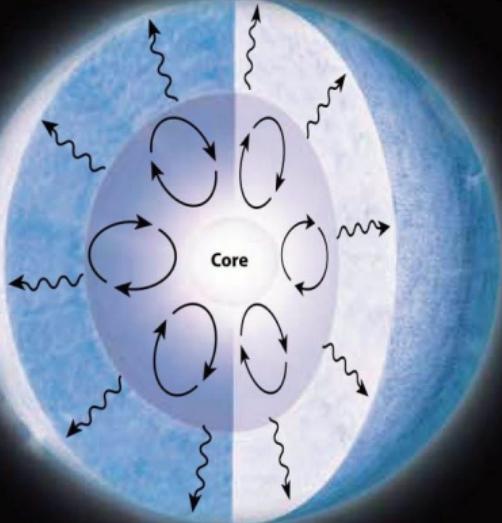
- Solo una pequeña parte del Hidrógeno disponible puede ser fusionado
- Estas estrellas pasan por dos etapas de gigante roja
- Terminan su vida expulsando parte de sus capas exteriores generando una nebulosa planetaria
- El estadio final es una enana blanca (que eventualmente se convierte en una enana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



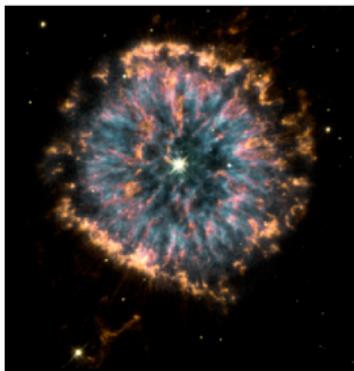
# Producto Final de la Evolución: Nebulosa Planetaria



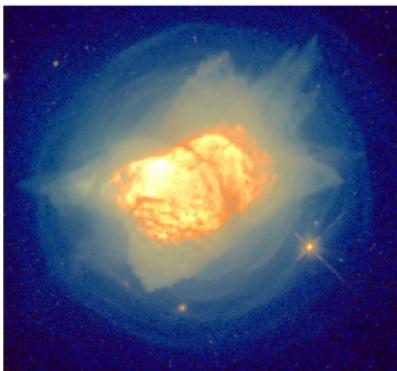
(a)



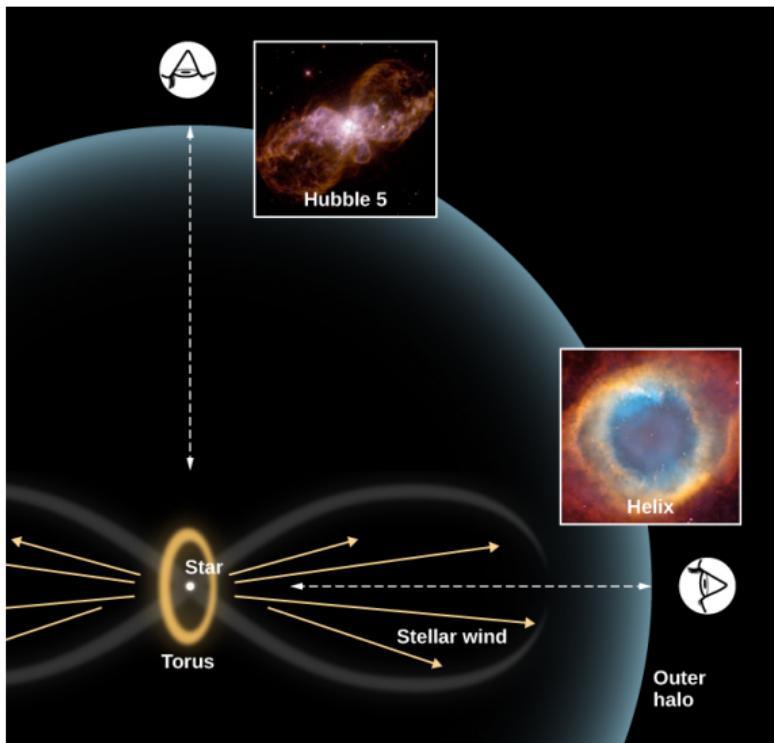
(b)



(c)



(d)



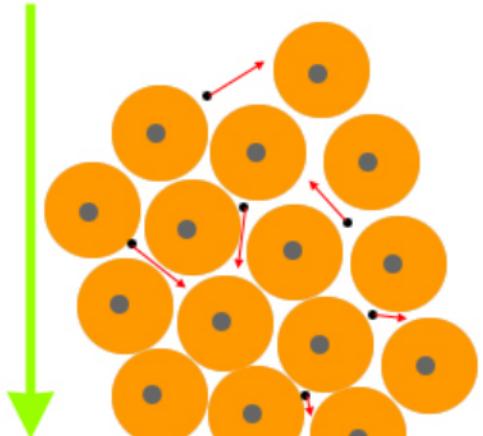
- Las nebulosas planetarias solo duran unos pocos miles de años

# Producto Final de la Evolución: Nebulosa Planetaria

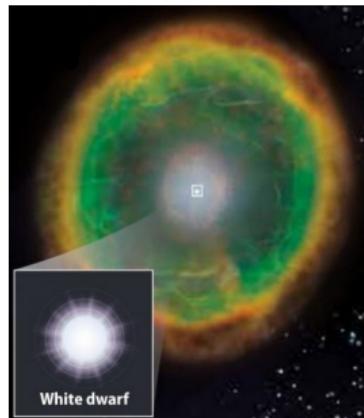


# Producto Final de la Evolución: Enana Blanca

white dwarf



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

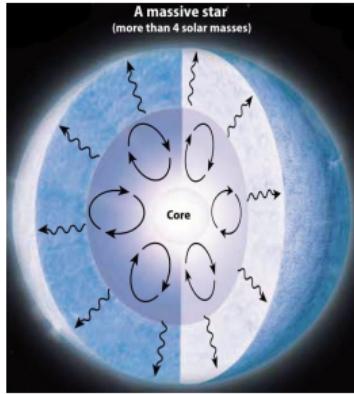
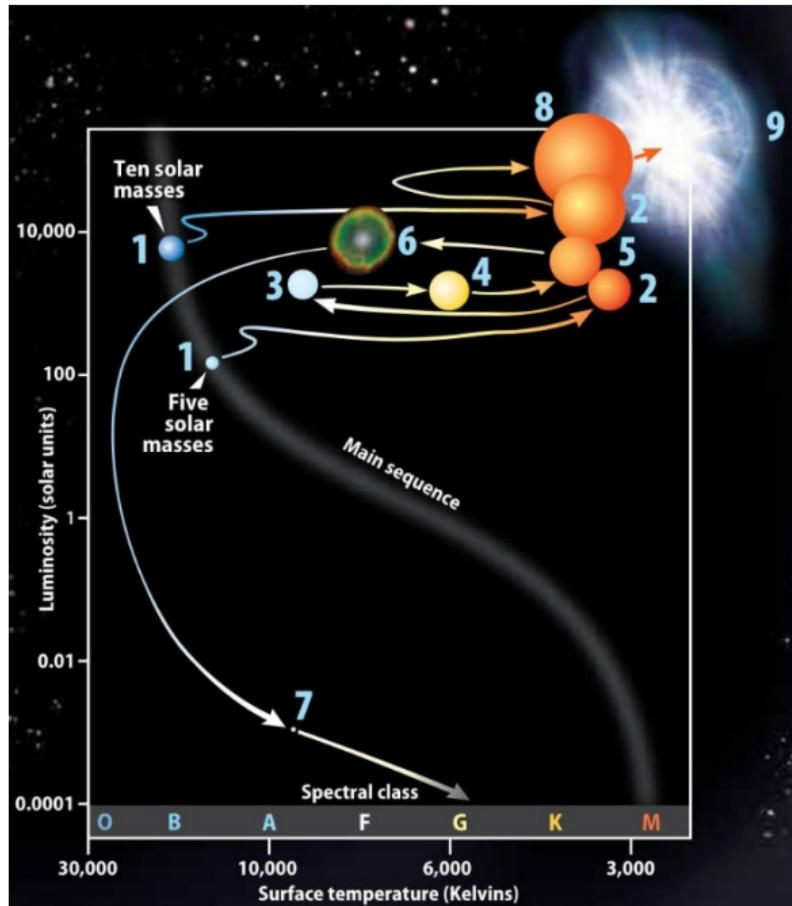


- La vida de la estrella amarilla termina en una enana blanca de Carbono
- La masa de la enana blanca es similar a la masa inicial de la estrella pero su diámetro es similar al de la tierra
- La enana blanca esta hecha de materia súper-densa!
- La masa máxima que puede tener una enana blanca es de  $1,4M_{\odot}$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

### 3. Evolución Estelar

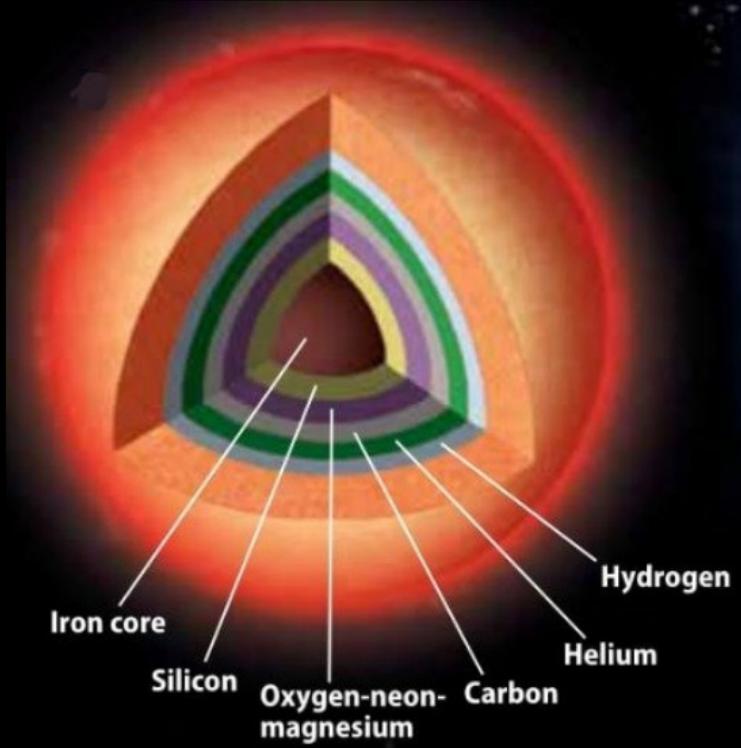
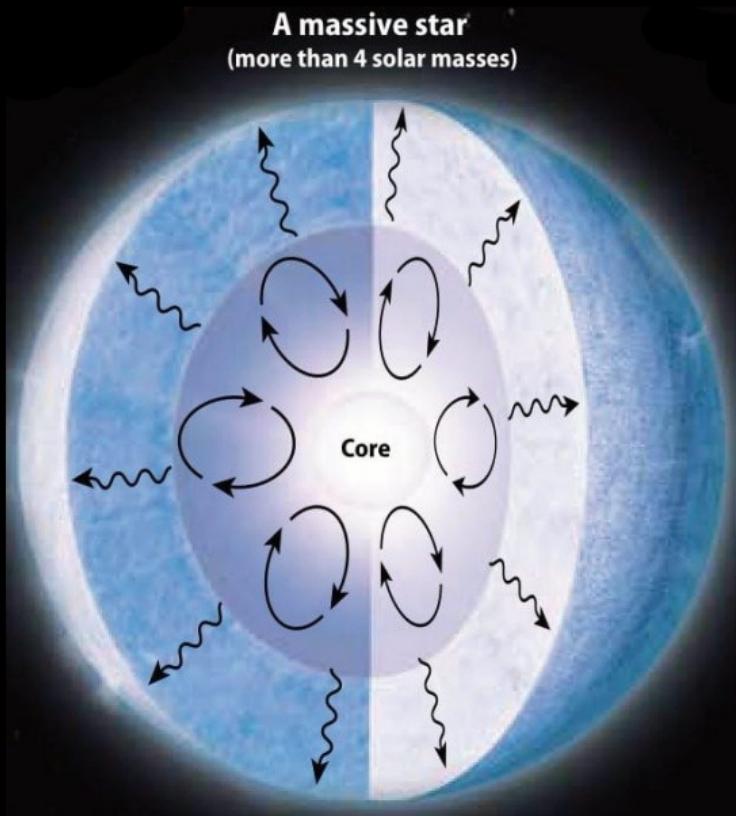
Estrellas Blancas ( $8M_{\odot} < M < 20M_{\odot}$ )

# Evolución de las Estrellas Blancas ( $8M_{\odot} < M < 20M_{\odot}$ )



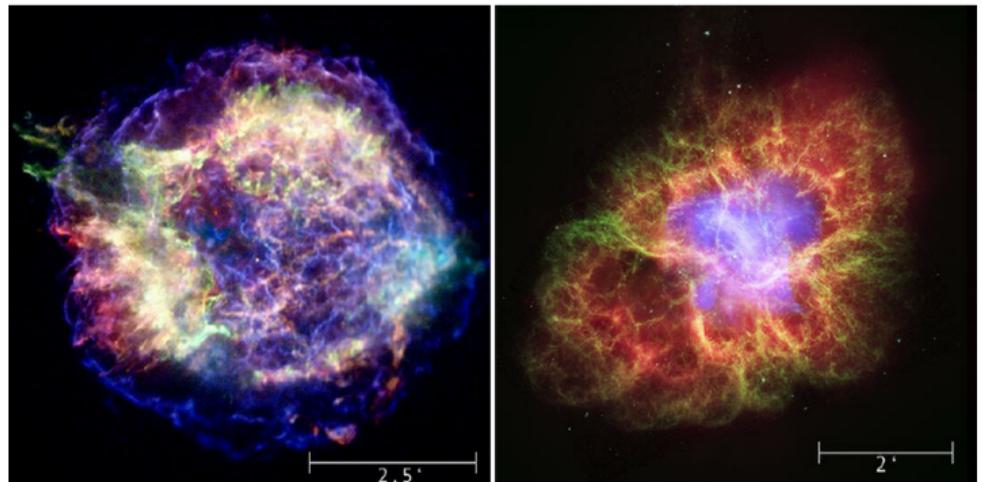
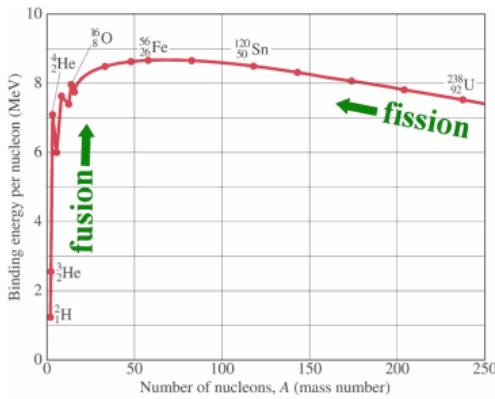
- El núcleo de la estrella puede fusionar:  $H \rightarrow He$ ,  $He \rightarrow C$ , ... hasta generar  $Fe$
- La vida de la estrella termina abruptamente en una explosión de **supernova**
- El estadio final es una **estrella de neutrones**

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



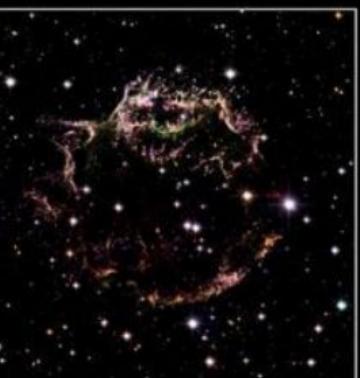
# Producto Final de la Evolución: Supernova de Colapso de Núcleo

- 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

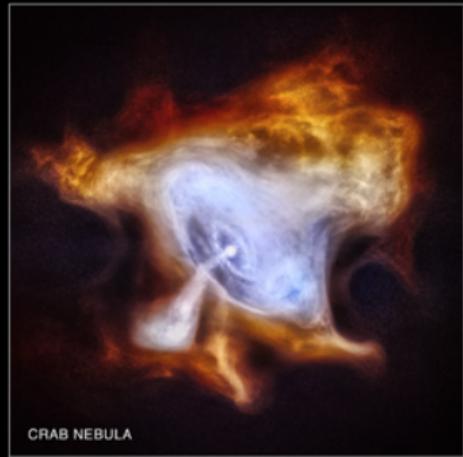


# Producto Final de la Evolución: Supernova de Colapso de Núcleo

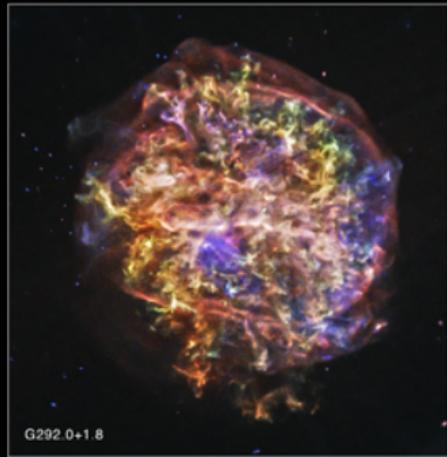
Ejemplo: Animación de la Supernova Cassiopeia A (distancia: 11,000 ly; su luz llegó a la Tierra en 1690s)



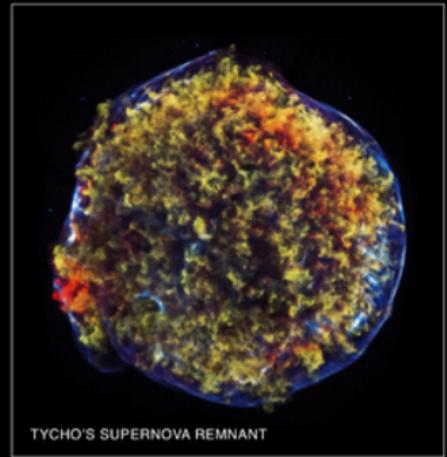
# Producto Final de la Evolución: Supernova de Colapso de Núcleo



CRAB NEBULA



G292.0+1.8



TYCHO'S SUPERNOVA REMNANT



3C58

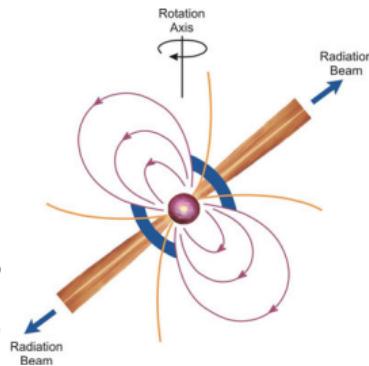
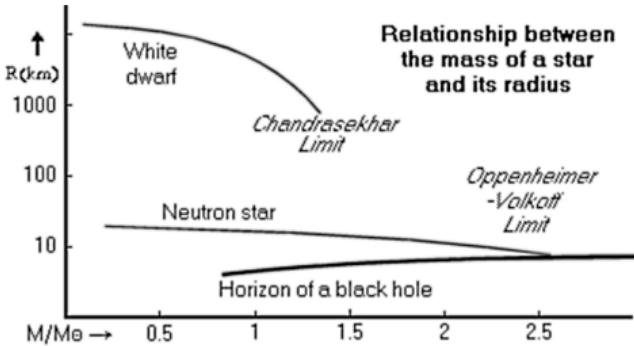
# Producto Final de la Evolución: Estrella de Neutrones

neutron star



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

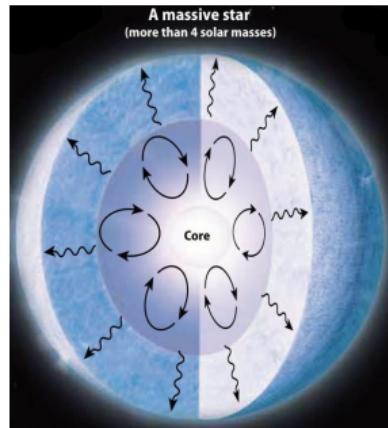
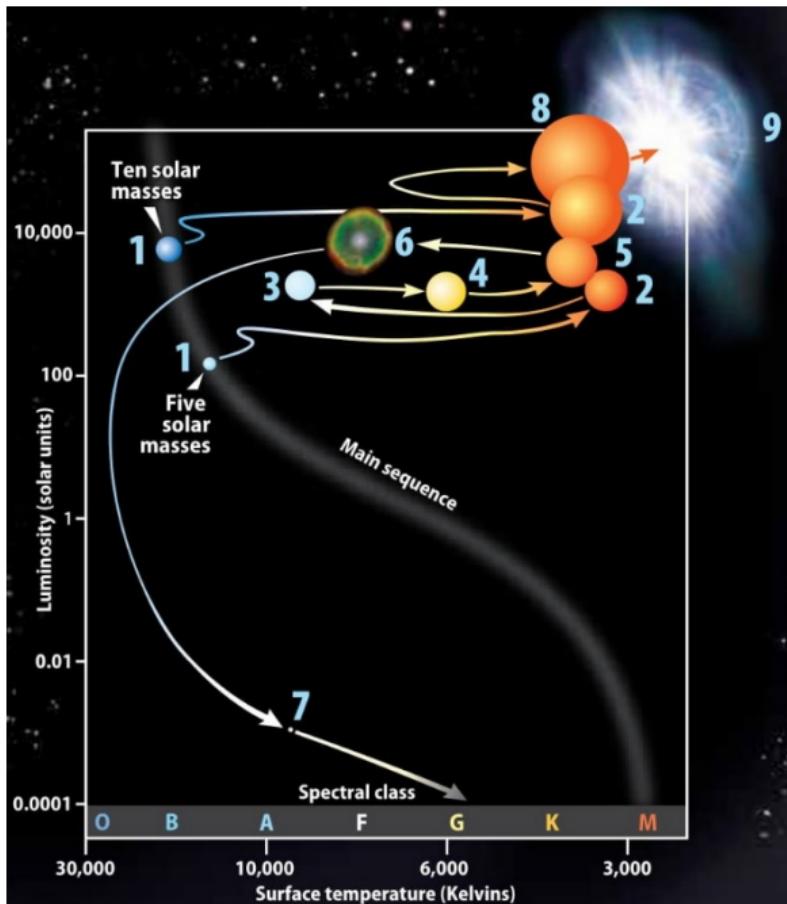
- La vida de la estrella blanca termina en una estrella de neutrones de altísima densidad y solo unos 20 km de diámetro
- Los protones y electrones del núcleo se fusionan para dar lugar a neutrones
- La fuerza que repele a los neutrones es la capaz de mantener la estrella de neutrones sin colapsar (siempre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



### 3. Evolución Estelar

Estrellas Azules ( $20M_{\odot} < M < \sim 100M_{\odot}$ )

# Evolución de las Estrellas Azules ( $20M_{\odot} < M < \sim 100M_{\odot}$ )



- 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**
- A diferencia de las estrellas blancas en las cuales el estadio final es una estrella de neutrones, en las estrellas azules es un **agujero negro!**

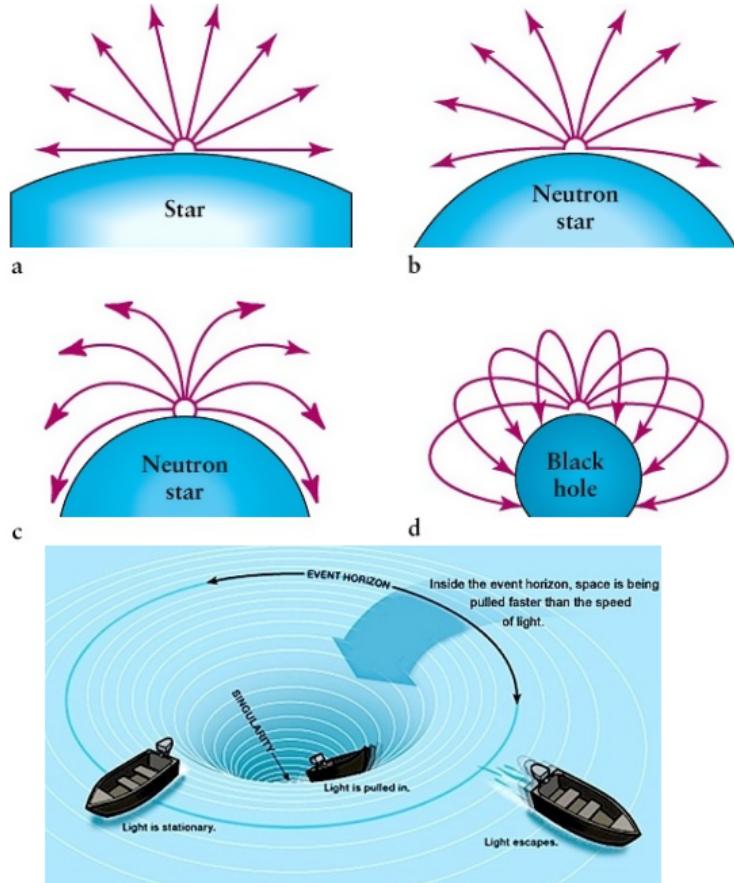
# Producto Final de la Evolución: Agujero Negro

## Agujero Negro:

- Es una región acotada del espacio donde existe una concentración de masa suficientemente elevada como para que el campo gravitatorio generado es tan grande que ni siquiera la luz puede escapar.

## Horizonte de Sucesos del Agujero Negro:

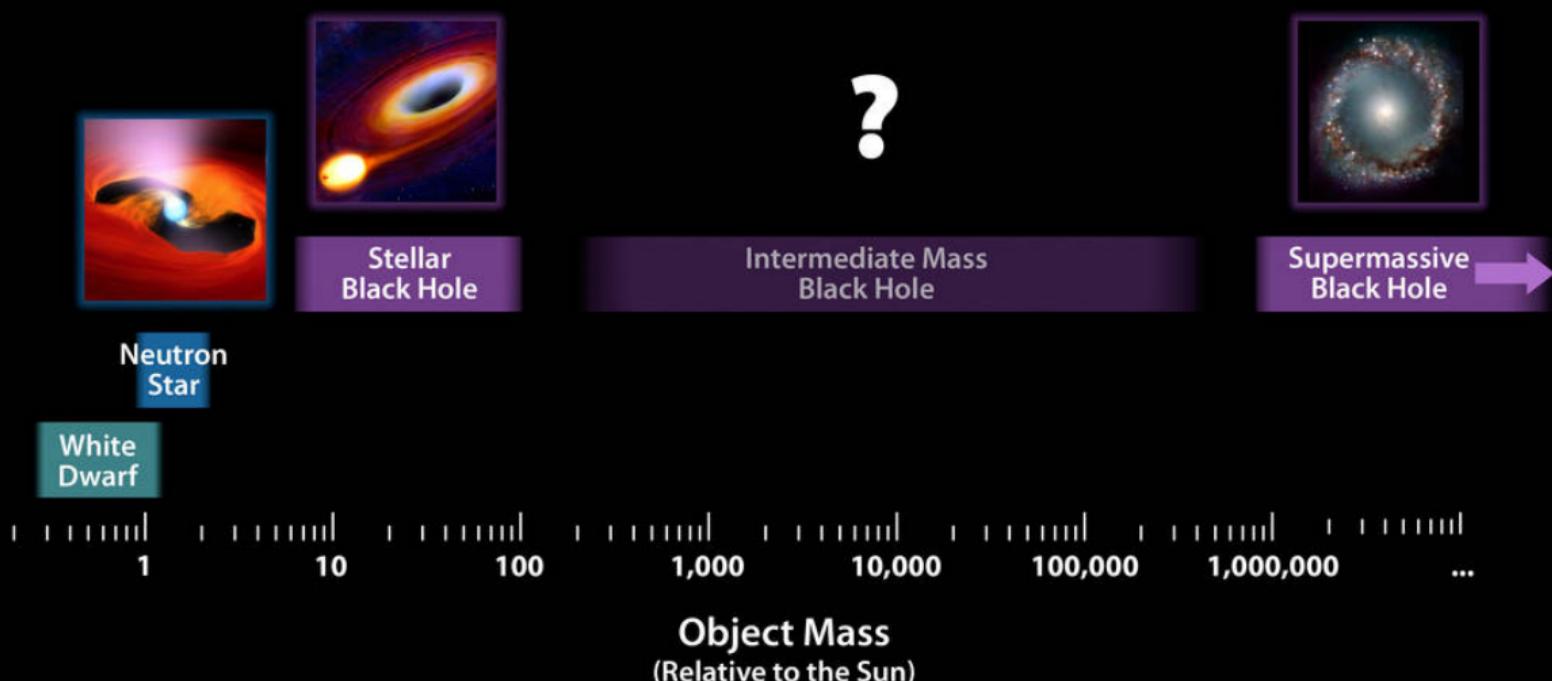
- El agujero negro curva el espacio-tiempo de manera que se forma una superficie cerrada (llamada horizonte de sucesos) que separa la región del agujero negro del resto del universo, y a partir de él ninguna partícula puede salir, incluidos los fotones.



# Producto Final de la Evolución: Agujero Negro

Comparación de los Productos Finales de la Evolución Estelar

## Observed Mass Ranges of Compact Objects



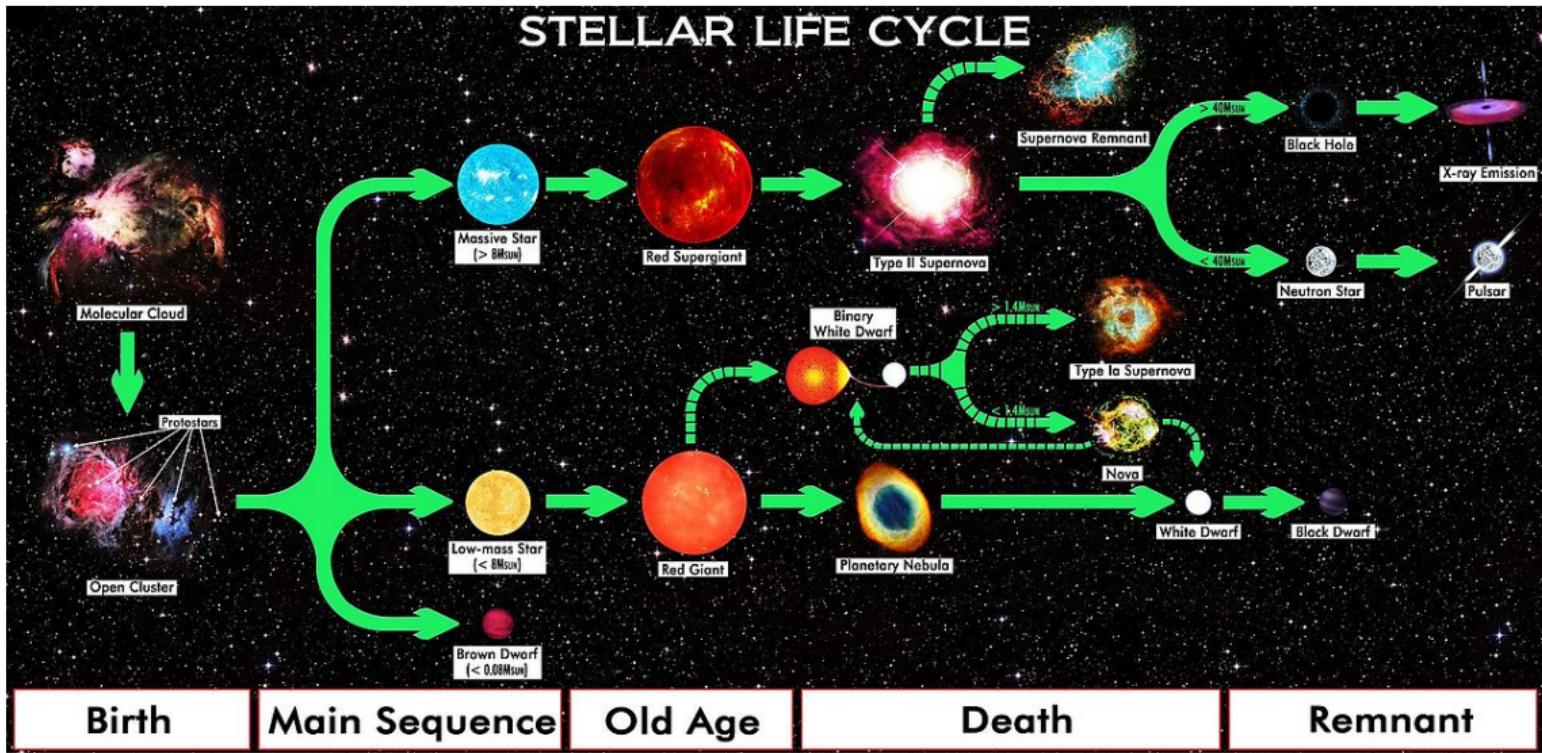
### 3. Evolución Estelar

Síntesis

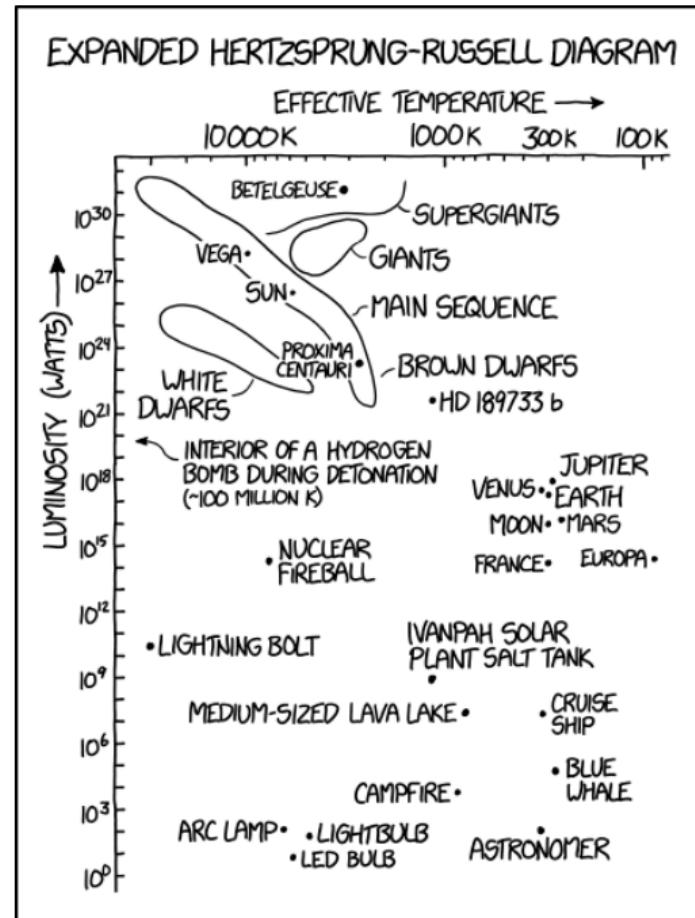
# Clasificación Simplificada de Estrellas en la Secuencia Principal

Tipo de Estrella	Masa	Fusión H	Fusión He	Fusión C-Fe	Punto Final
Rojas	$0.1 < \frac{M}{M_{\odot}} < 0.5$	✓	x	x	Enana Blanca
Amarillas	$0.5 < \frac{M}{M_{\odot}} < 8$	✓	✓	x	Nebulosa Planetaria + Enana Blanca
Blancas	$8 < \frac{M}{M_{\odot}} < 20$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Estrella de Neutrones
Azules	$20 < \frac{M}{M_{\odot}} < \sim 100$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Agujero Negro

# Ciclo de vida de las Estrellas



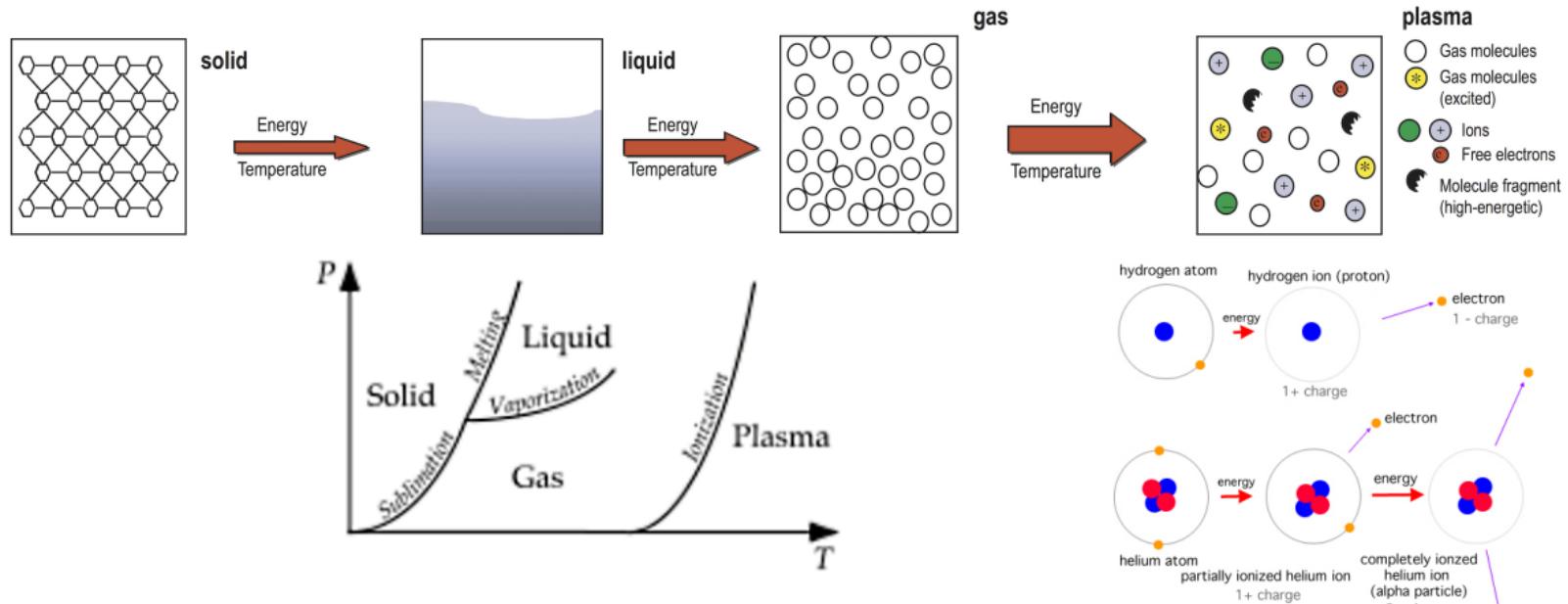
# Diagrama Hertzsprung-Russell Expandido (por XKCD)



# Resumen

Material Extra

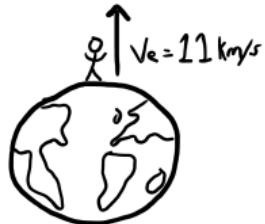
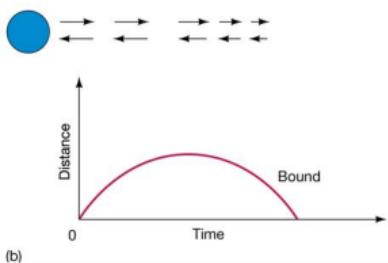
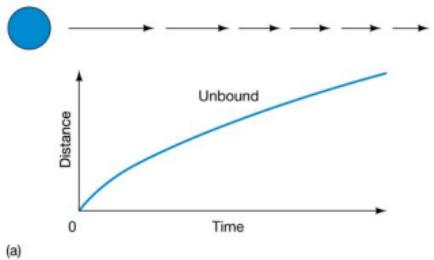
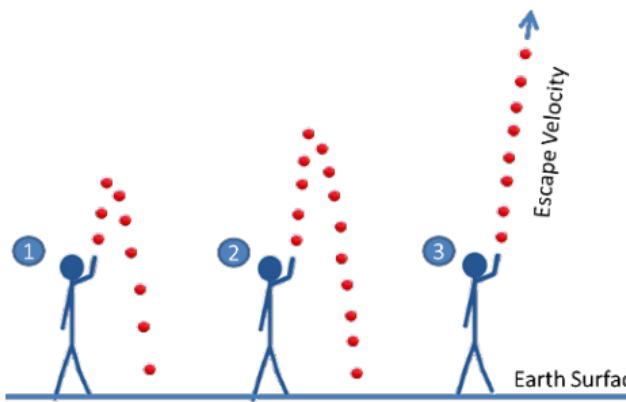
# Estado de la Materia dentro de una Estrella: Plasma



- El plasma se puede caracterizar como un gas ionizado
- El plasma es un estado de la materia 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.

# Producto Final de la Evolución: Agujero Negro

- Analogía de la velocidad de escape de un cuerpo masivo (e.g. la Tierra)

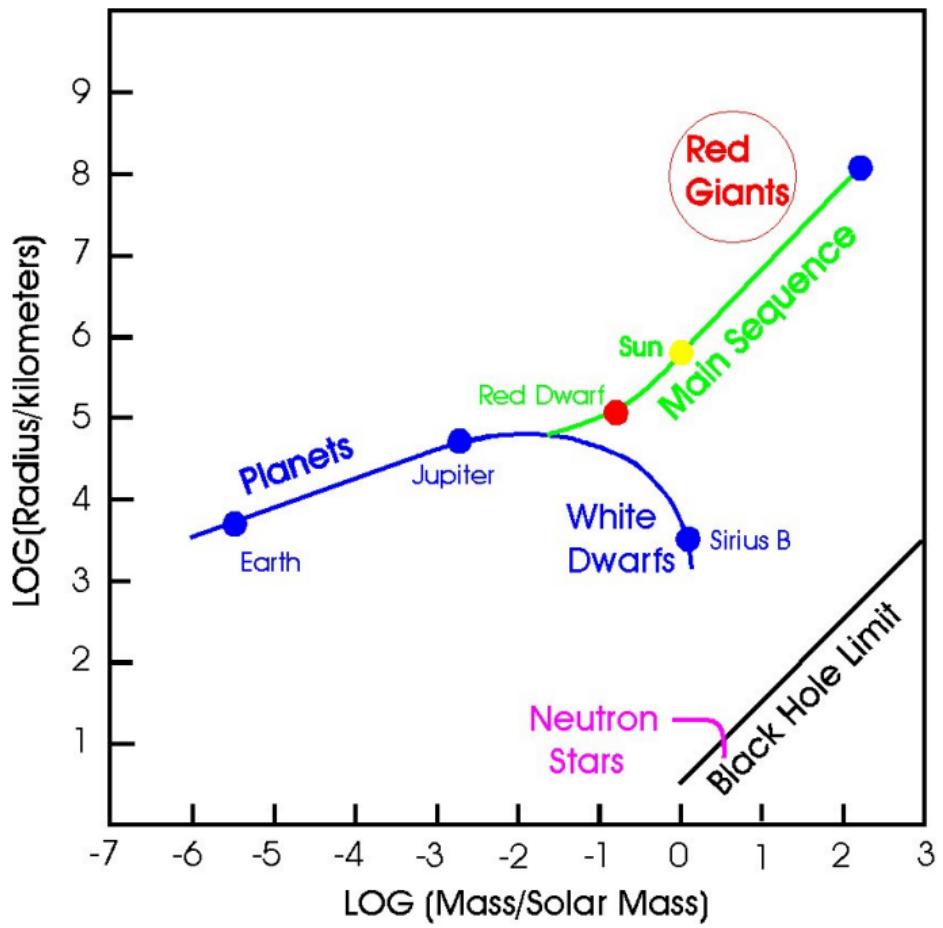


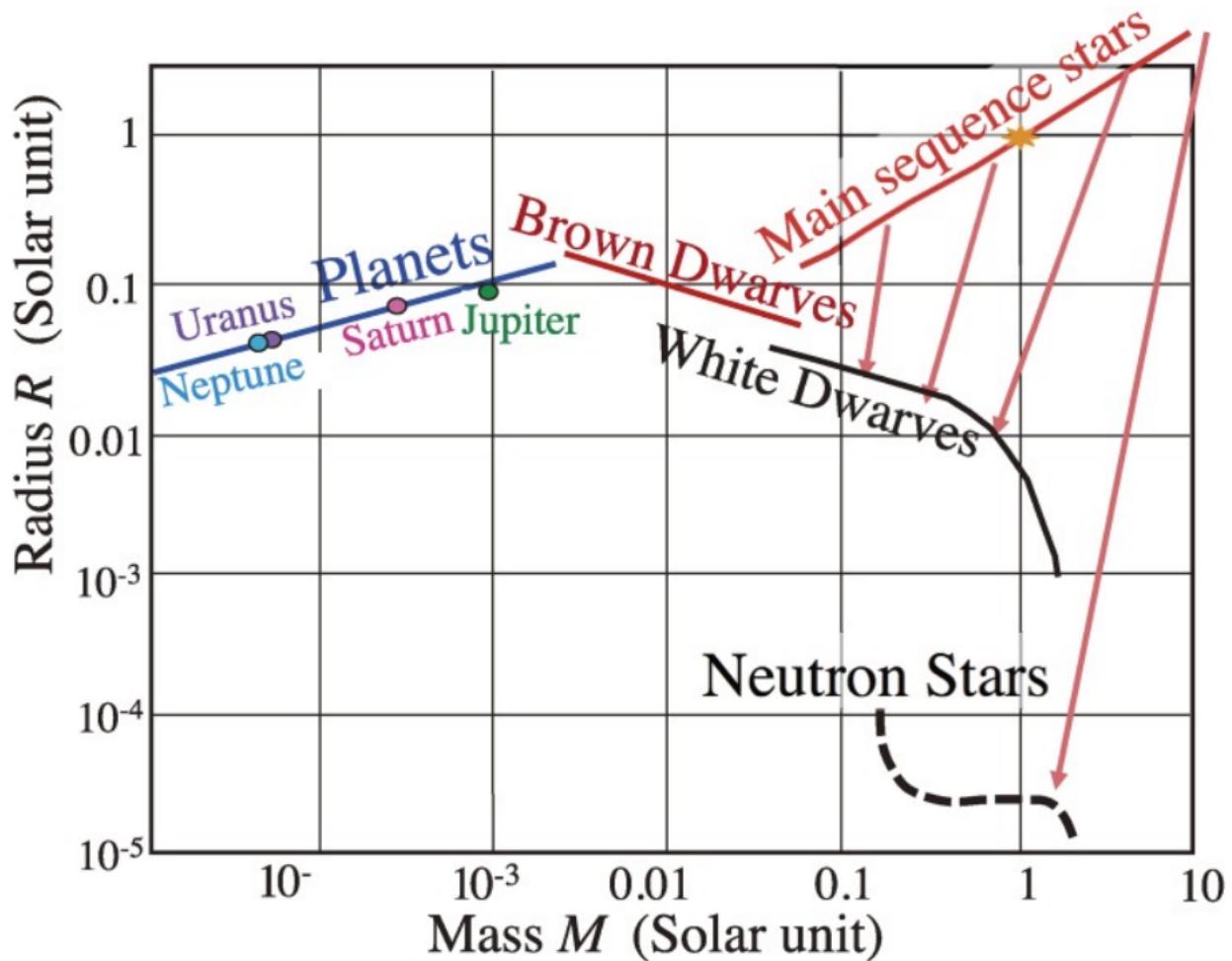
Velocidades de escape de:

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

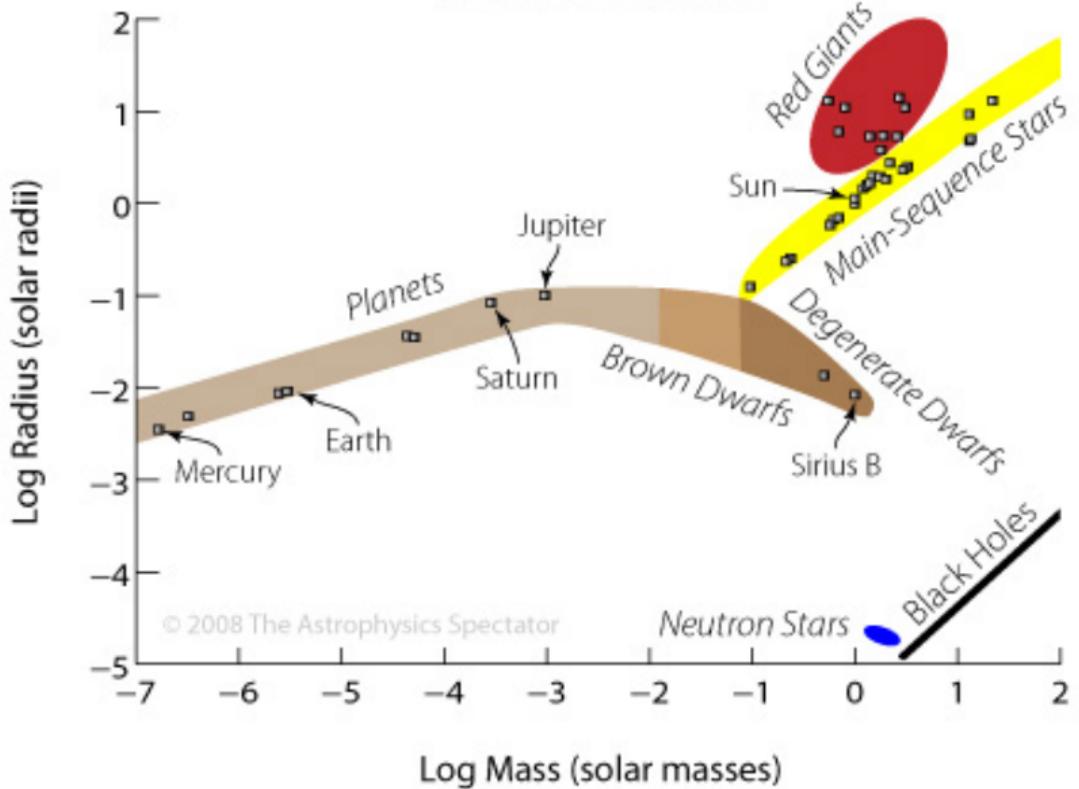
## Objetos Subestelares: Enanas Marrones (no son Estrellas!)

- 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  $\sim 0.075M_{\odot}$  ( $\sim 75M_{Jup.}$ ).
- El Litio puede ser fusionado a temperaturas menores que el Hidrógeno
- Objetos con masas  $0.075 > M/M_{\odot} > 0.05$
- 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



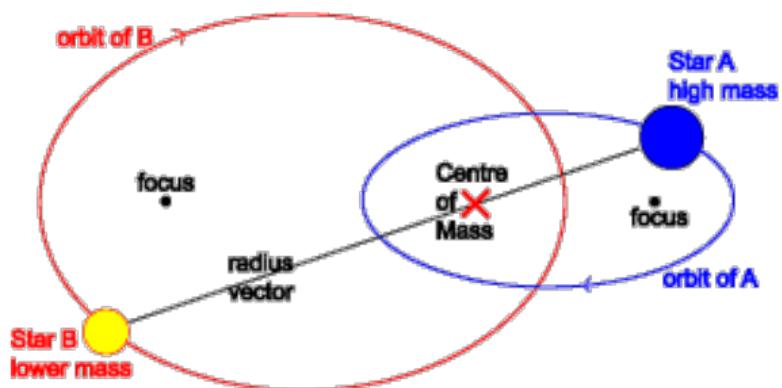


# Radius vs. Mass



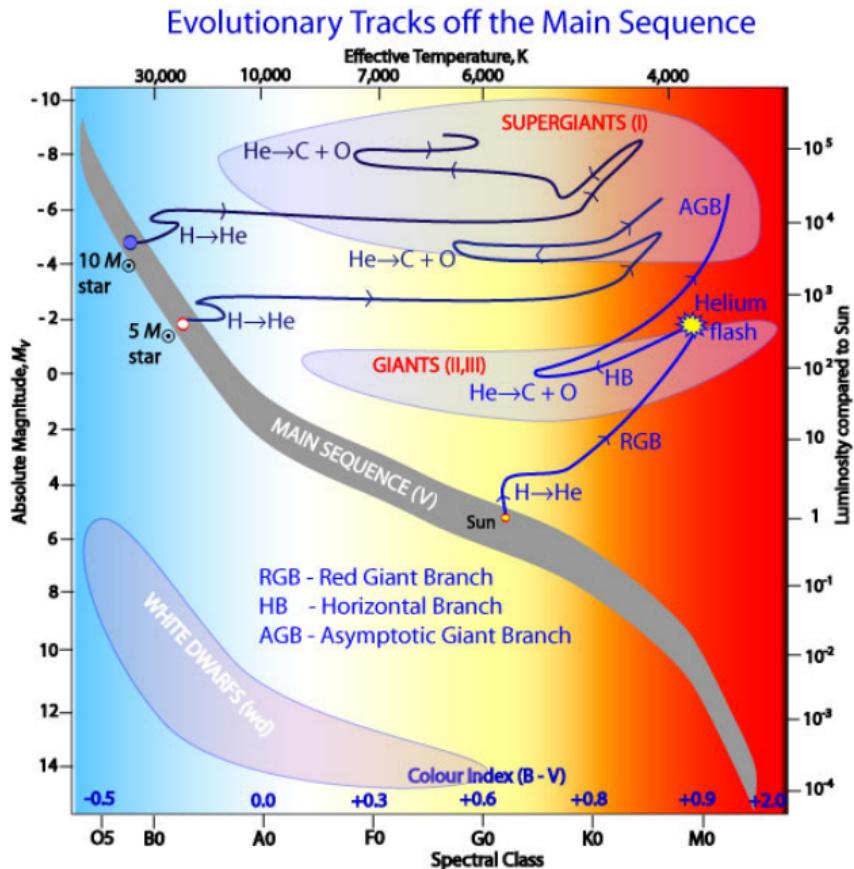
# Sistemas Esteriales: Binarios o Múltiples

- 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?



## Brown Dwarfs

- \* Brown Dwarf are objects intermediate in mass
- \* Were only recently discovered but now thousands are known
- \* Cannot fuse Hydrogen like "normal" stars
- \* More massive ones can fuse deuterium and even lithium

# Binary and Multiple Stars

## Binary and Multiple Stars

- \* What are binary stars?
- \* Extremly close stars can actually touch, Merging into a peanut-shaped stars
- \* Close binaries begin to flow into one another sometimes blowin up the star
- \* If one of the two is a white dwarf in can lead to priodic explosions and possibly even lead to blowing up the entire system

# Low Mass Stars

## Low Mass Stars

- \* Low Mass Stars can be divided in two categories
- \* very low mass stars  $0.1 < M < 0.5$ :
  - \* only fuses Hydrogen
  - \* endpoint: a white dwarf composed of Helium
- \* low mass stars  $0.5 < M < 8$ :
  - \* fuses Hydrogen first and Helium second
  - \* endpoint: a white dwarf composed of Carbon
  - \* for the bigger range of masses the star ends up in a planetary nebula surrounded by the white dwarf

## Recap

- \* Very Low Mass stars live a long time
- \* Fuse all their H into He
- \* Larger stars (like our sun) live shorter lives
- \* Fuse  $H \rightarrow He$  and  $He \rightarrow C$  (and some O and Ne)
- \* Fueled by Fusion
- \* In a later stage they turn into Red Giants
- \* They lose most of the mass and expose their core cooling very slowly

# White Dwarfs and Planetary Nebulae

## White Dwarfs and Planetary Nebulae

- \* When low mass stars die they form White Dwarfs
- \* White Dwarfs are roughly the size of Earth
- \* Cloudy with a chance of planetary nebulae
- \* Life Span

# White dwarf

- A white dwarf, also called a degenerate dwarf, is a stellar core remnant composed mostly of electron-degenerate matter. A white dwarf is very dense: its mass is comparable to that of the Sun, while its volume is comparable to that of Earth.
- White dwarfs are thought to be the final evolutionary state of stars whose mass is not high enough to become a neutron star, which would include the Sun and over 97%
- White dwarfs are composed of one of the densest forms of matter known, surpassed only by other compact stars such as neutron stars, black holes