

Estrellas I: ciclo de vida de las estrellas

Ernesto Nicola

Palma, 08-11-2024

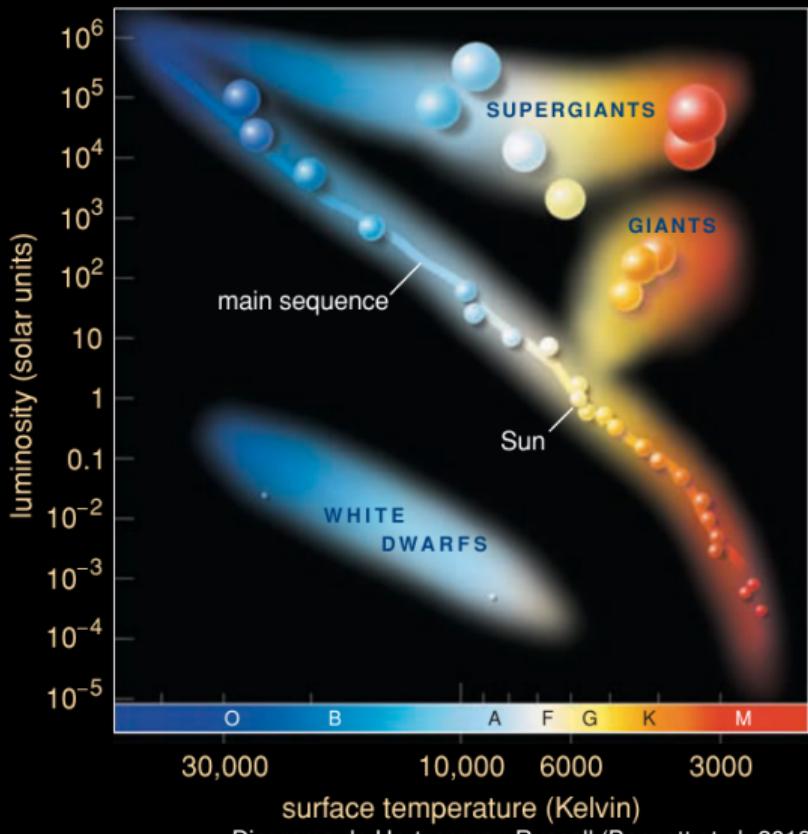
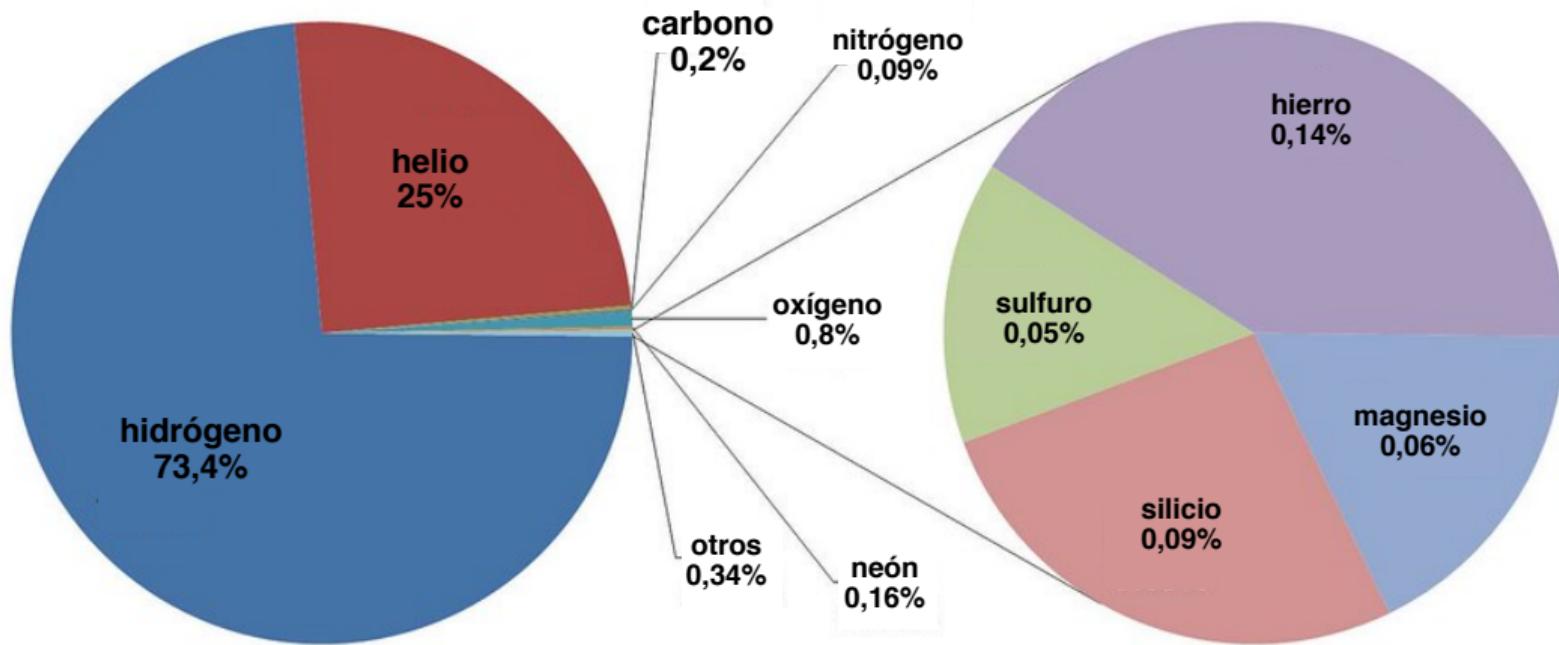


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

- 1** Composición y funcionamiento de las estrellas
- 2** Materia ultra-densa
 - Materia degenerada de electrones y neutrones
 - Agujeros negros
- 3** Las características principales de las estrellas
 - Diagrama de Hertzsprung-Russell
- 4** Nacimiento de las estrellas
- 5** La vida y muerte de las estrellas
 - Estrellas pequeñas
 - Estrellas intermedias
 - Estrellas grandes y muy grandes
 - Comparativa de la vida de las estrellas

1 Composición y funcionamiento de las estrellas

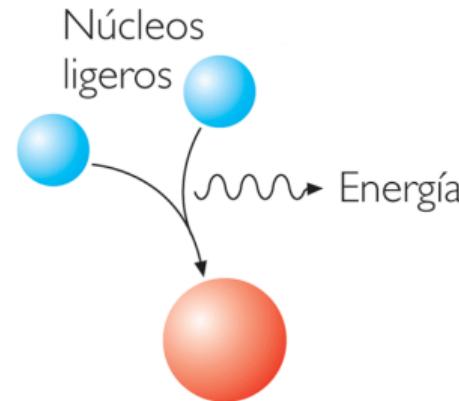
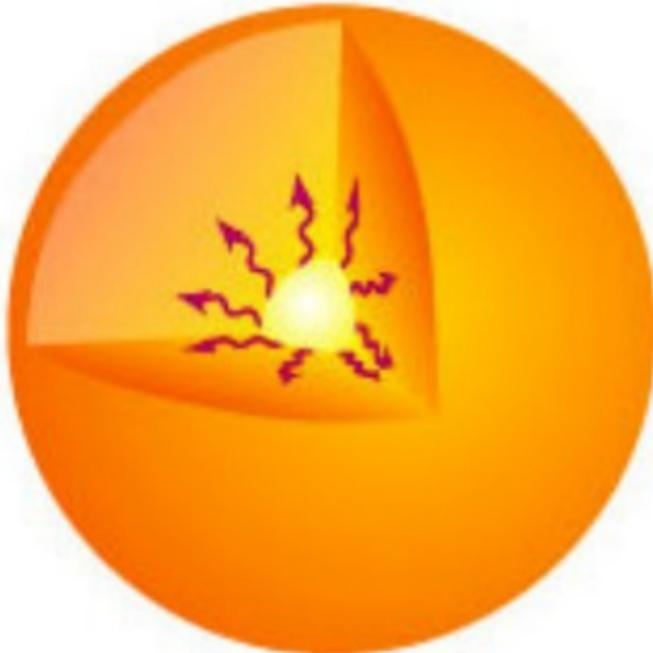
Composición de las estrellas



- Composición típica de una estrella (como el Sol):
 - H (hidrógeno): 73,7% por masa (o 92,1% por número de átomos)
 - He (helio): 24,8% por masa (o 7,8% por número de átomos)
 - Resto: 1,5% por masa.

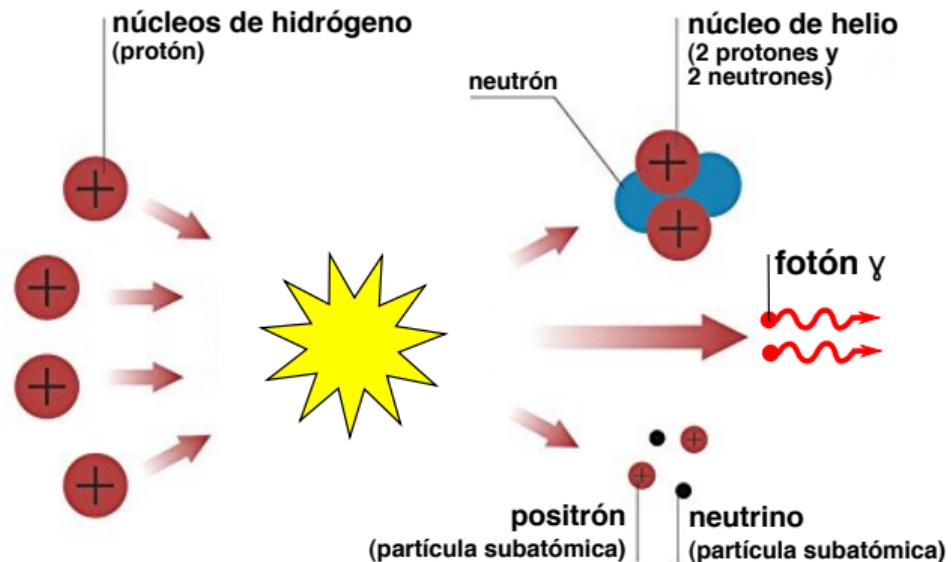
Las estrellas obtienen energía fusionando átomos ligeros

- Las estrellas son esferas de hidrógeno y helio que producen calor en su interior.



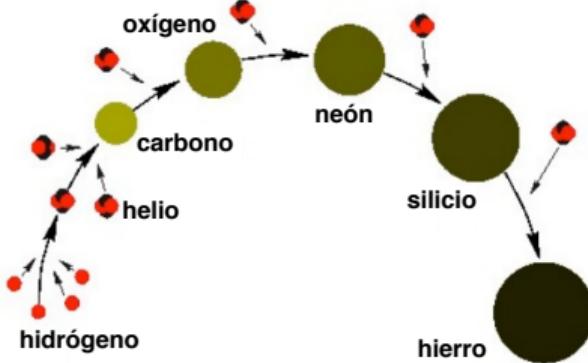
- En la parte más interior de todas las estrellas (el núcleo) se produce la fusión de átomos ligeros para formar átomos más pesados.
- La fusión produce mucha energía que calienta la estrella.
- El calor generado en el núcleo contrarresta la fuerza gravitatoria que haría colapsar la estrella.

La mayoría de las estrellas producen energía transformando H en He



- La fuente principal de energía de una estrella es la fusión del hidrógeno en helio.
 - 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 otros elementos: helio, carbono, oxígeno, etc.



- El hierro no se puede fusionar y se acumula.

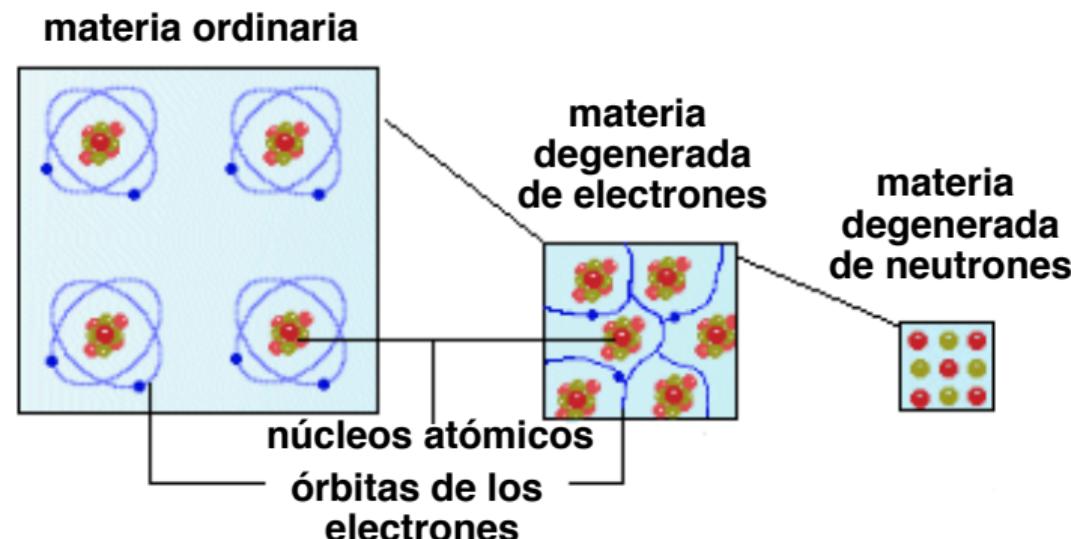
2 Materia ultra-densa

2 Materia ultra-densa

2.1 Materia degenerada de electrones y neutrones

Materia ultra-densa: materia degenerada de electrones y neutrones

- Cuando la materia es sometida a altísimas presiones, sus átomos (o núcleos) no pueden moverse libremente, convirtiéndose en materia ultra-densa
- Esta materia ultra-densa se llama **materia degenerada**
- El mecanismo que genera la materia degenerada es el **principio de exclusión de Pauli**



Gases a Altísimas Presiones: Materia Degenerada

- Normalmente la toda materia de una estrella se encuentra en estado de **plasma** (gas ionizado)
- Al final de su vida parte de la materia puede convertirse en **materia degenerada**

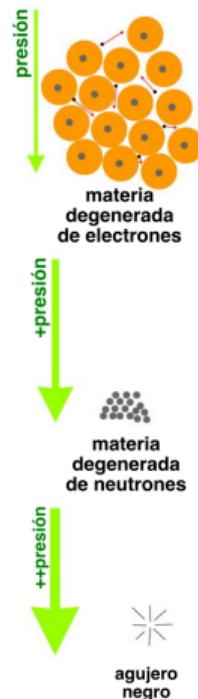
1 Degeneración de electrones:

- Los átomos están completamente compactados
- Efectos cuánticos impiden a los electrones estar en el mismo sitio
- 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 (formando materia compuesta exclusivamente por neutrones)
- Efectos cuánticos impiden a los neutrones estar en el mismo sitio
- Este mecanismo se observa en **estrellas de neutrones**
- Densidad típica: $\propto 100.000.000t/cm^2$

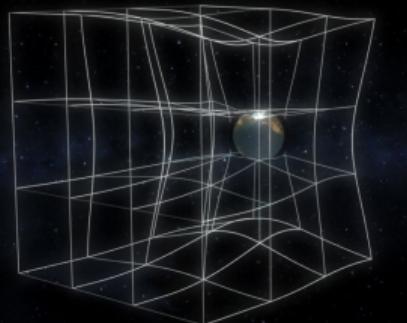
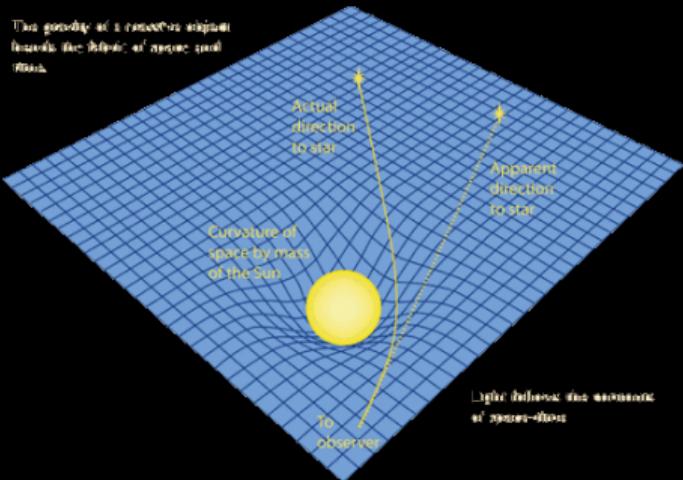
3 Agujero negro



2 Materia ultra-densa

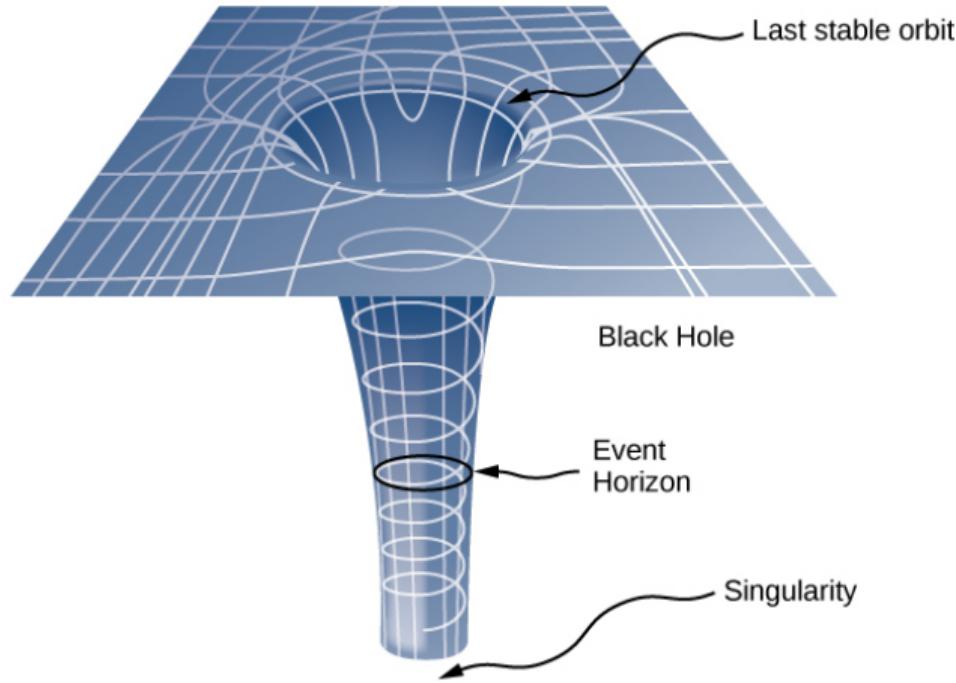
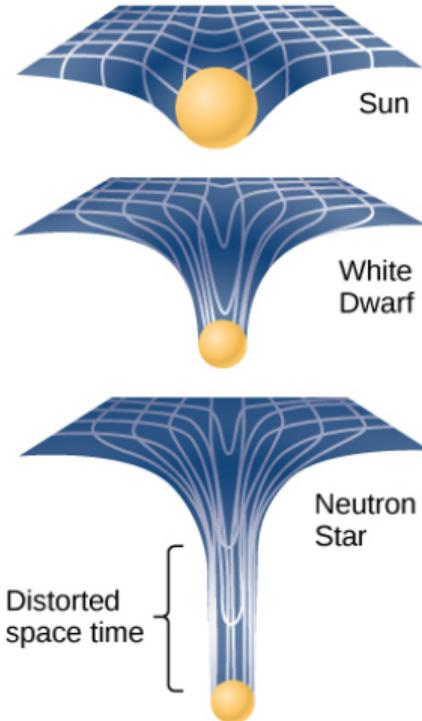
2.2 Agujeros negros

Teoría General de la Relatividad de Einstein



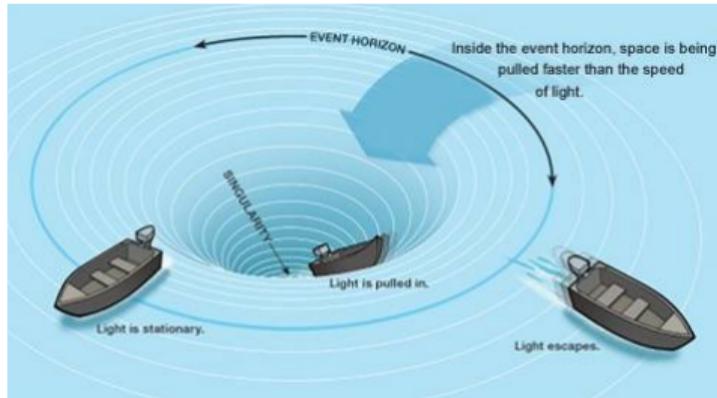
- La teoría de la relatividad general es una teoría sobre la fuerza de la gravedad.
- La teoría de la relatividad general fue desarrollada por Albert Einstein en 1916.
- Al teoría de la relatividad general se puede resumir como (John Wheeler):
"La materia le indica al espacio como tiene que curvarse y a su vez el espacio le indica a la materia como se tiene que mover"

Agujeros Negros



- Un agujero negro es una región del espacio-tiempo donde la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz (radiación electromagnética) puede escapar.

Anatomía de un agujero Negro

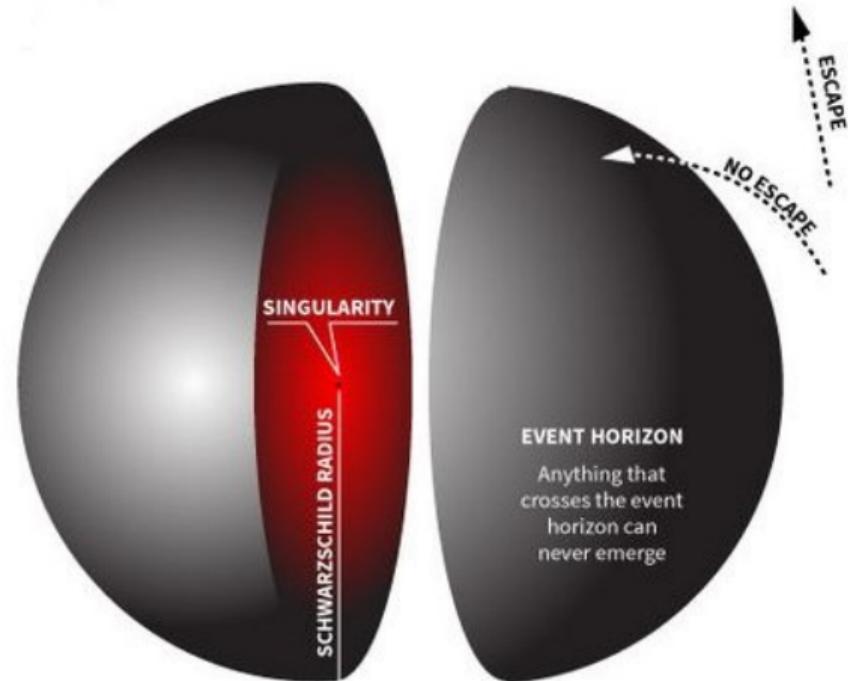


■ Horizonte de sucesos

- Es la frontera de la zona de un agujero negro donde la luz no puede escapar.
- En un agujero negro simple, el horizonte de sucesos es una esfera de radio = al radio de Schwarzschild

■ Singularidad espacio-temporal

- Parte central del agujero negro donde la curvatura del espacio-tiempo es infinita.



¿Preguntas?

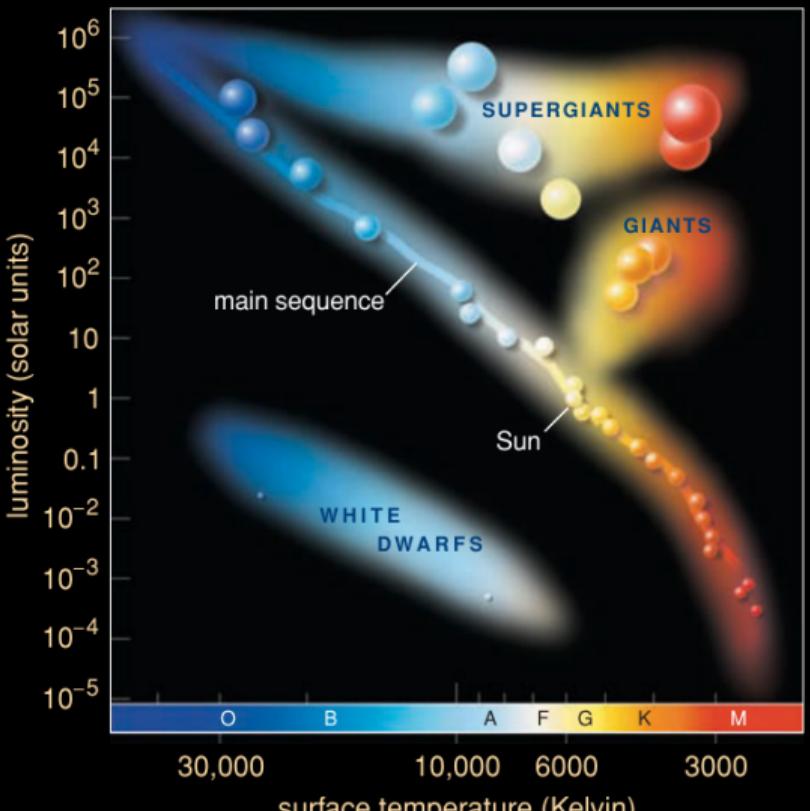
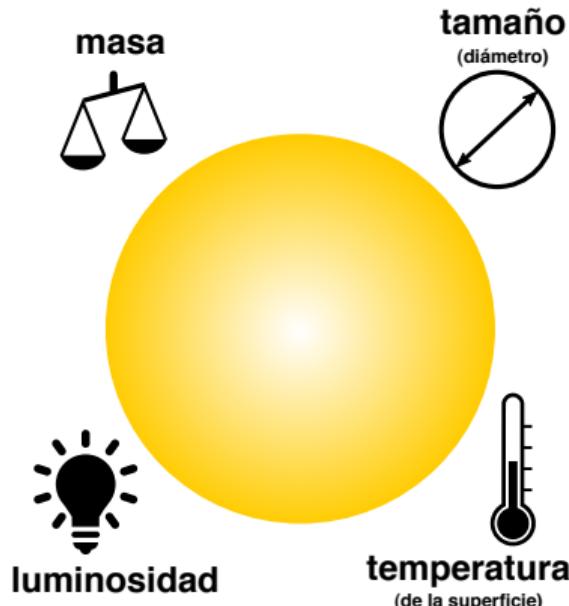


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

3 Las características principales de las estrellas

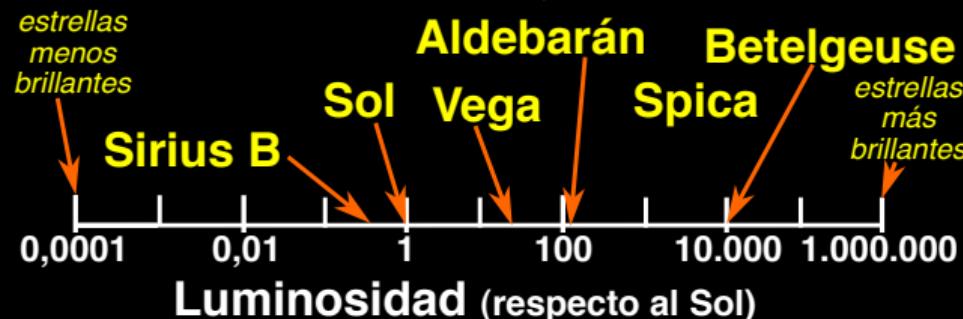
Los parámetro más importantes de las estrellas



- Hay cuatro magnitudes relevantes para toda estrella
 - 1 Luminosidad (\propto Magnitud Absoluta)
 - 2 Tamaño (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

Luminosidad de las estrellas

- Variaciones de **luminosidad** enormes (entre 1/10.000 y 1.000.000 veces el Sol)



- Equivalencia:



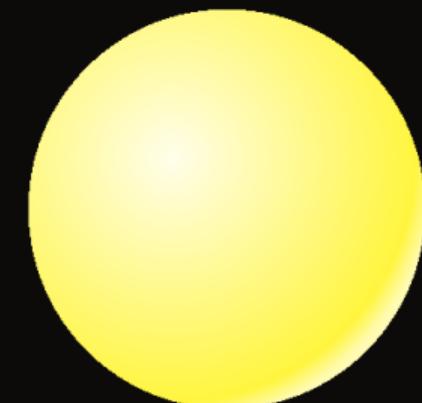
Tamaño de las estrellas

- Variaciones de **diámetro** son grandes (típicamente entre 1/100 y 1000 veces el diámetro del Sol)

Betelgeuse: supergiant star
M2 I, 3800 K, $120,000L_{\text{Sun}}$
950 solar radii

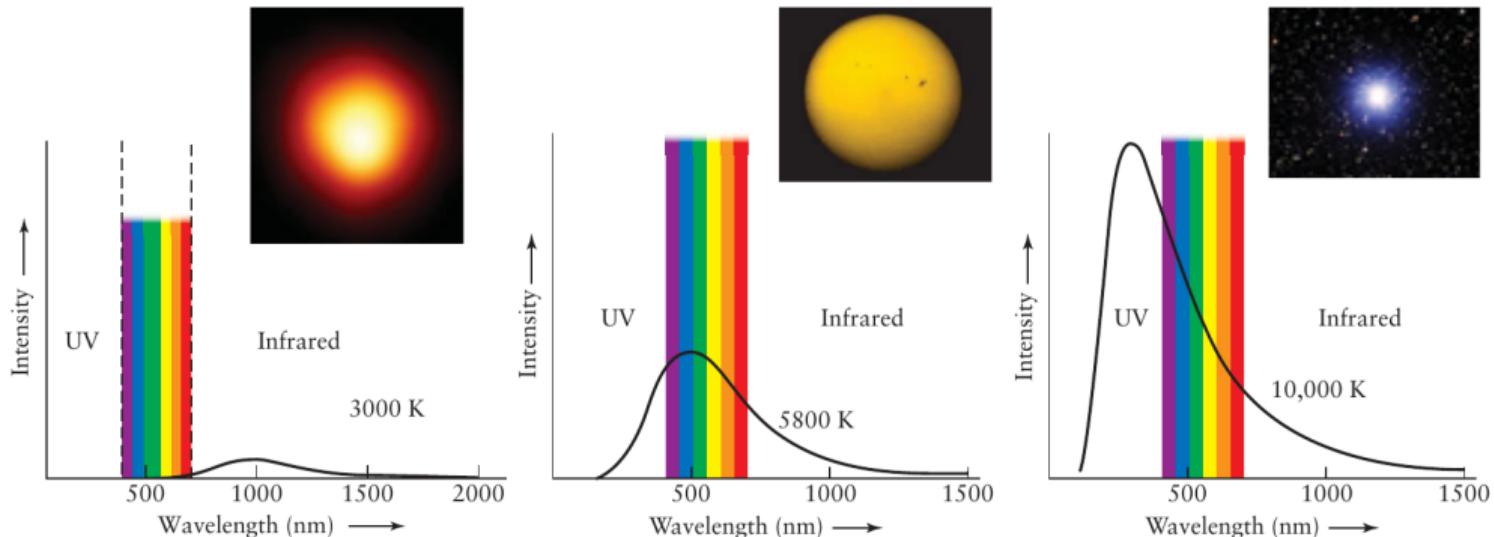
Aldebaran: giant star
K5 III, 4500 K, $350L_{\text{Sun}}$
44 solar radii

Sun: main-sequence star
G2 V, 5800 K, $1L_{\text{Sun}}$
1 solar radius



Procyon B: white dwarf
0.01 solar radius **Earth**
(for comparison)

Temperatura de la superficie de las estrellas: espectro emitido

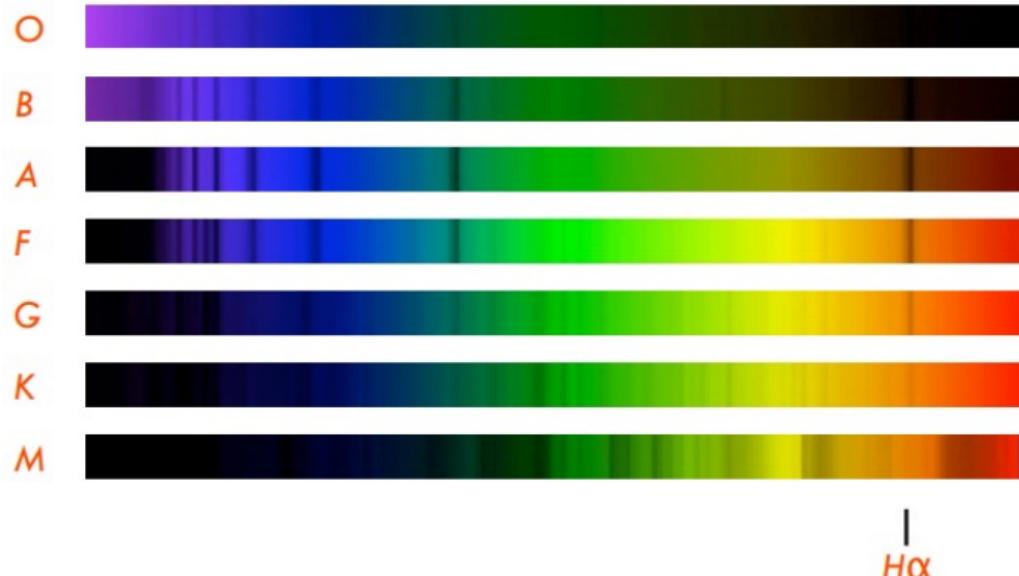


Freedman et al 2011

- La temperatura de la superficie de las estrellas está relacionada con su color
 - Las estrellas más calientes son azules (y emiten la mayor parte de su radiación en el ultra-violeta)
 - Las estrellas más frías son rojas (y emiten la mayor parte de su radiación en el infra-rojo)
- Cuanto más alta la temperatura de una estrella, más radiación emite

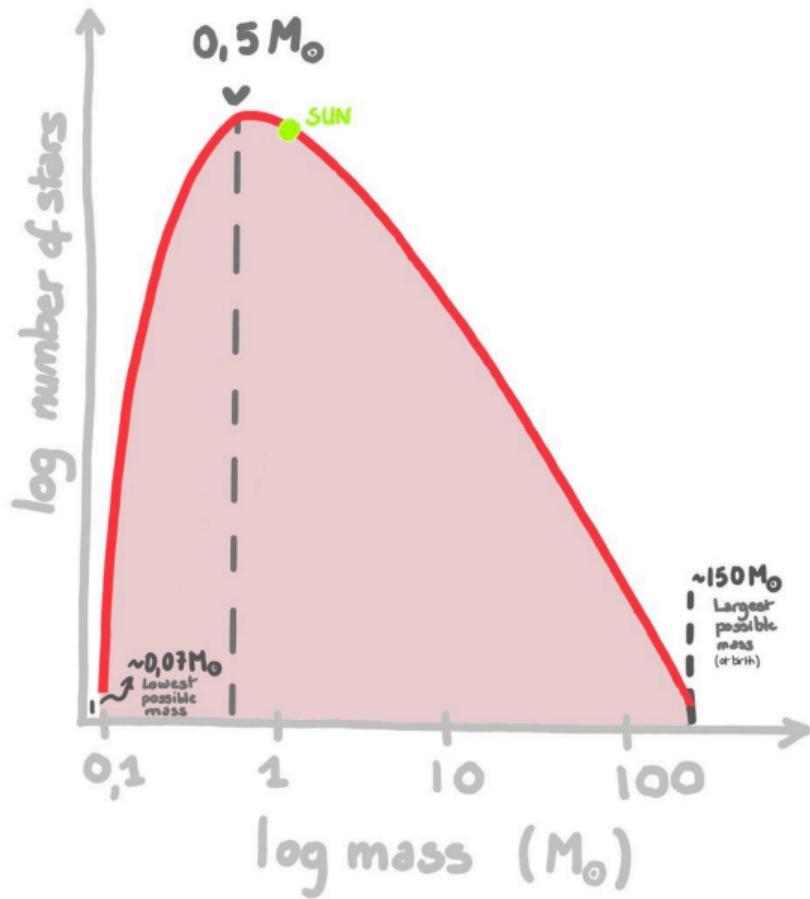
Temperatura de la superficie de las estrellas: clasificación

Spectral Class	Color	Temperature
O	blue	28,000 - 50,000
B	blue-white	9900-28,000
A	white	7400-9900
F	yellow-white	6000-7400
G	yellow	4900-6000
K	orange	3500-4900
M	orange-red	2000-3500



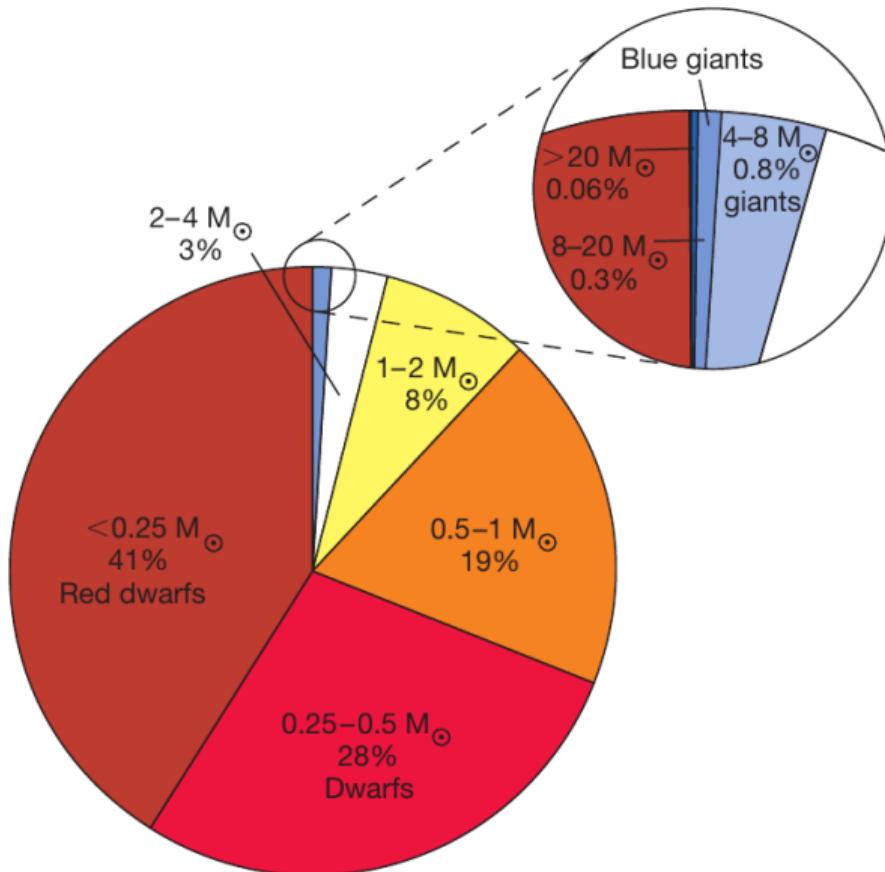
- Variaciones de **temperatura superficial**: entre ~ 2.000 y $\sim 50.000^{\circ}K$
- La temperatura de las estrellas está correlacionada con su color visible
- Reglas mnemónicas:
 - Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me
 - Otros Buenos Astrónomos Fueron: Galileo, Kepler, Messier
 - Recordar que: Galileo (n. 1564), Kepler (n. 1571), Messier (n. 1730)

Masa de las estrellas: de $0.07M_{Sol}$ a $\approx 150M_{Sol}$



- Las estrellas menos masivas tienen $0.07M_{Sol}$ (1/12)
- Las más masivas $\approx 150M_{Sol}$
- Hay muchas más estrellas pequeñas que el Sol que grandes
- La masa de una estrella es aproximadamente constante a lo largo de su vida

Masa de las estrellas: hay pocas estrellas más masivas que el Sol

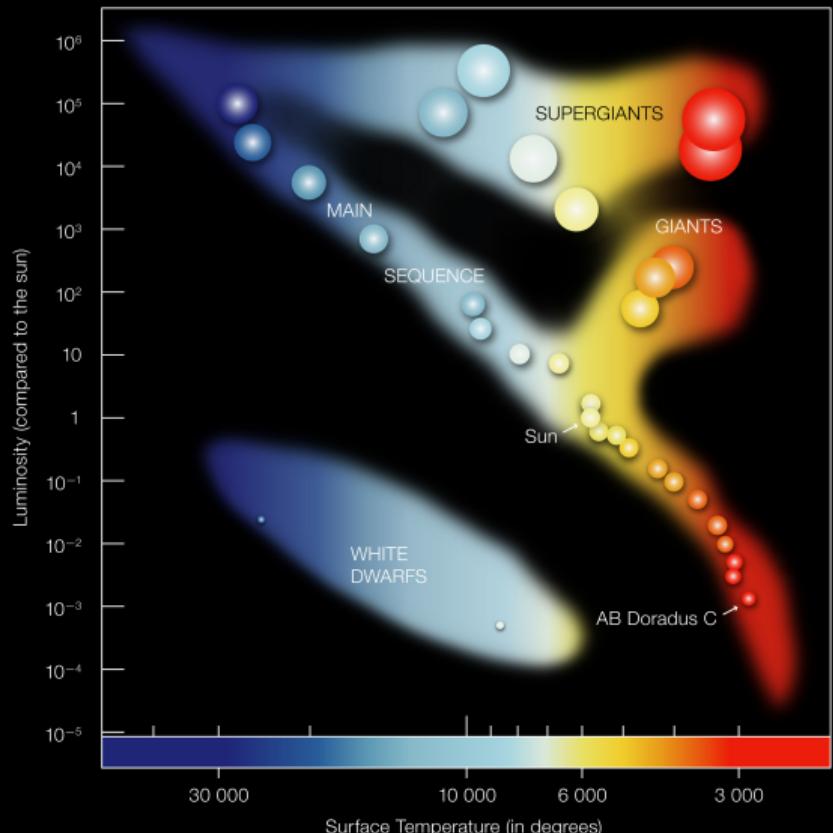


- Hay muchas más estrellas pequeñas que el Sol que grandes
 - Estrellas con menos masa que el Sol: 88%
 - Estrellas con más masa que el Sol: 12%

3 Las características principales de las estrellas

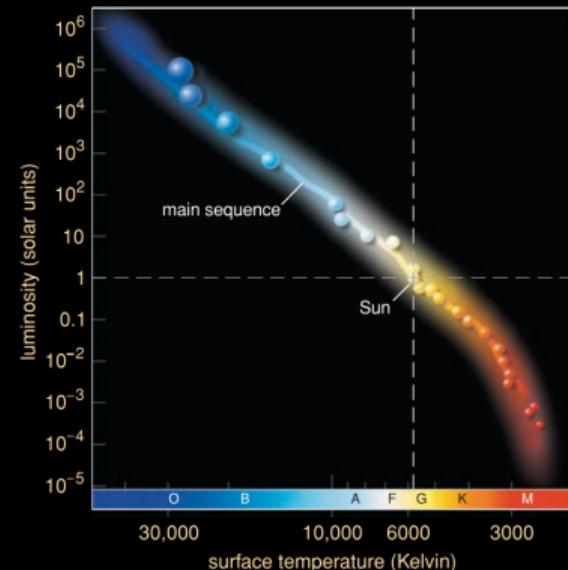
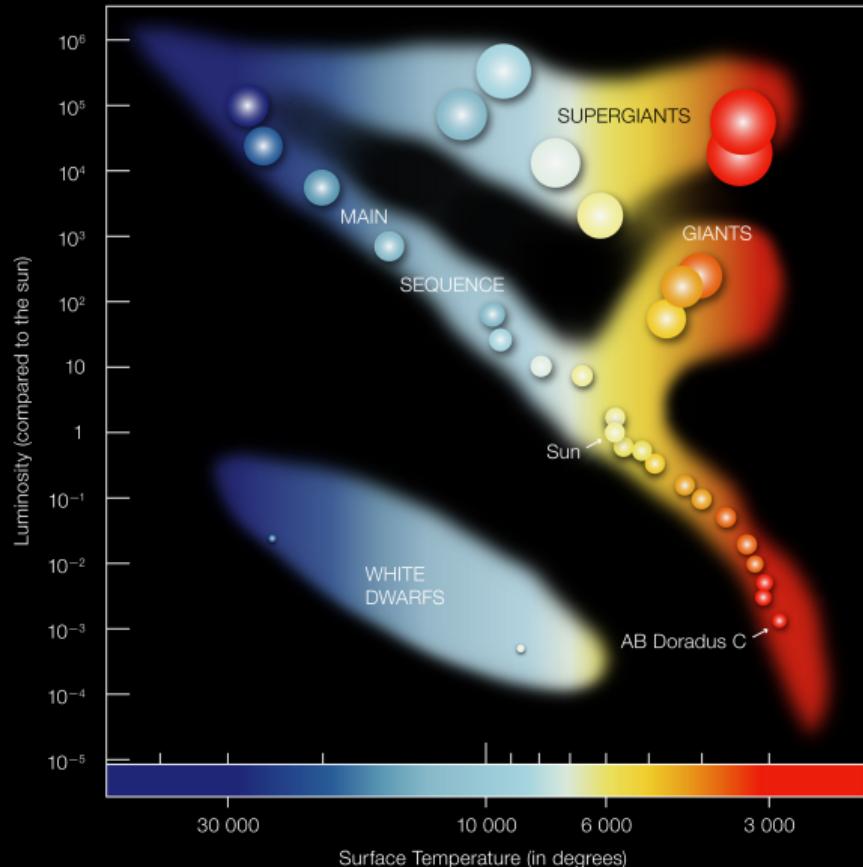
3.1 Diagrama de Hertzsprung-Russell

Diagrama de luminosidad-temperatura o de Hertzsprung-Russell



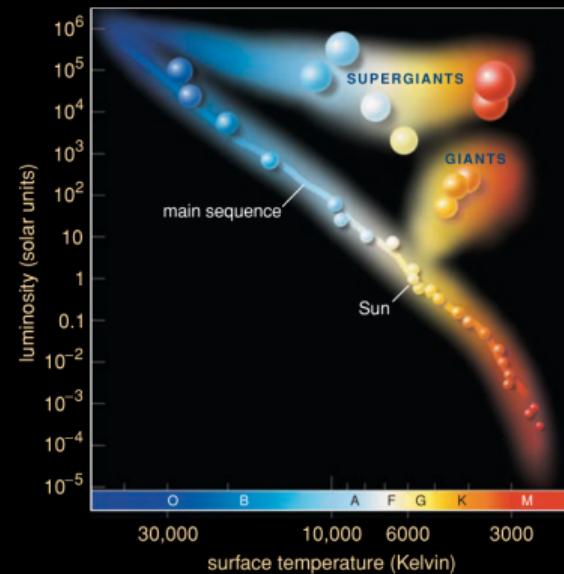
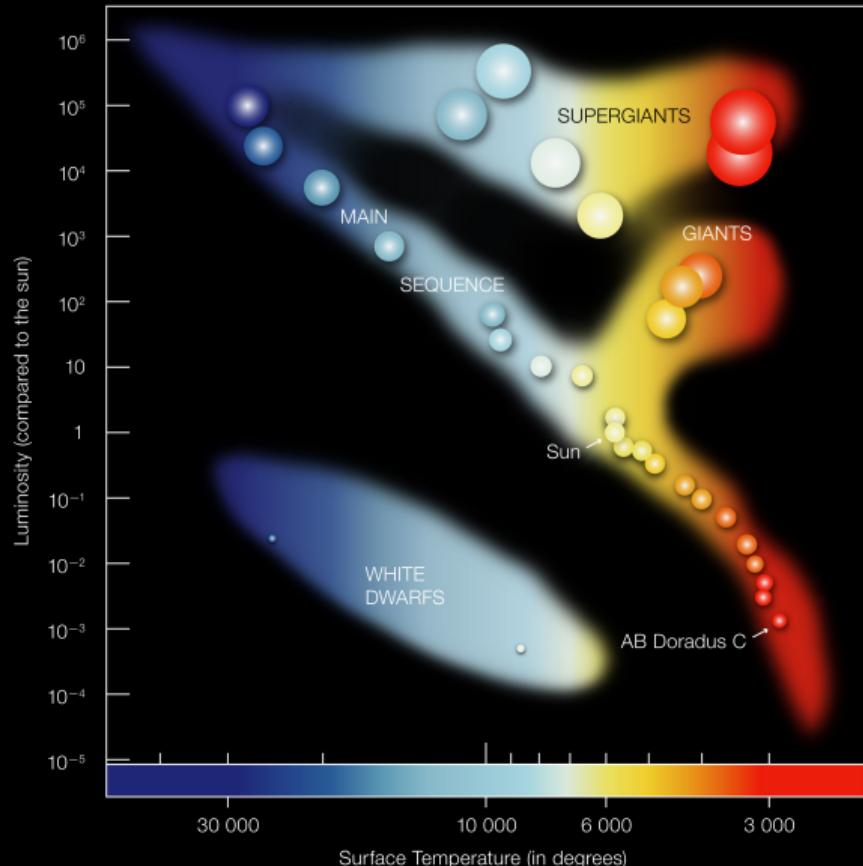
- El diagrama de Hertzsprung-Russell es la "piedra Rosetta" de las estrellas: nos permite analizar de la diversidad de estrellas existentes
- Eje Horizontal: Temperatura de la superficie de la estrella (notar que a la izquierda están las estrellas más calientes).
- Eje Vertical: Luminosidad de la estrella (típicamente indicado de manera comparativa con la luminosidad del Sol)
 - Otras características de las estrellas no incluidas: Diámetro, Masa

Zonas del Diagrama de Hertzsprung-Russell



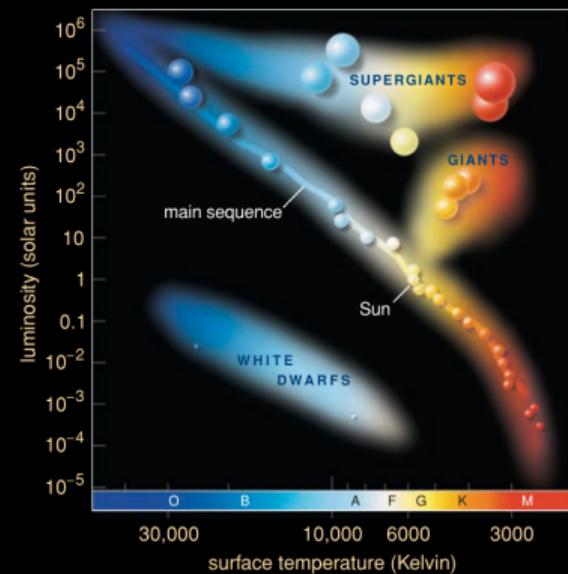
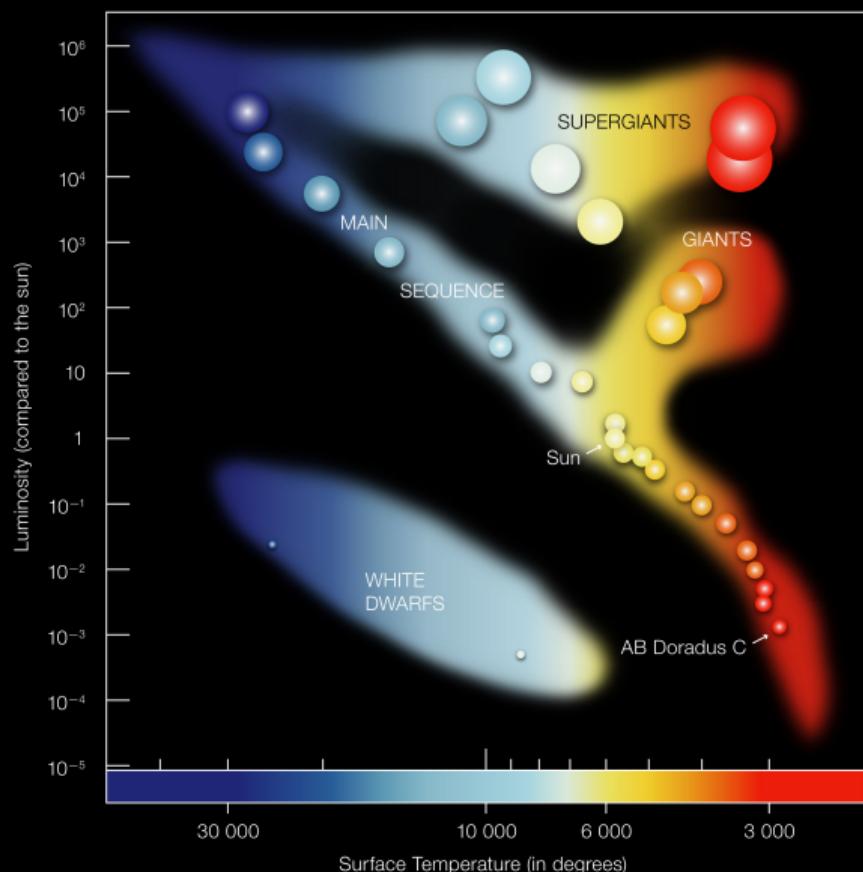
- 1 Secuencia Principal (76%)
- 2 Gigantes & Súper-gigantes (0.6%)
 - 1 Gigantes Rojas
 - 2 Súper-gigantes
- 3 Enanas Blancas (24%)

Zonas del Diagrama de Hertzsprung-Russell



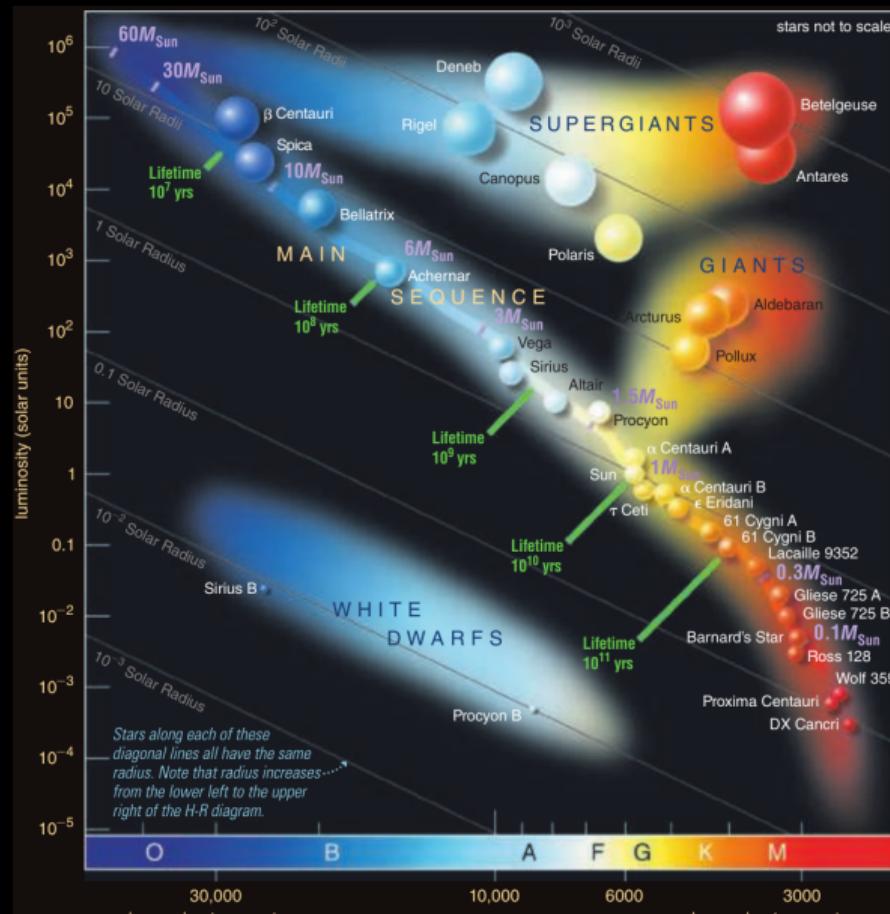
- 1 Secuencia Principal (76%)
- 2 Gigantes & Súper-gigantes (0.6%)
 - 1 Gigantes Rojas
 - 2 Súper-gigantes
- 3 Enanas Blancas (24%)

Zonas del Diagrama de Hertzsprung-Russell



- 1 Secuencia Principal (76%)
- 2 Gigantes & Súper-gigantes (0.6%)
 - 1 Gigantes Rojas
 - 2 Súper-gigantes
- 3 Enanas Blancas (24%)

Algunas estrellas famosas en el diagrama de Hertzsprung-Russell



¿Preguntas?

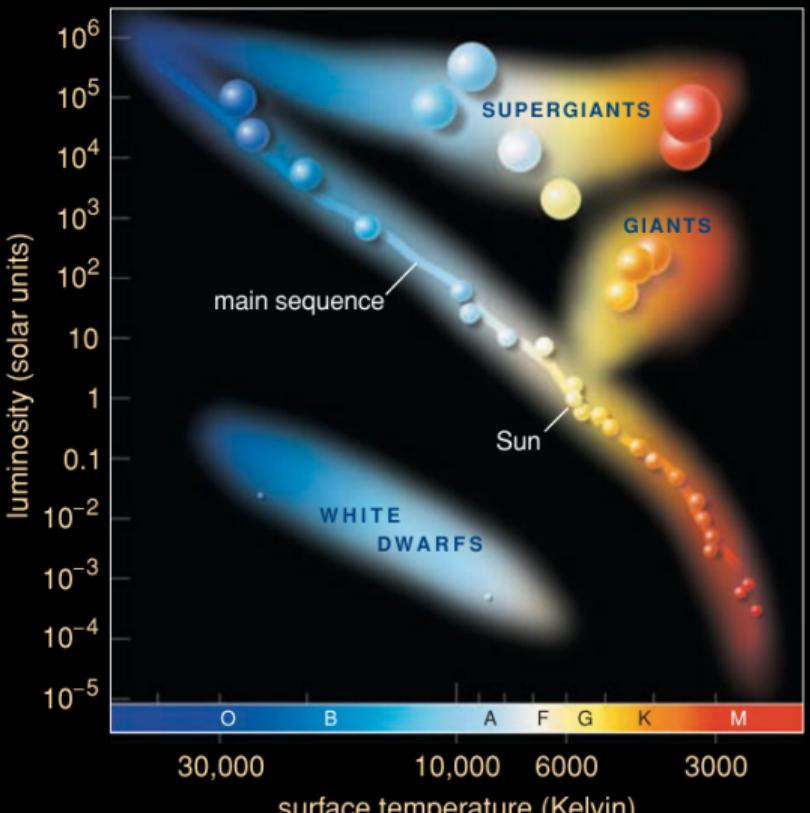
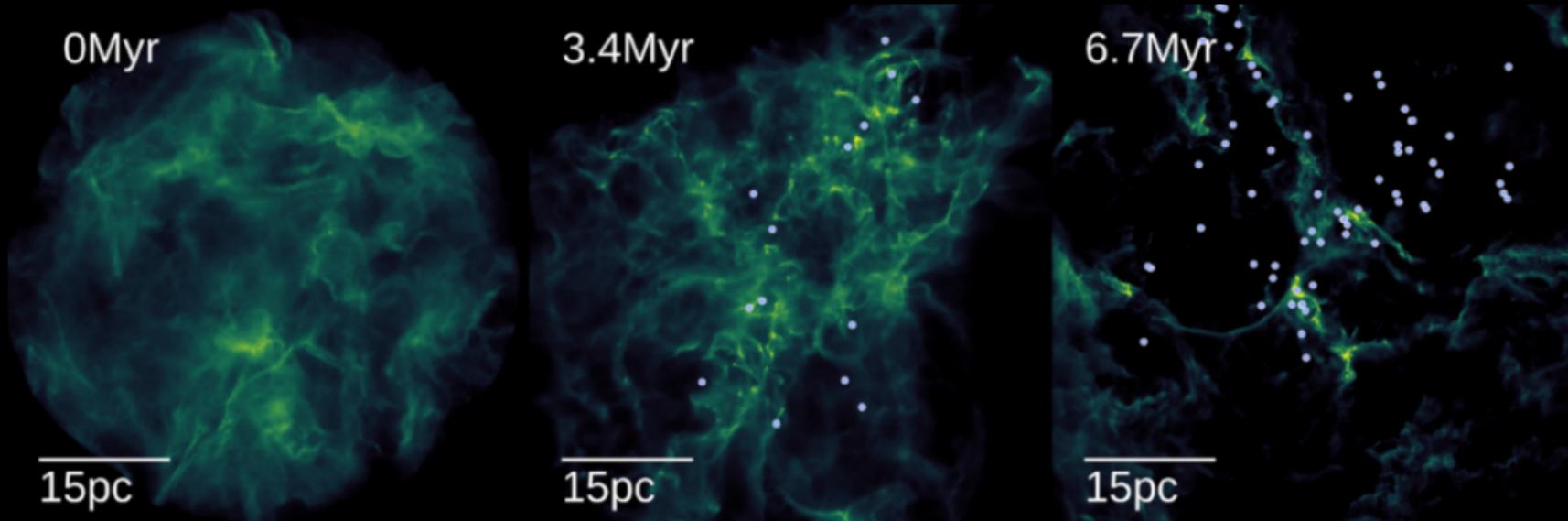


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

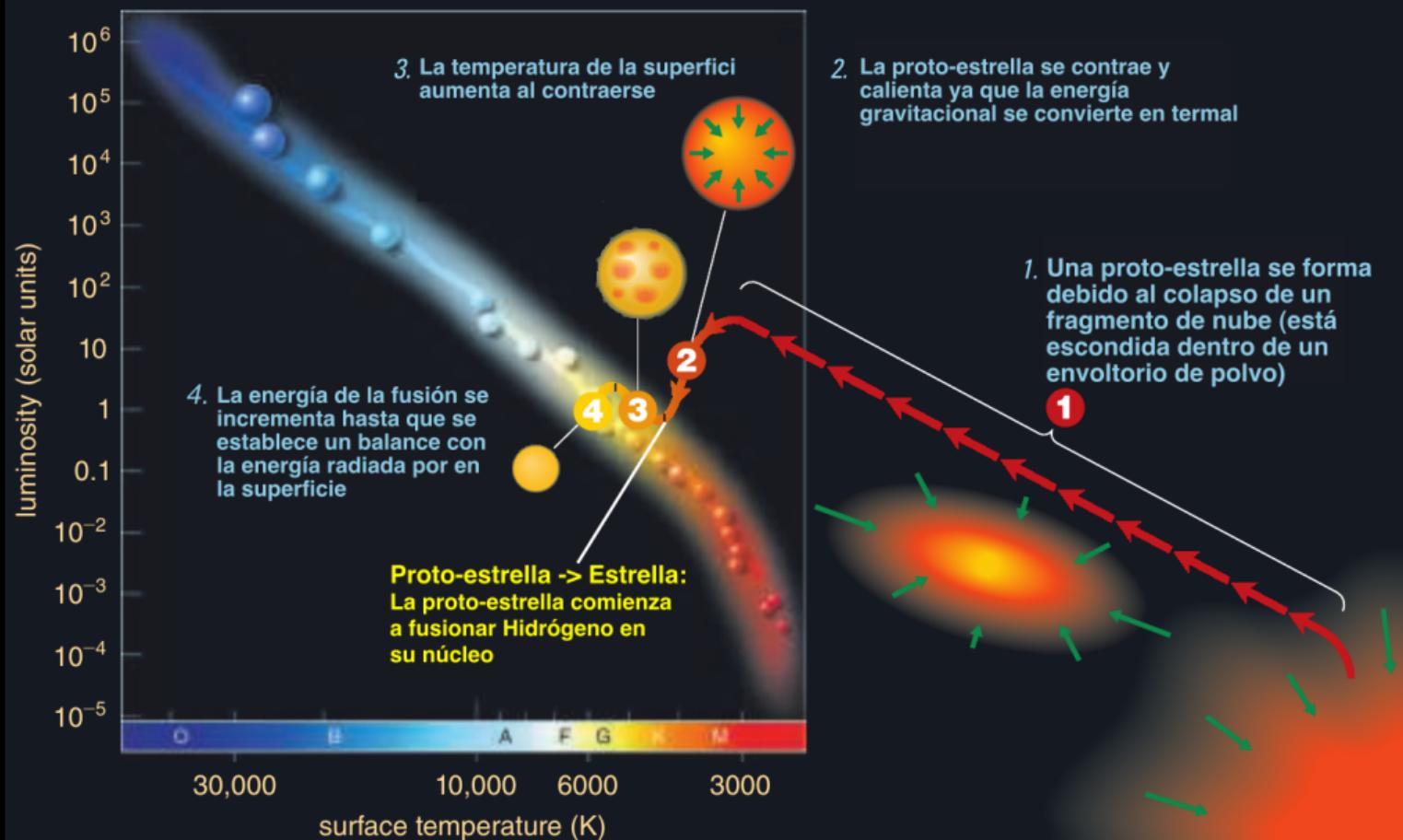
4 Nacimiento de las estrellas

Las estrellas nacen de nubes de gas y polvo

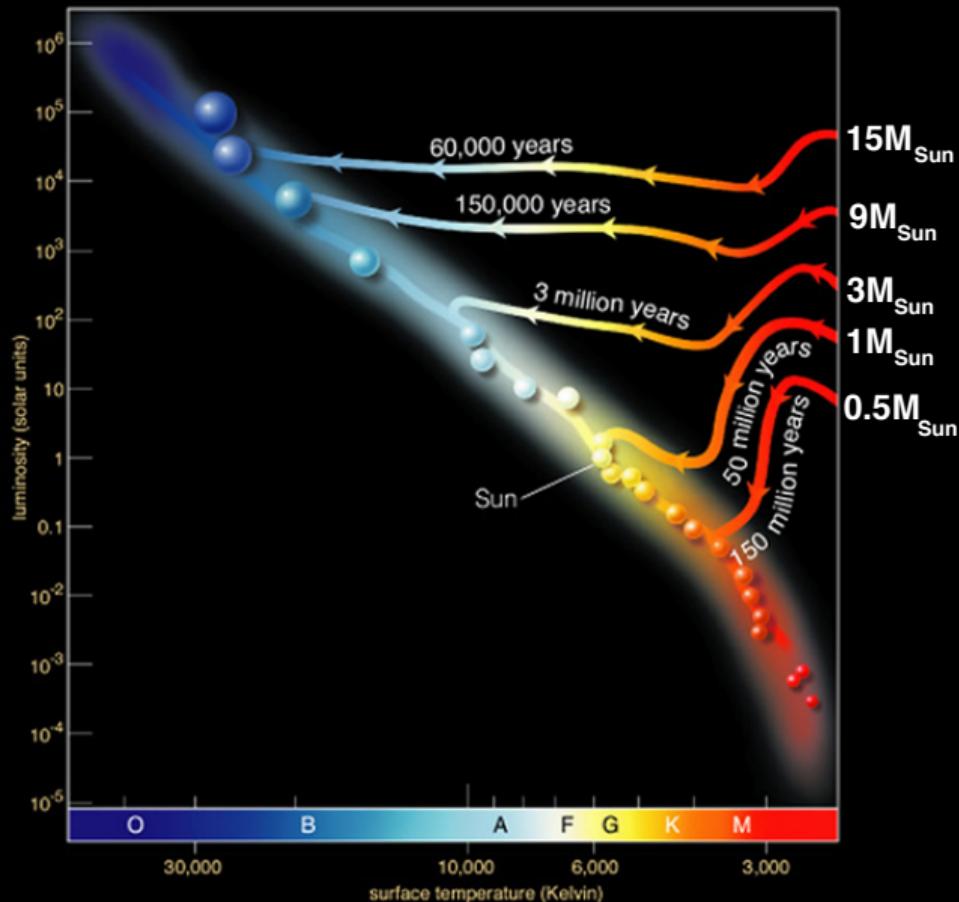


- Las estrellas nacen de grandes nubes de gas y polvo
- De una única nube de gas y polvo pueden nacer cientos o miles de estrellas

La nebulosa que da lugar a una estrella se contrae y calienta

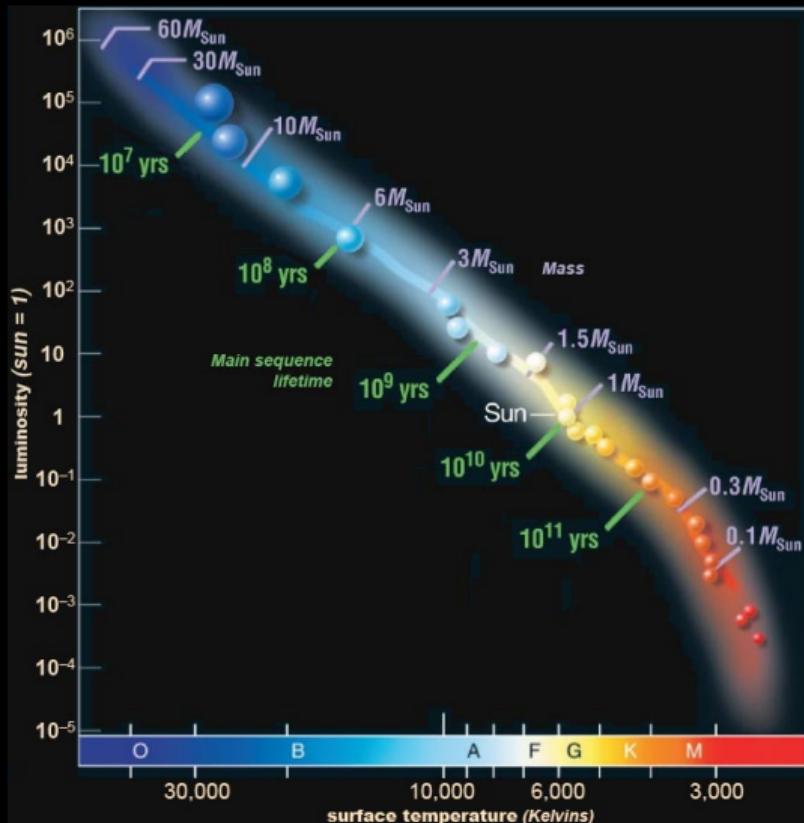


La masa de la estrella determina su lugar en la secuencia principal



- La masa de la estrella determina su lugar en la secuencia principal
- Al acercarse a la secuencia principal la estrella se "enciende": la estrella comienza a producir energía fusionando H en He en su núcleo

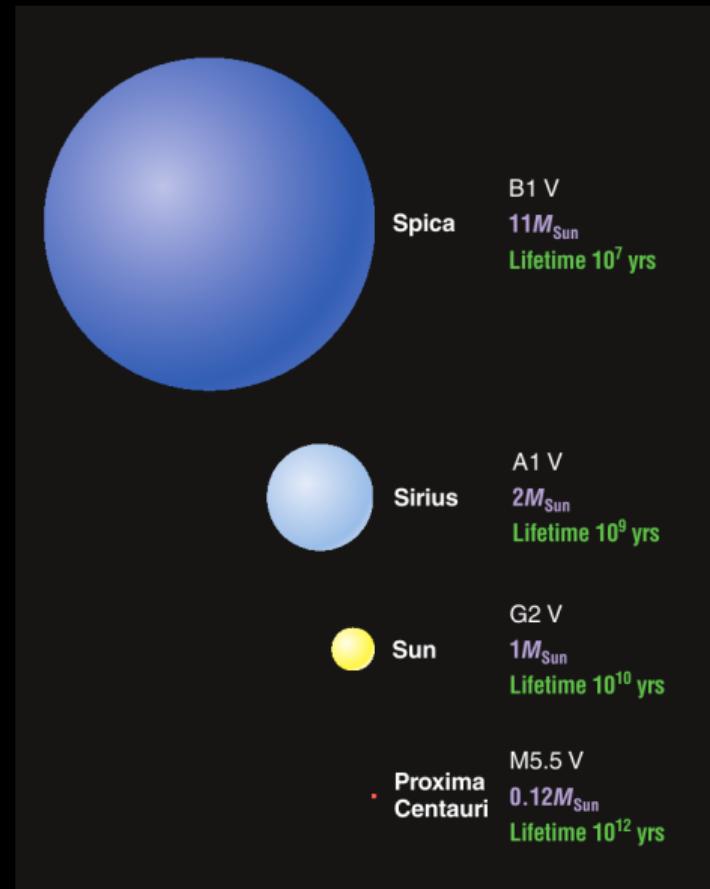
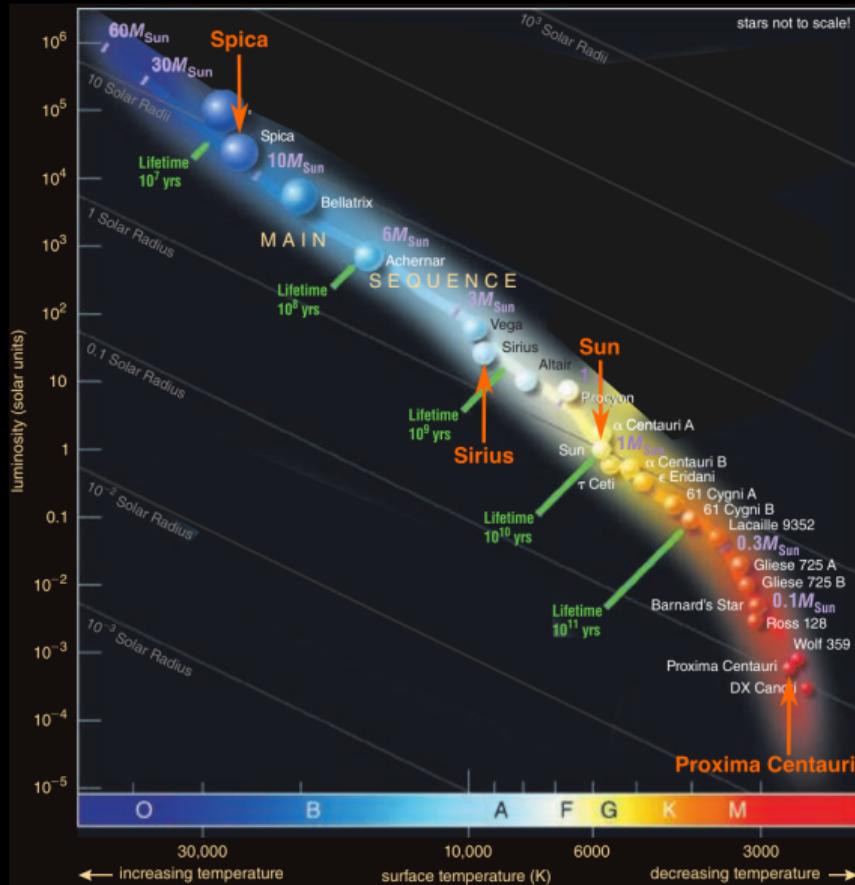
Estrellas pasan la mayor parte de su vida en la Secuencia Principal



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

- En la secuencia principal las estrellas producen energía fusionando hidrógeno en helio en su núcleo

Tamaño de las Estrellas en la Secuencia Principal



¿Preguntas?

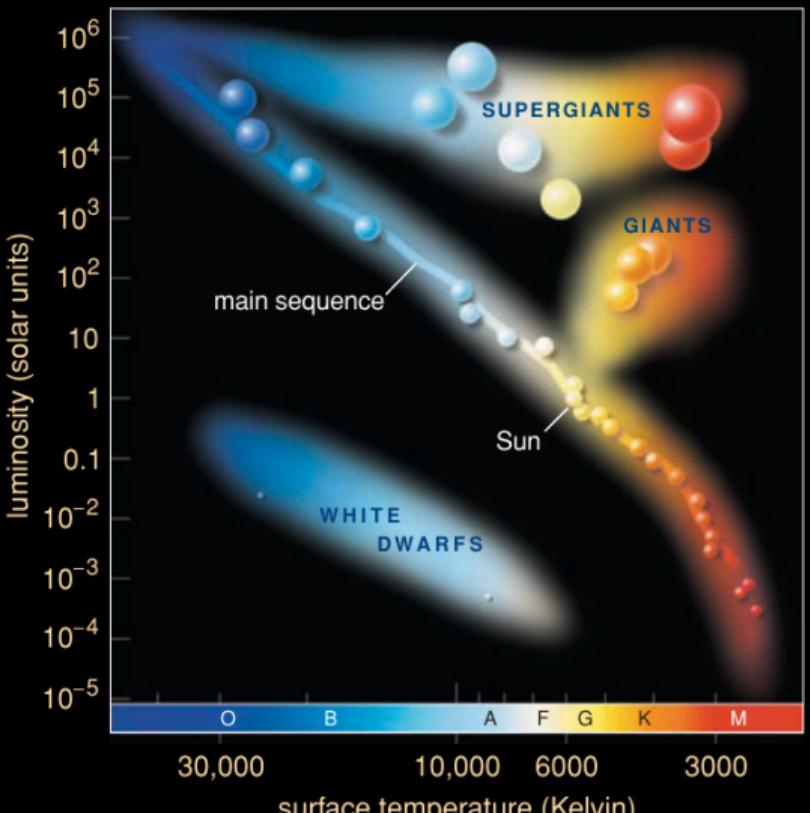
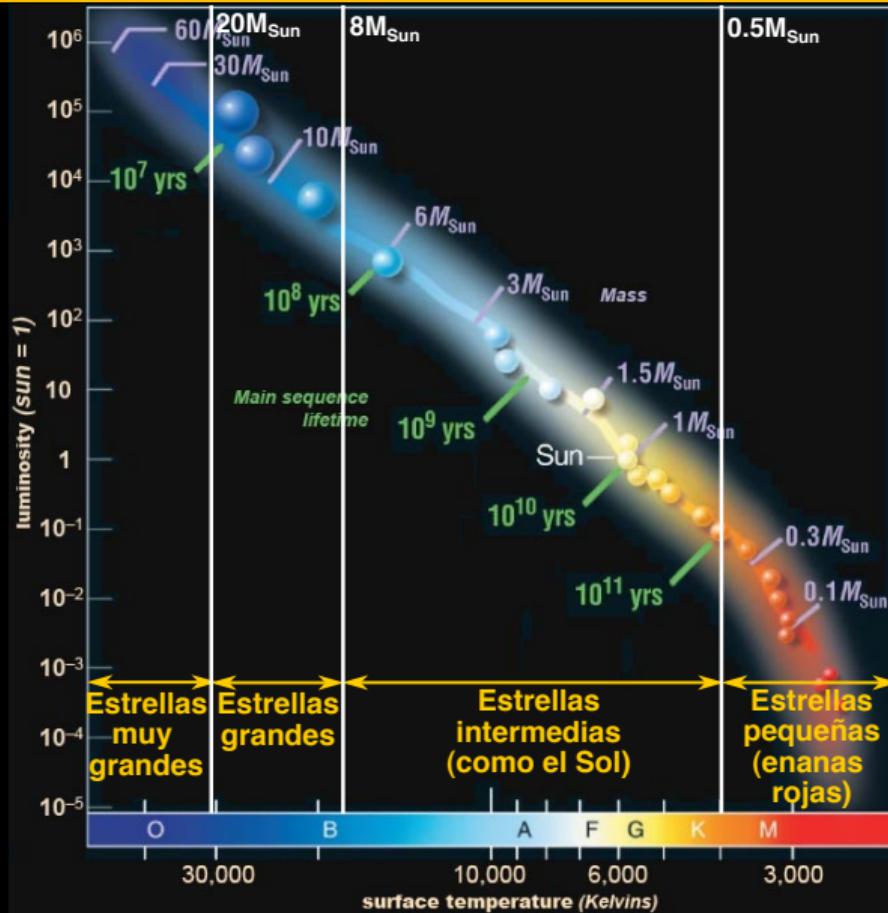


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

5 La vida y muerte de las estrellas

Cuatro tipos distintos de estrellas



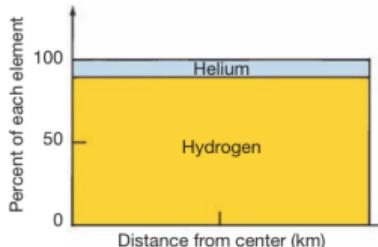
- 1 Estrellas pequeñas
(entre 0.08 y $0.5 M_{\text{Sol}}$)
- 2 Estrellas intermedias
(entre 0.5 y $8 M_{\text{Sol}}$; como el Sol)
- 3 Estrellas grandes
(entre 8 y $20 M_{\text{Sol}}$)
- 4 Estrellas muy grandes
(entre 20 y $150 M_{\text{Sol}}$)

5 La vida y muerte de las estrellas

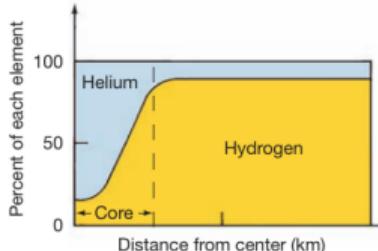
5.1 Estrellas pequeñas

Estrellas pequeñas (entre 0.08 y 0.5 M_{Sol}): enanas rojas

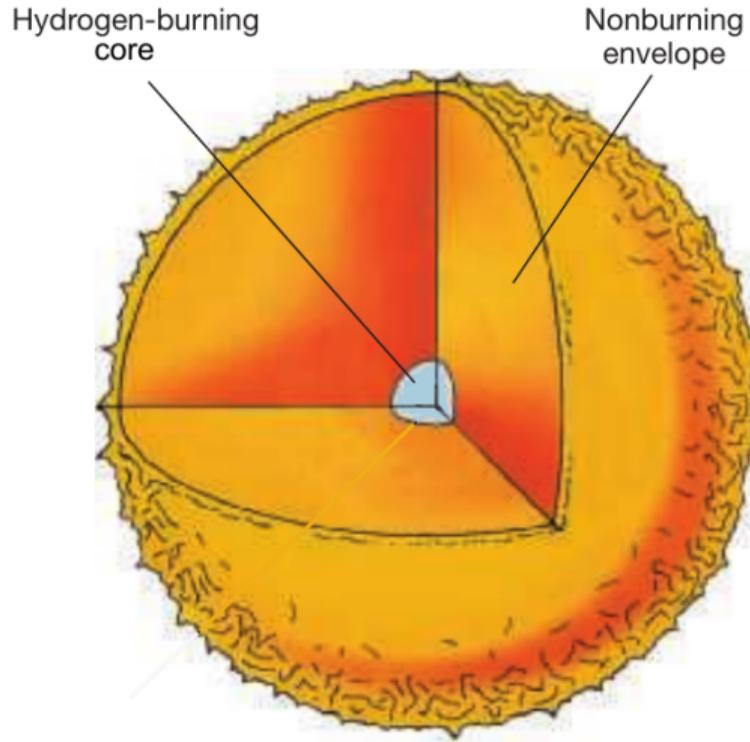
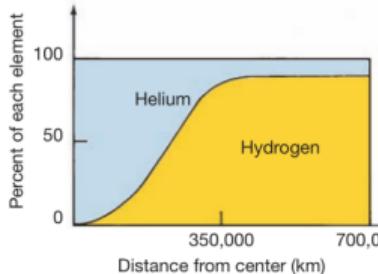
Formación



Edad temprana

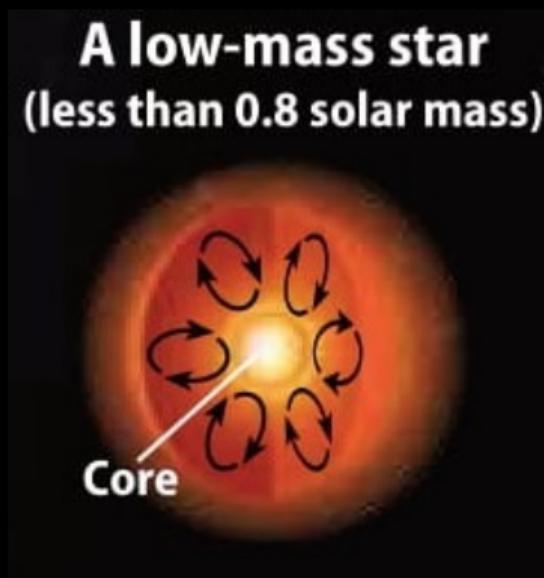
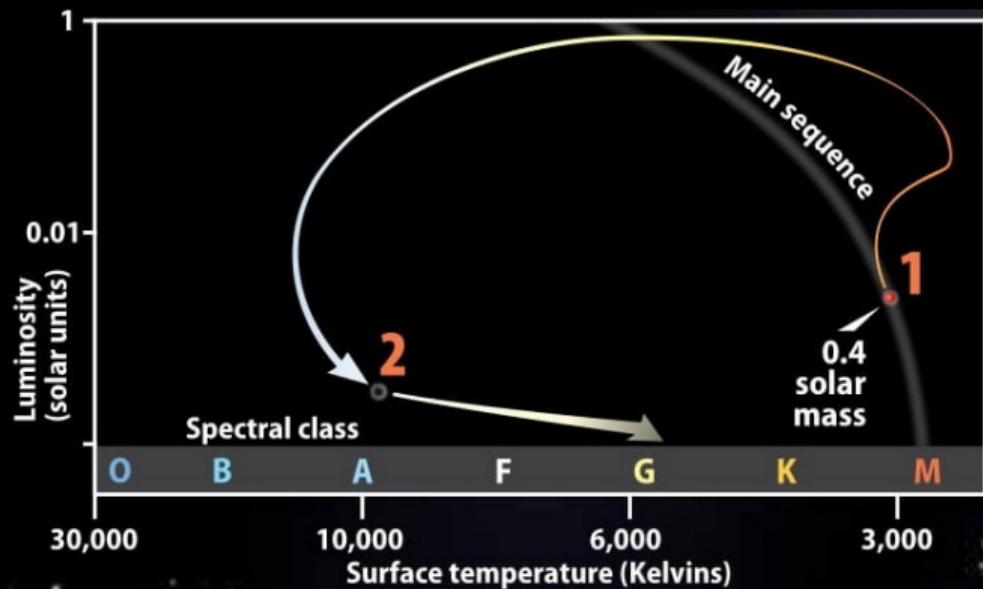


Edad avanzada



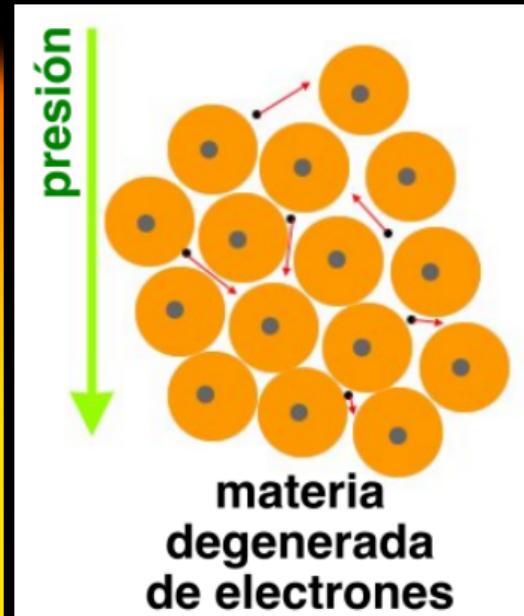
Adaptado de Chaisson & McMillan 2016

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



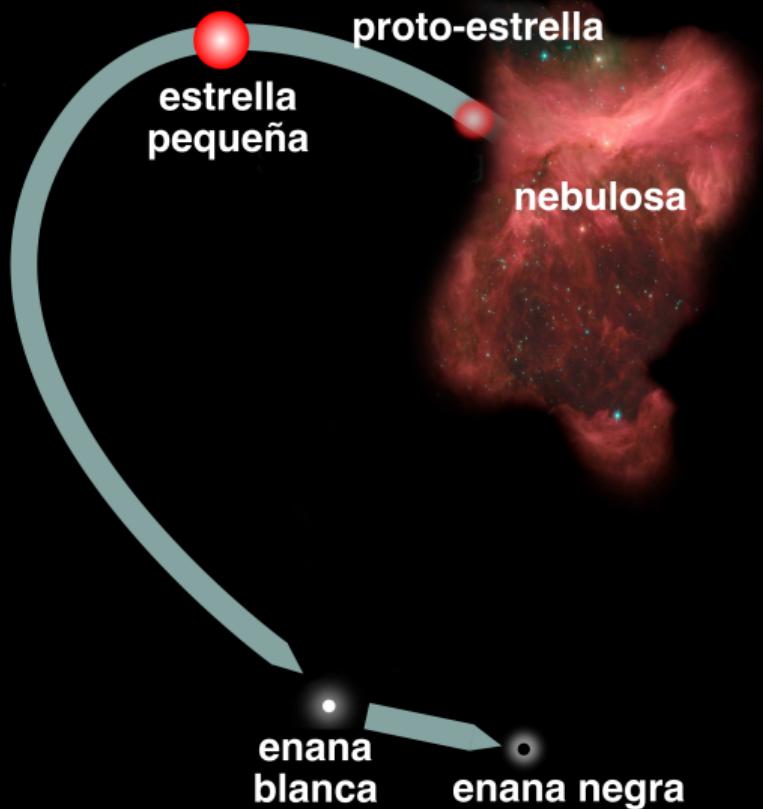
- El núcleo de la estrella nunca alcanza la temperatura necesaria para fusionar He .
- Debido a que la convección mezcla continuamente los componentes de la estrella, prácticamente todo el H de la estrella es convertido en He
- Este tipo de estrellas no llegan a tener una fase de gigante roja

Tamaño y composición de las enanas blancas



- Una estrella pequeña termina su vida en una **enana blanca**
- 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!**

Estrellas pequeñas (entre 0.08 y 0.5 M_{Sol}): enanas rojas



- Las estrellas pequeñas (entre 0.08 y 0.5 M_{Sol} ; llamadas **enanas rojas**) tiene **vidas extremadamente largas** (muchos miles de millones de años)
- Estas estrellas **solo fusionan hidrógeno en helio** (nunca alcanzan temperaturas en su núcleo suficientes como para fusionar helio en carbono).
- Al final de su vida la estrella deja de producir energía y se contrae formando una **enana blanca** que se enfriá lentamente hasta dar lugar a una enana negra

¿Preguntas?

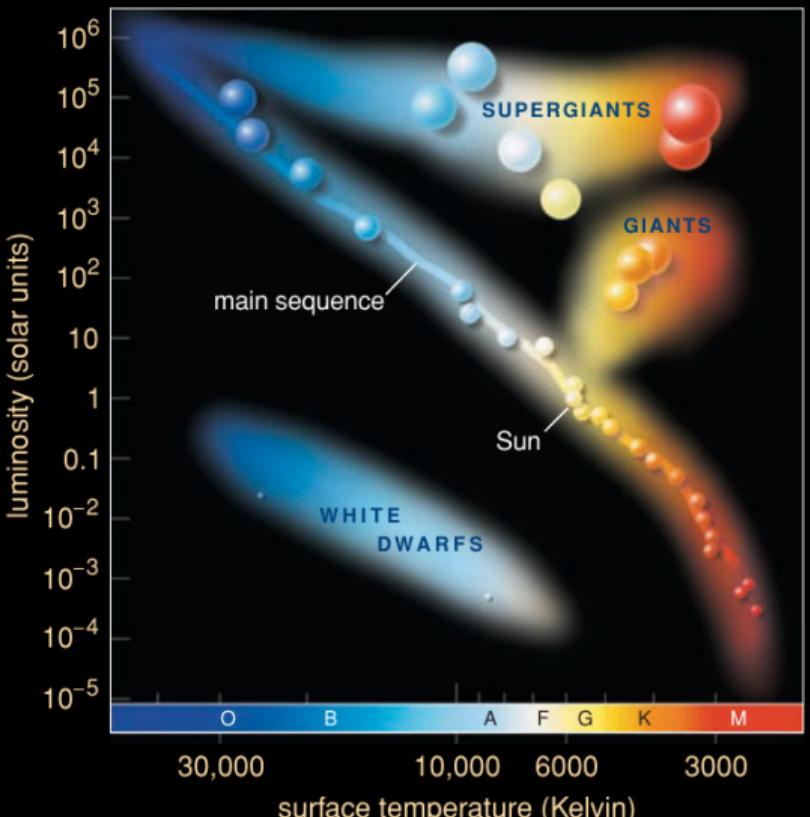


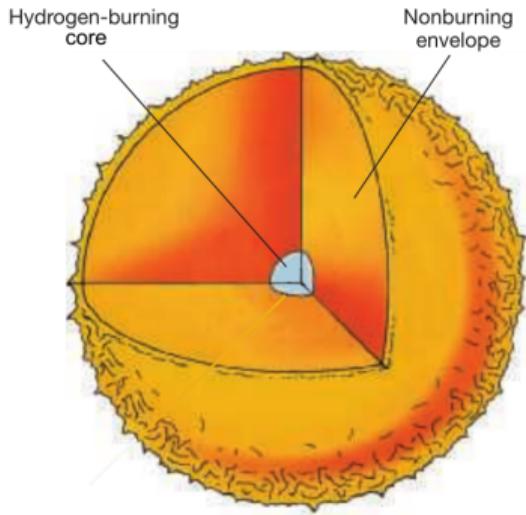
Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

5 La vida y muerte de las estrellas

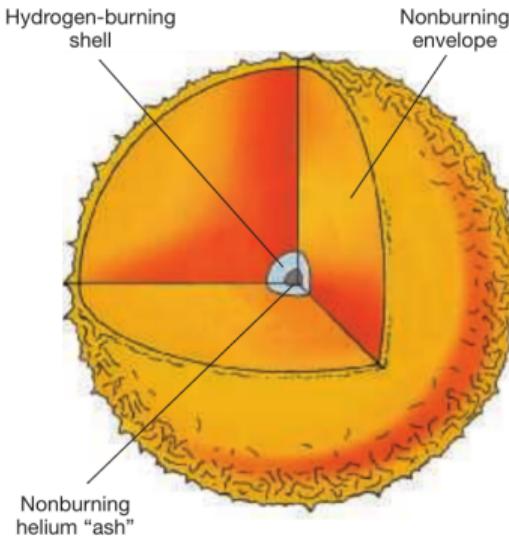
5.2 Estrellas intermedias

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

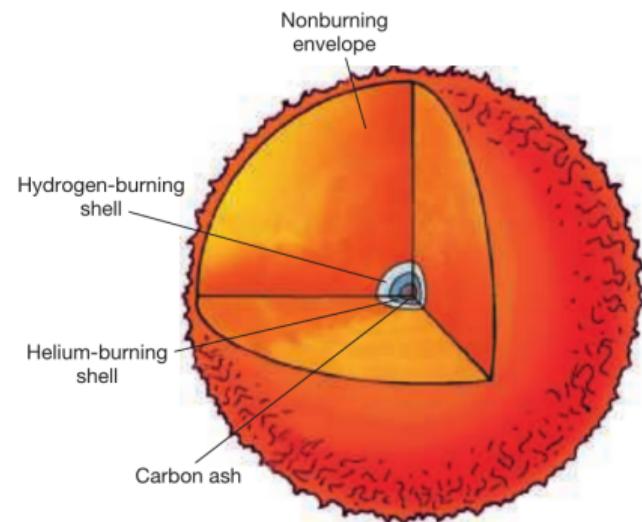
- Las estrellas intermedias tienen **vidas largas** (miles de millones de años)
- Después de una etapa inicial en la cual solo fusiona hidrógeno, estas estrellas pasan por otra etapa en la que **fusionan helio en carbono**.
- Estas estrellas pasan por dos etapas de gigante roja



En la secuencia principal



1ra fase de gigante roja

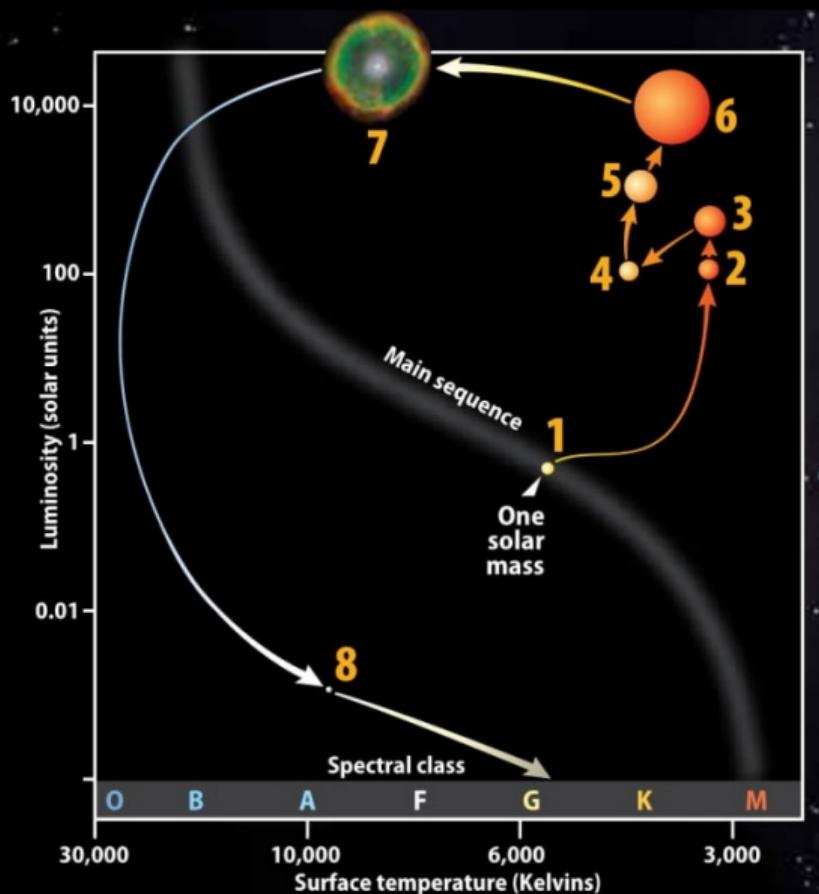


2da fase de gigante roja

El tamaño de las estrellas no está a escala

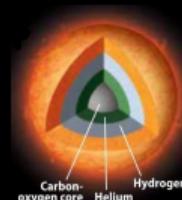
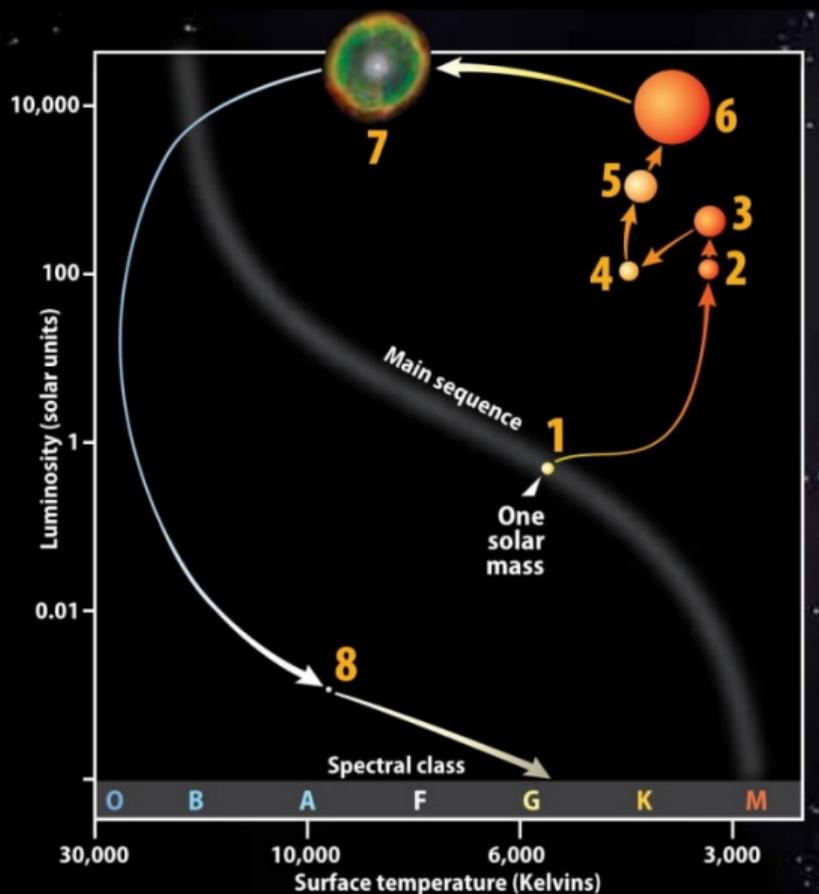
Adaptado de Chaisson & McMillan 2016

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



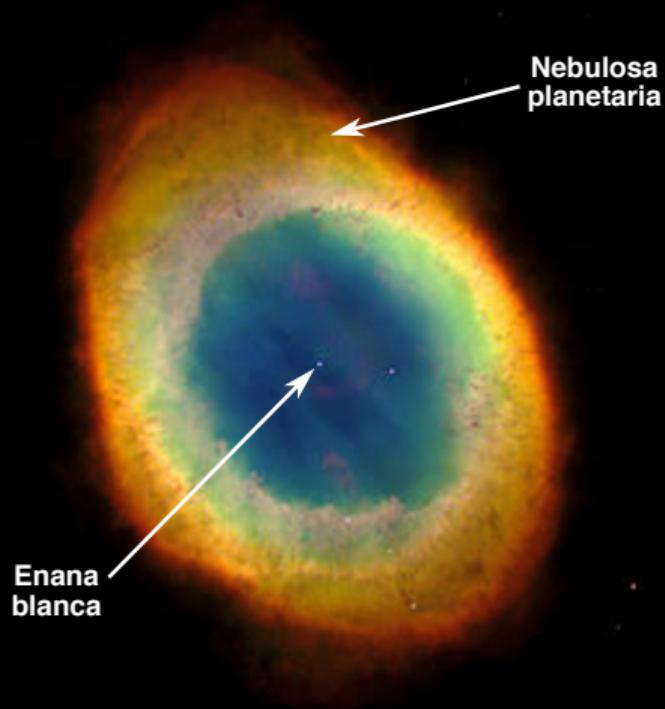
- Un ejemplo de estrella amarilla es el Sol
- El núcleo de la estrella puede fusionar: $H \rightarrow He$ y $He \rightarrow C$
- Nunca alcanza temperaturas suficientemente altas como para fusionar C o elementos más pesados.
- Estadios:
 - 1-3: Fusión $H \rightarrow He$ en el núcleo
 - 2-3 Primera etapa de gigante roja
 - 3-6: Fusión $He \rightarrow C$ en la parte más interna del núcleo y $H \rightarrow He$ en la parte más externa
 - 4-6 Segunda etapa de gigante roja
 - 6-7: Deja de fusionar átomos; explusa su capa más externa.

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



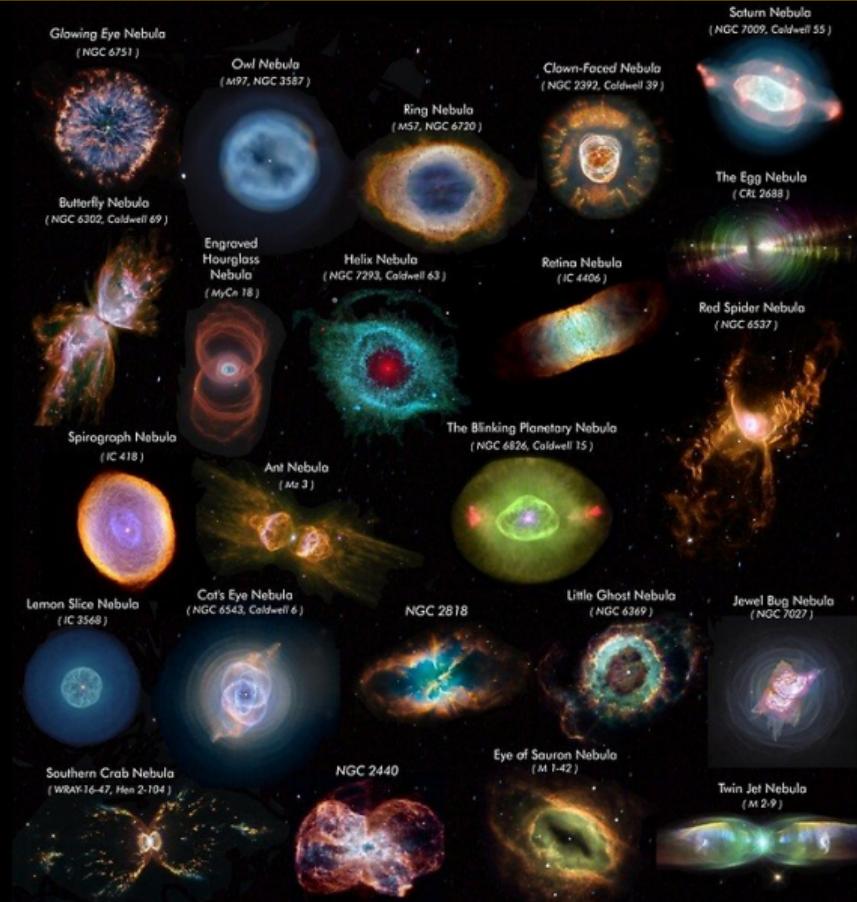
- Solo una pequeña parte del Hidrógeno disponible puede ser fusionado
- Estas estrellas pasan por dos etapas de gigante roja
- Terminan su vida expulsando parte de sus capas exteriores generando una nebulosa planetaria
- El estadio final es una enana blanca (que se convierte en una enana negra)
- La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

Producto final de la evolución: nebulosa planetaria

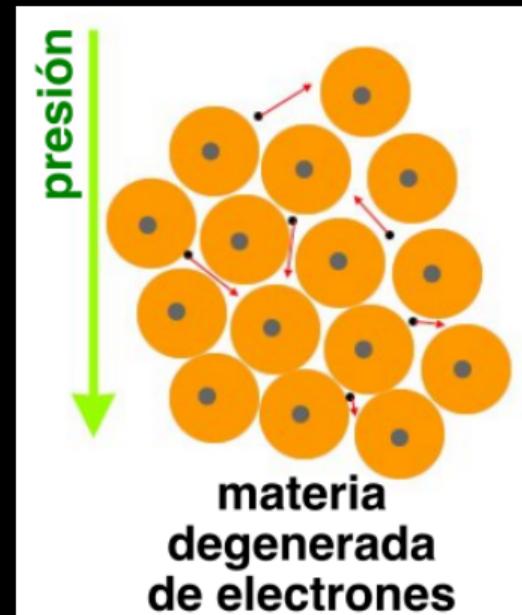


- Las capas exteriores de la estrella son eyectadas formando una nube que rodea la enana blanca que contiene las partes más interiores de la estrella
- Las partes eyectadas aumentan su tamaño con el tiempo
- Las nebulosas planetarias (o de eyección) solo duran unos pocos miles de años

Producto final de la evolución: nebulosa planetaria

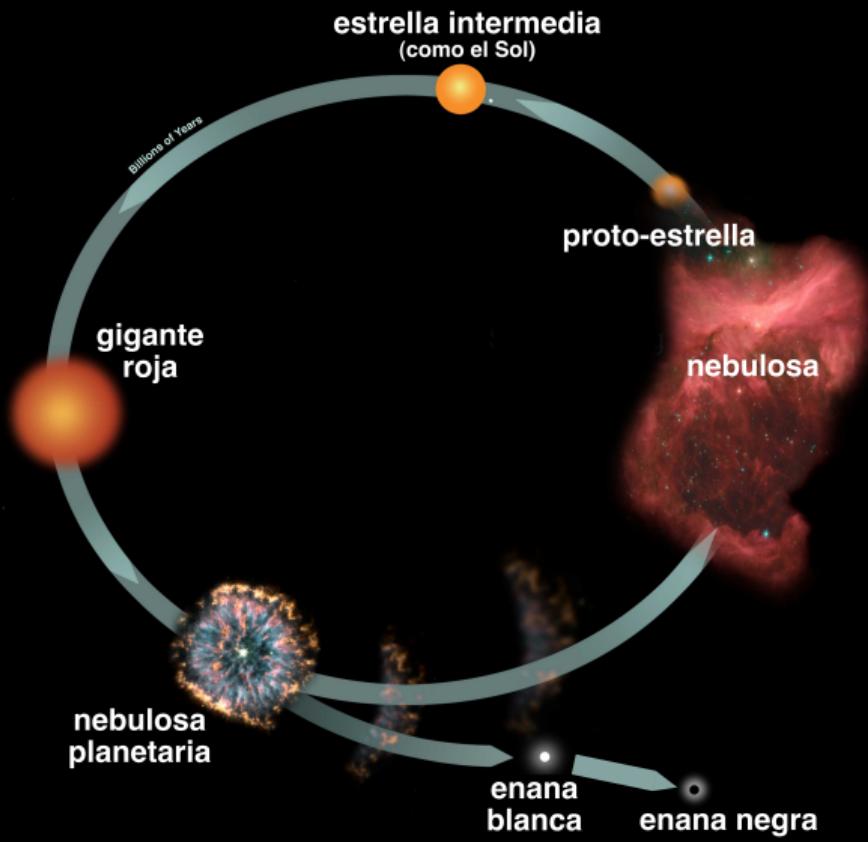


Producto final de la evolución: enana blanca



- La vida de la estrella intermedia termina en una **enana blanca**
- 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!**

Estrellas intermedias (entre 0.5 y 8 M_{Sol} ; estrellas como el Sol)



- Las estrellas intermedias tienen **vidas largas** (miles de millones de años)
- Después de una etapa inicial en la cual solo fusiona hidrógeno, estas estrellas pasan por otra etapa en la que **fusionan helio en carbono**.
- Hacia el final de su vida la estrella se enfria y hace más grande formando una **gigante roja**
- La gigante roja termina su vida explusando sus capas exteriores: **nebulosa planetaria**
- El resto de la estrella se comprime para formar una **enana blanca**.

¿Preguntas?

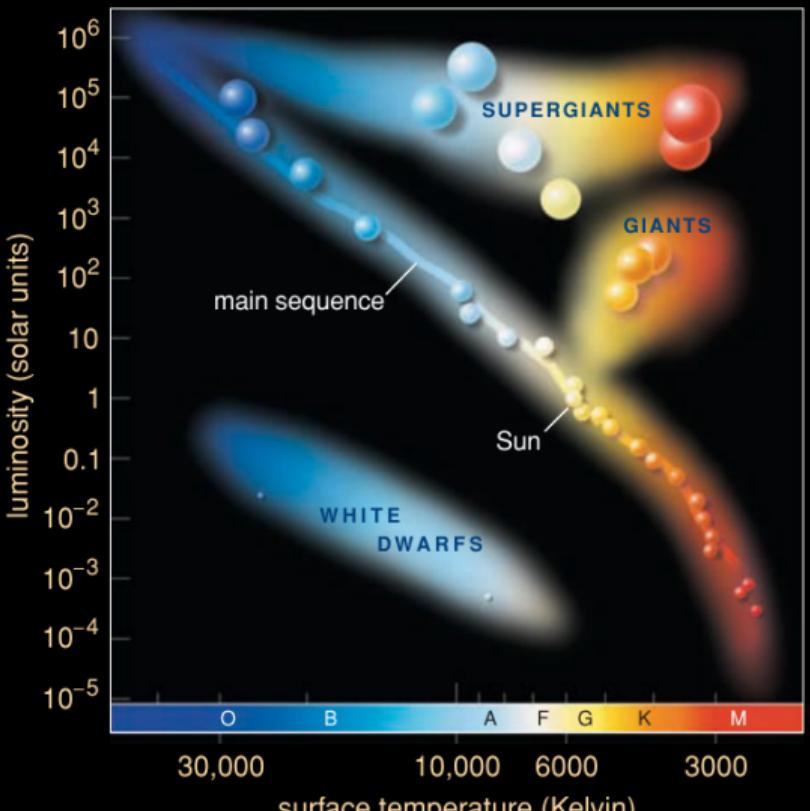
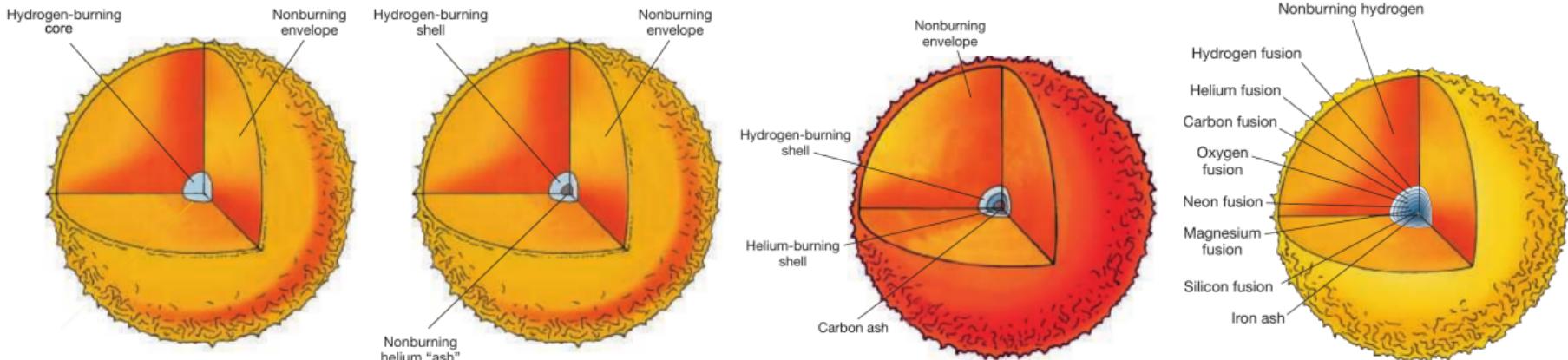


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

5 La vida y muerte de las estrellas

5.3 Estrellas grandes y muy grandes

Estrellas grandes y muy grandes (entre 8 y 150 M_{Sol})



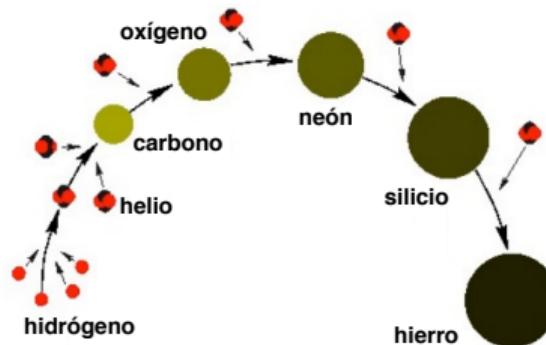
En la secuencia principal

El tamaño de las estrellas no está a escala

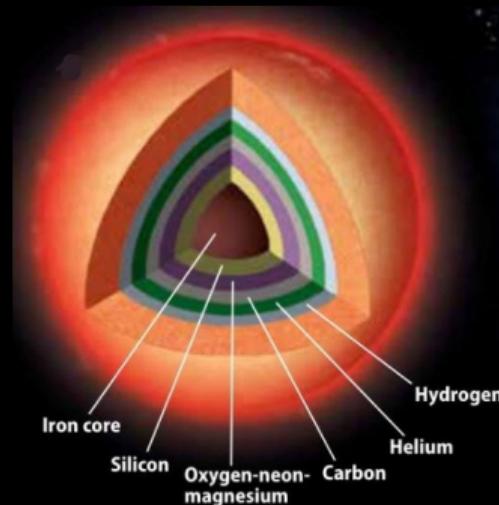
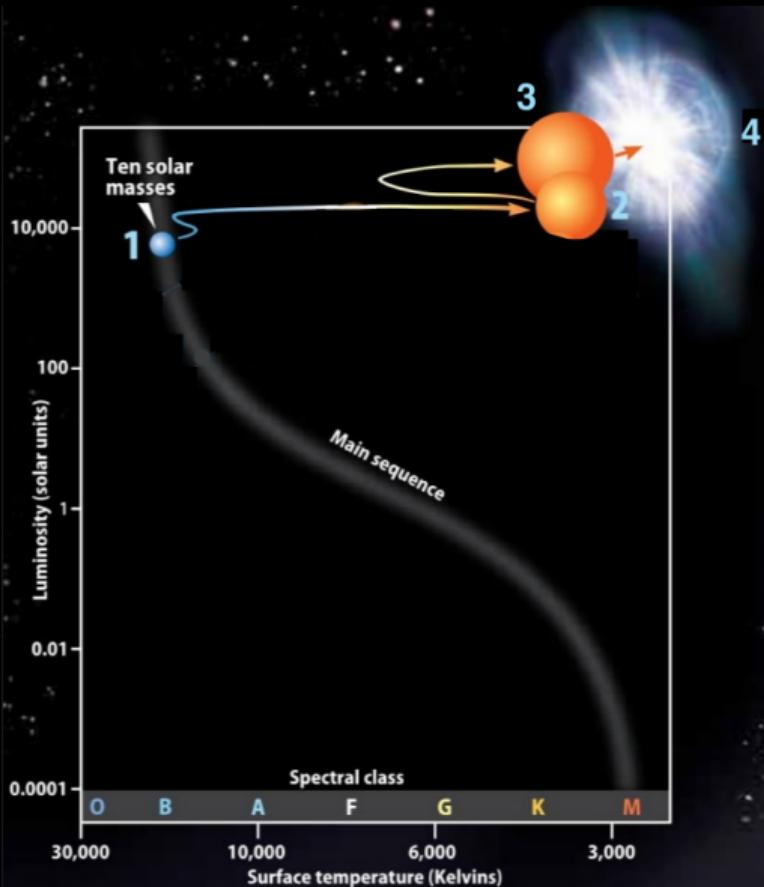
1ra fase de gigante roja

Siguientes fases de gigante roja

Adaptado de Chaisson & McMillan 2016

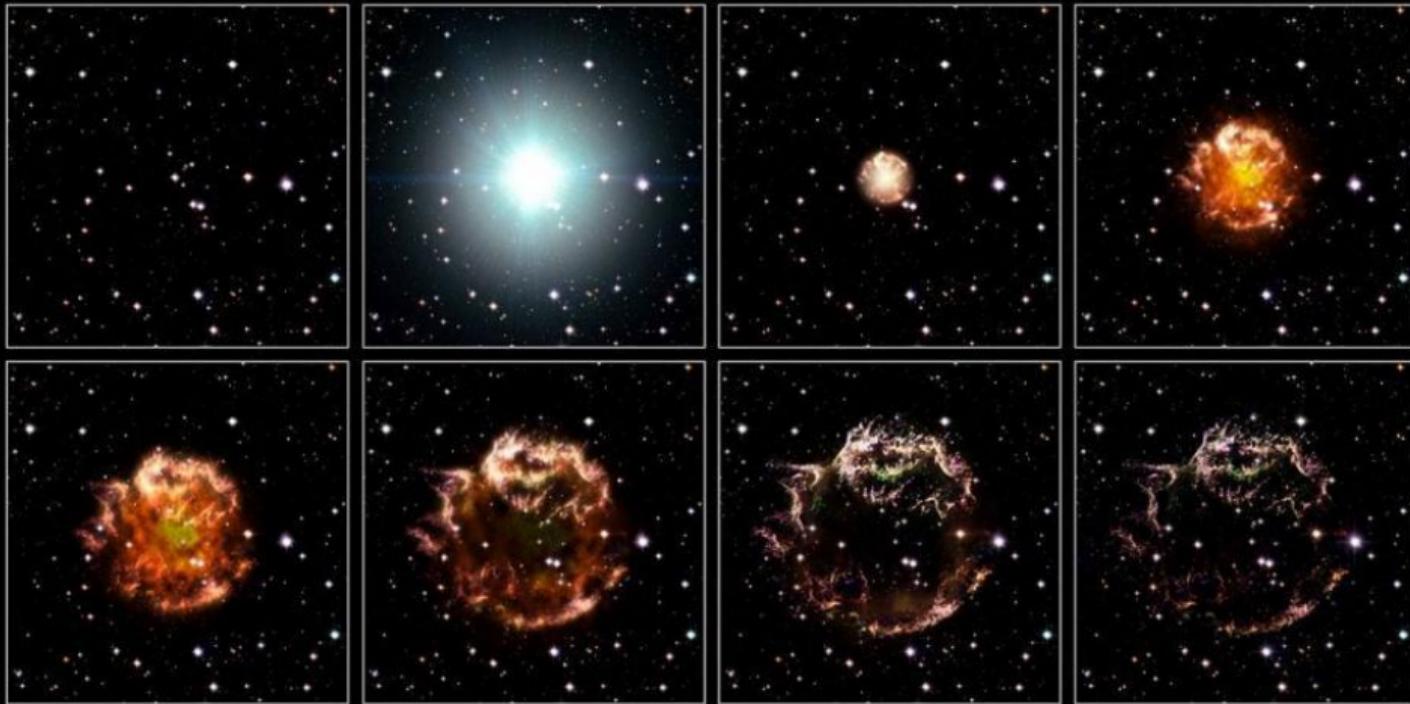


Estrellas grandes y muy grandes (entre 8 y 150 M_{Sol})



- 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** o un **agujero negro**

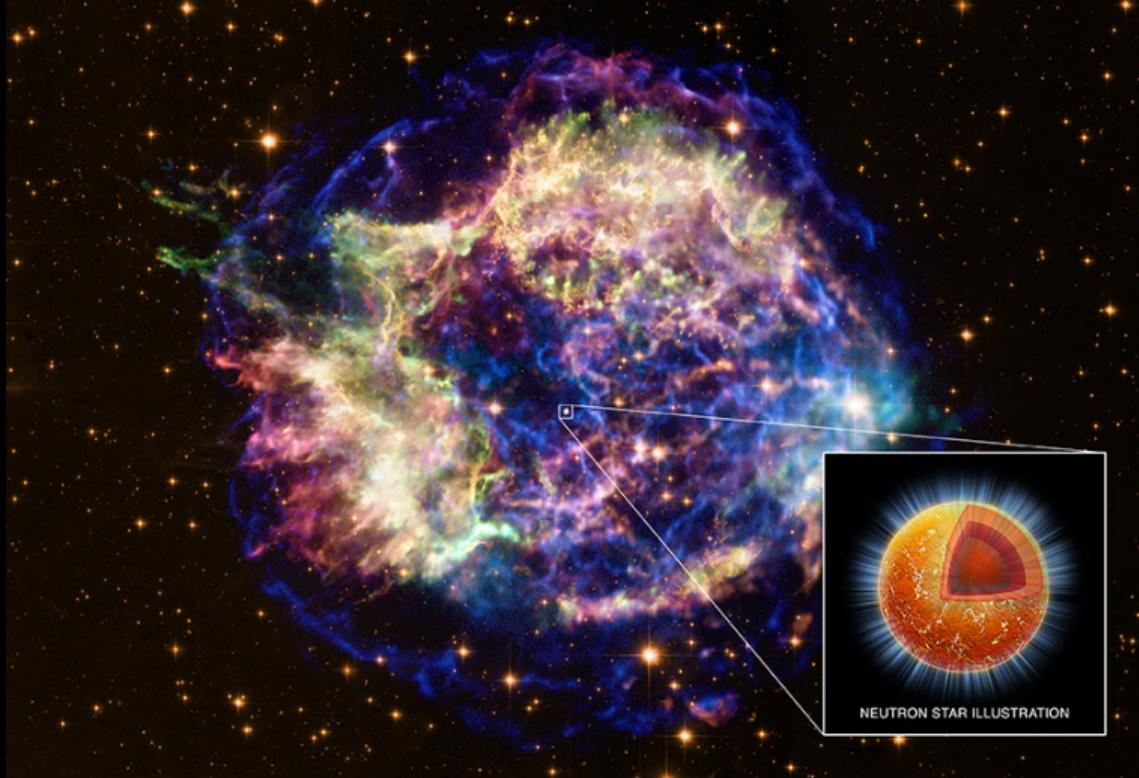
Explosión de supernova de colapso de núcleo



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

- La energía producida en un evento de supernova es transitoria y la estrella puede llegar a brillar con tanta luminosidad como la que produce una galaxia entera!

Producto Final de la Evolución: Remanente de Supernova



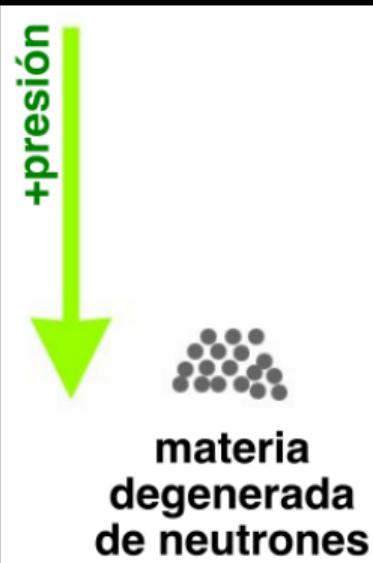
- Como resultado se produce una **remanente de supernova** que con el tiempo se termina dispersando (en este caso, en su centro hay una estrella de neutrones).

Producto Final de la Evolución: Remanente de Supernova

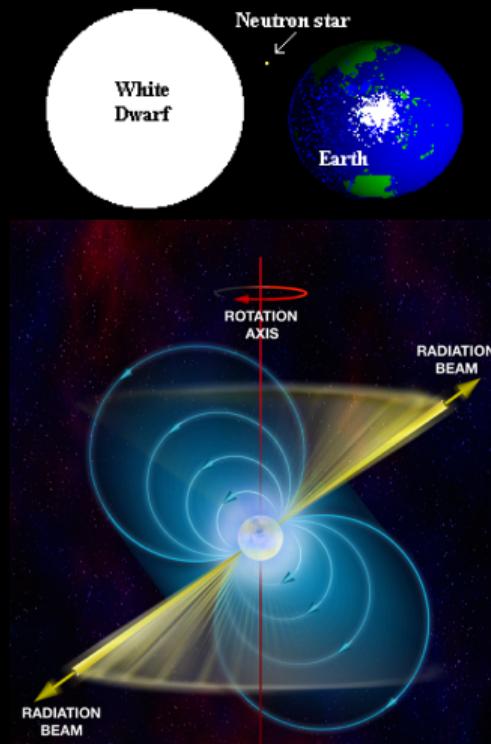


Producto Final (estrella de 8 a 20 M_{Sol}): estrella de neutrones

- La vida de la estrella grande de 8 a 20 M_{Sol} termina en una estrella de neutrones de altísima densidad y solo unos 20 km de diámetro

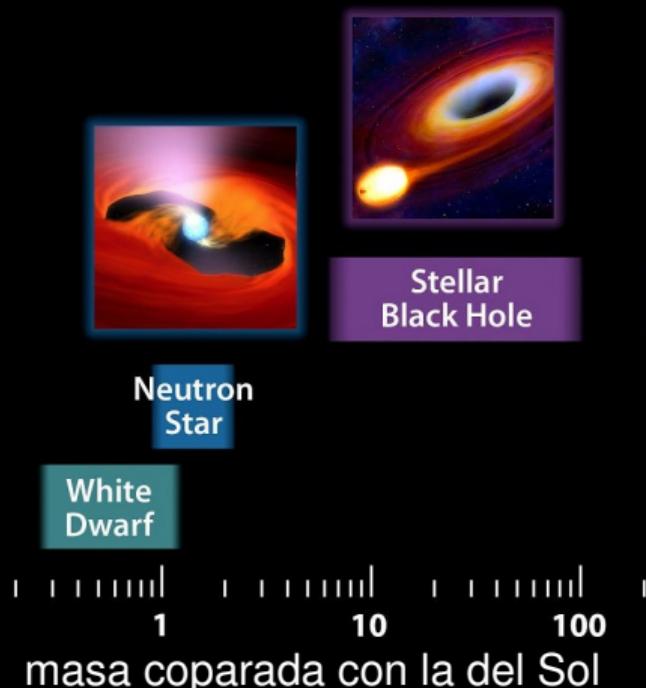


- Los protones y electrones del núcleo se fusionan para dar lugar a neutrones
- La fuerza que repele a los neutrones es la capaz de mantener la estrella de neutrones sin colapsar (siempre que tenga una masa menor que $2,8 M_{\odot}$)
- Una estrella de neutrones que rota rápidamente puede dar lugar a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



Producto Final (estrella de 20 a 150 M_{Sol}): agujero negro de estelar

- La vida de la estrella muy grande de 20 a 150 M_{Sol} termina generando un agujero negro estelar



Estrellas grandes y muy grandes (entre 8 y 150 M_{Sol})



- Las estrellas grandes y muy grandes tiene **vidas muy cortas** (millones de años)
- Estas estrellas pasan por distintas etapas en las que **sucesivamente fusionan: hidrógeno, helio, carbono, oxígeno, neón y silicio** (acumulando hierro en su núcleo).
- Terminan su vida de forma abrupta con una gran explosión: **supernova de colapso de núcleo** (Tipo II, Ib y Ic)
- Dependiendo del tamaño, el producto final es:
 - 1 una **estrella de neutrones** o
 - 2 un **agujero negro**

¿Preguntas?

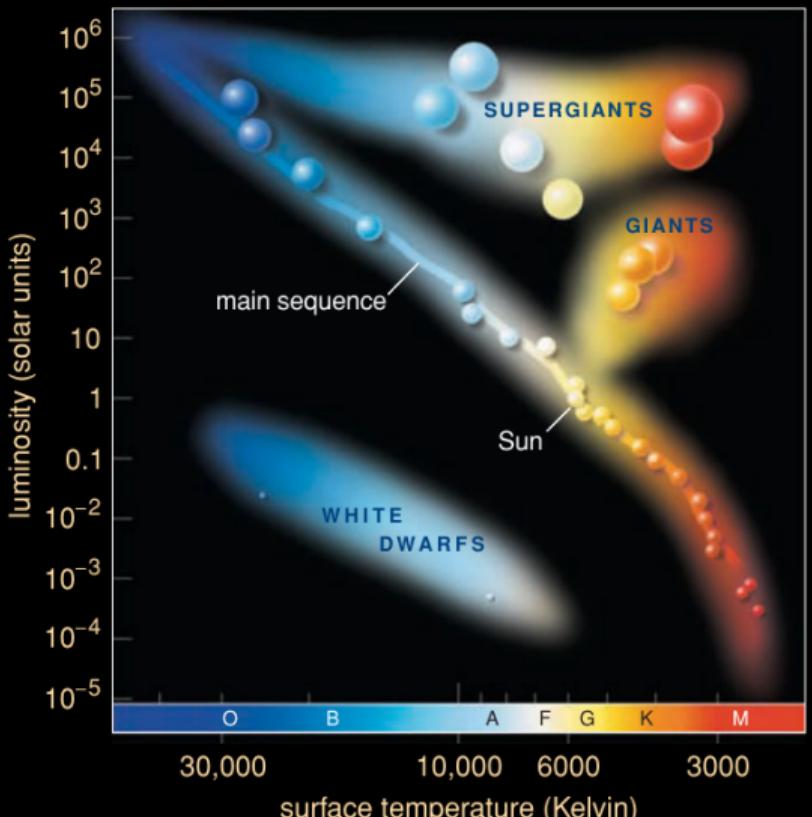
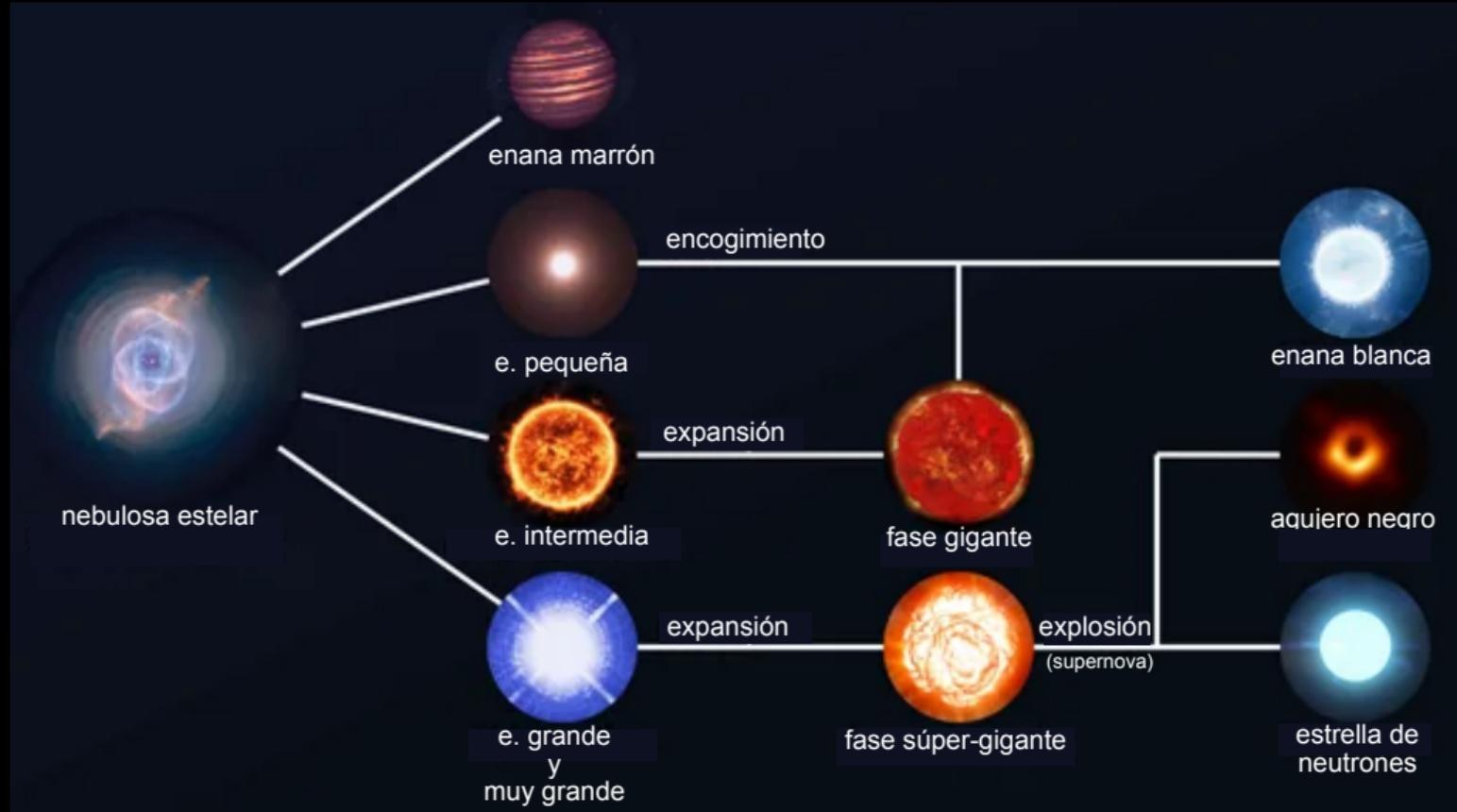


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)

5 La vida y muerte de las estrellas

5.4 Comparativa de la vida de las estrellas

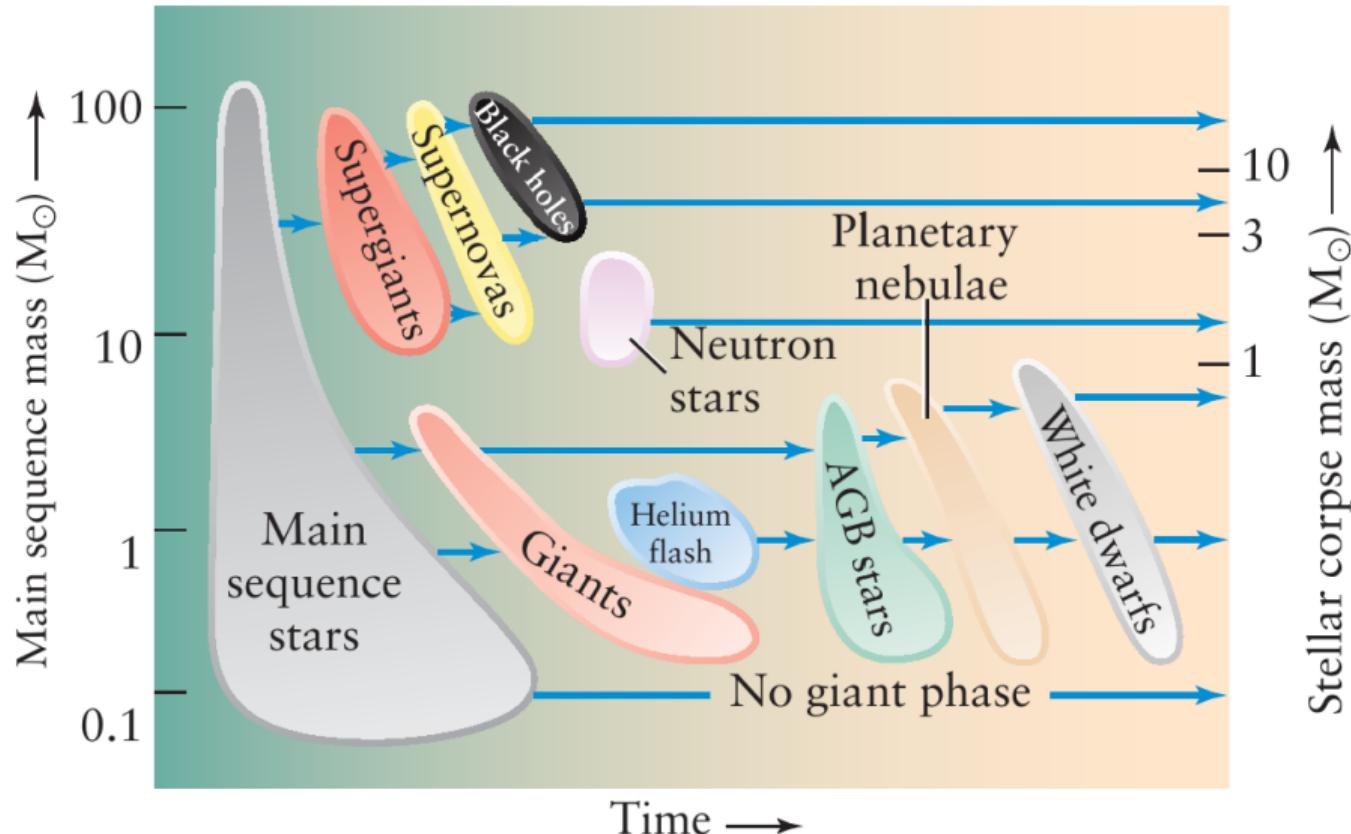
Resumen de la vida de las estrellas según su masa inicial



Clasificación Simplificada de Estrellas en la Secuencia Principal

Tipo de Estrella	Masa	Fusión H	Fusión He	Fusión C, O, Ne, Si	Punto Final
pequeña	$0.1 < \frac{M}{M_{\odot}} < 0.5$	✓	x	x	Enana Blanca
intermedia	$0.5 < \frac{M}{M_{\odot}} < 8$	✓	✓	x	Nebulosa Planetaria + Enana Blanca
grande	$8 < \frac{M}{M_{\odot}} < 20$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Estrella de Neutrones
muy grande	$20 < \frac{M}{M_{\odot}} < \sim 100$	✓	✓	✓	Supernova + Remanente de Supernova + Agujero Negro

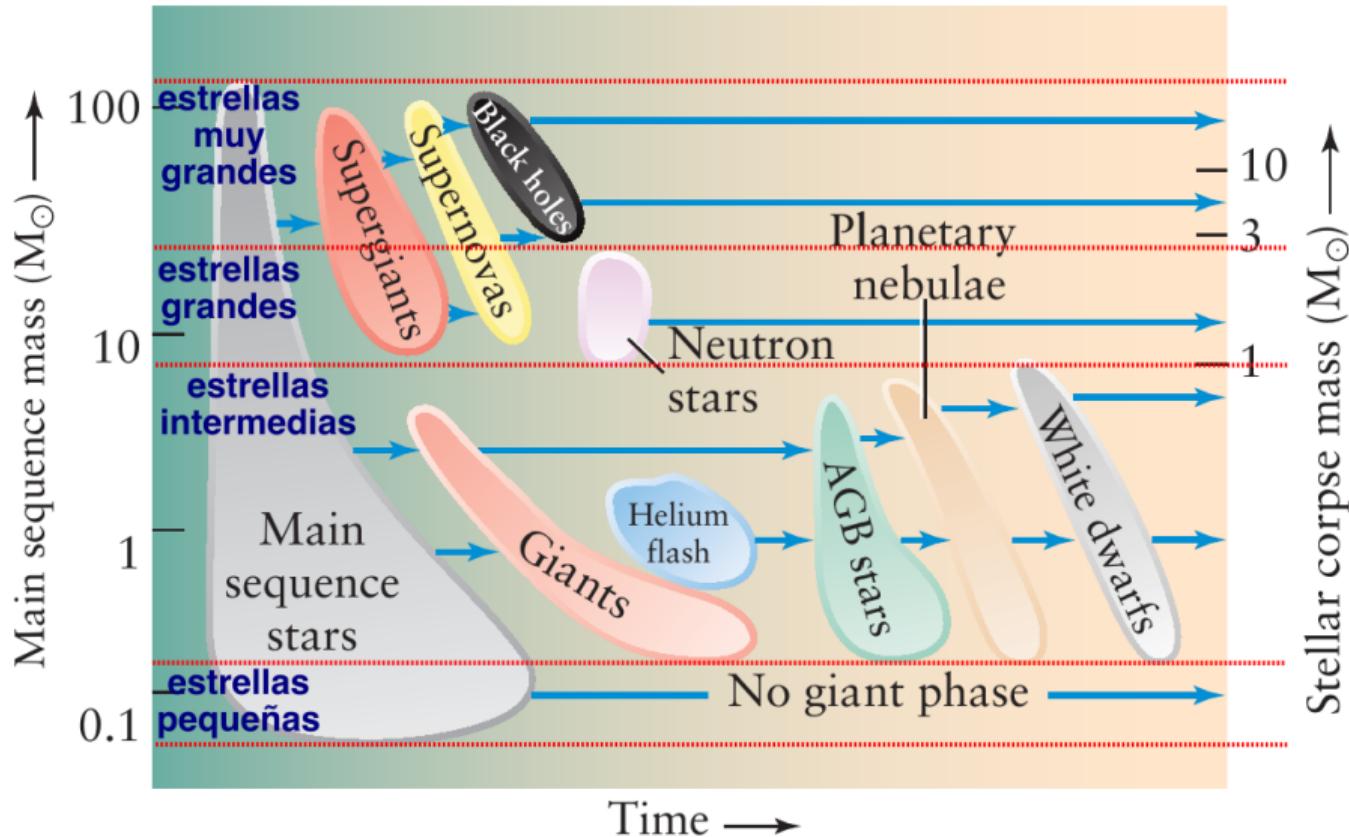
Resumen de la vida de las estrellas según su masa inicial



el tiempo no está a escala

Freeman et al 2011

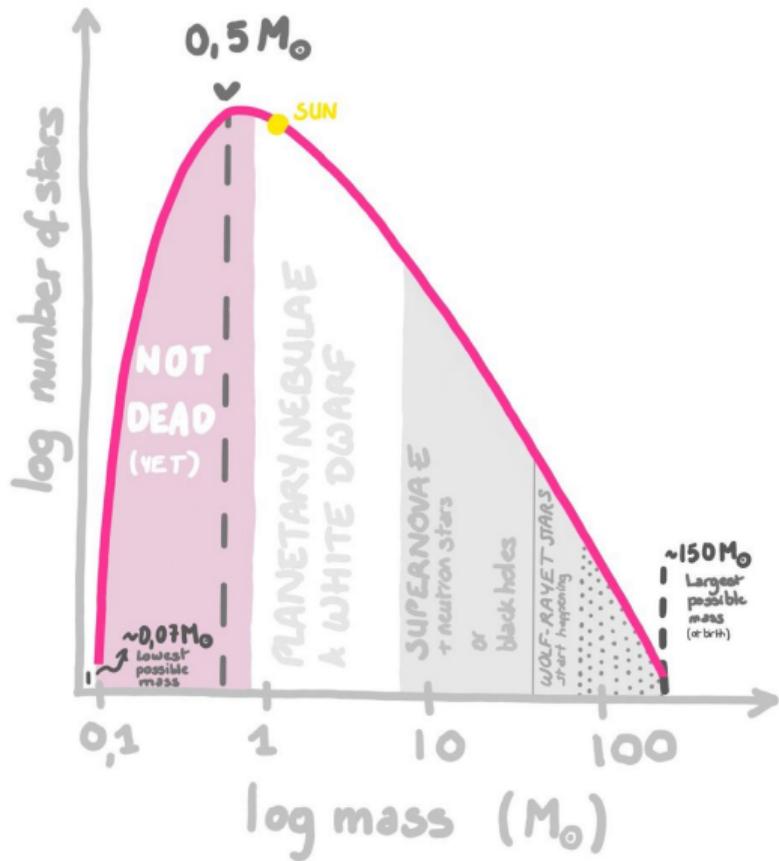
Resumen de la vida de las estrellas según su masa inicial



el tiempo no está a escala

Freeman et al 2011

Resumen de la vida de las estrellas según su masa inicial



¿Preguntas?

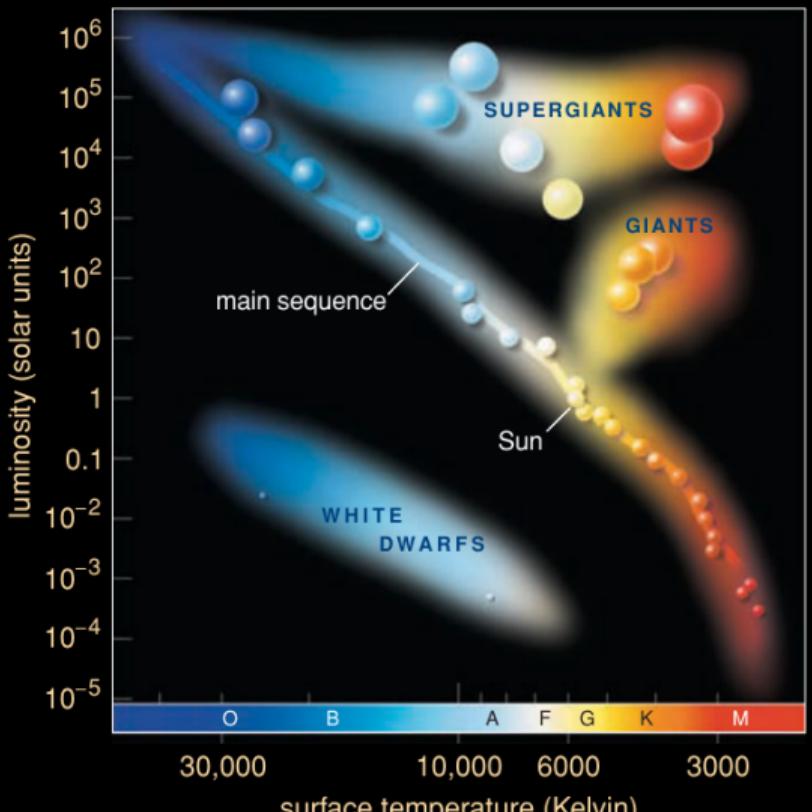


Diagrama de Hertzsprung-Russell (Bennett et al. 2012)