

Las Estrellas: Su Vida y Muerte

Jane Arthur

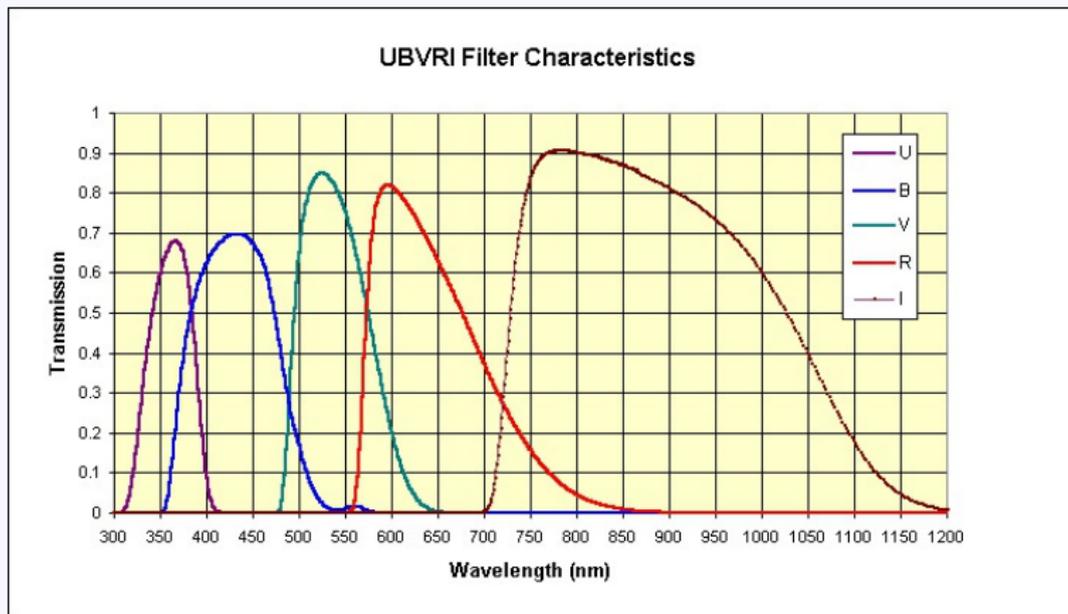
IRyA, UNAM: Morelia

Escuela de Verano en Astrofísica, 2017

El Cielo de Noche: ¿Estrellas Inmutables?

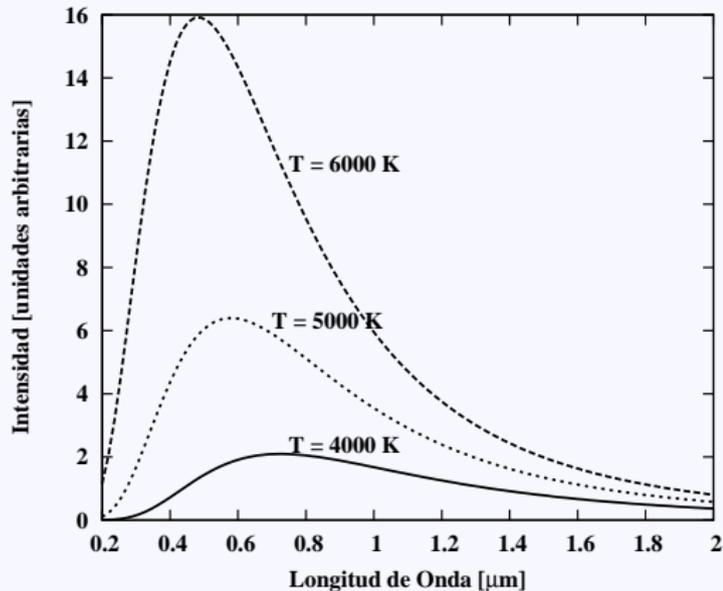
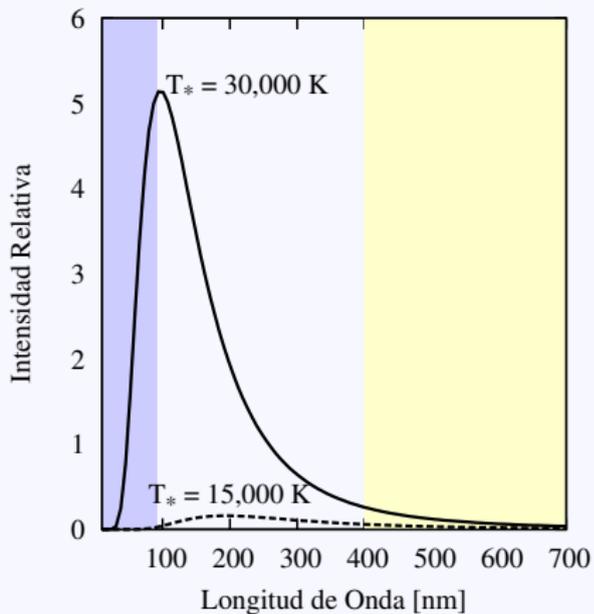


Medir la luz de las estrellas: Fotometría



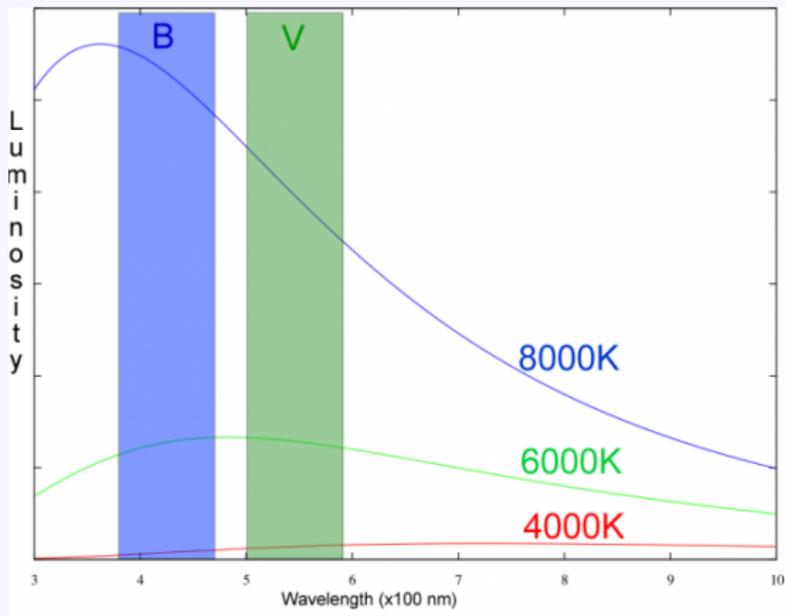
Mediciones del flujo radiante a través de filtros.

Medir la luz de las estrellas: Fotometría



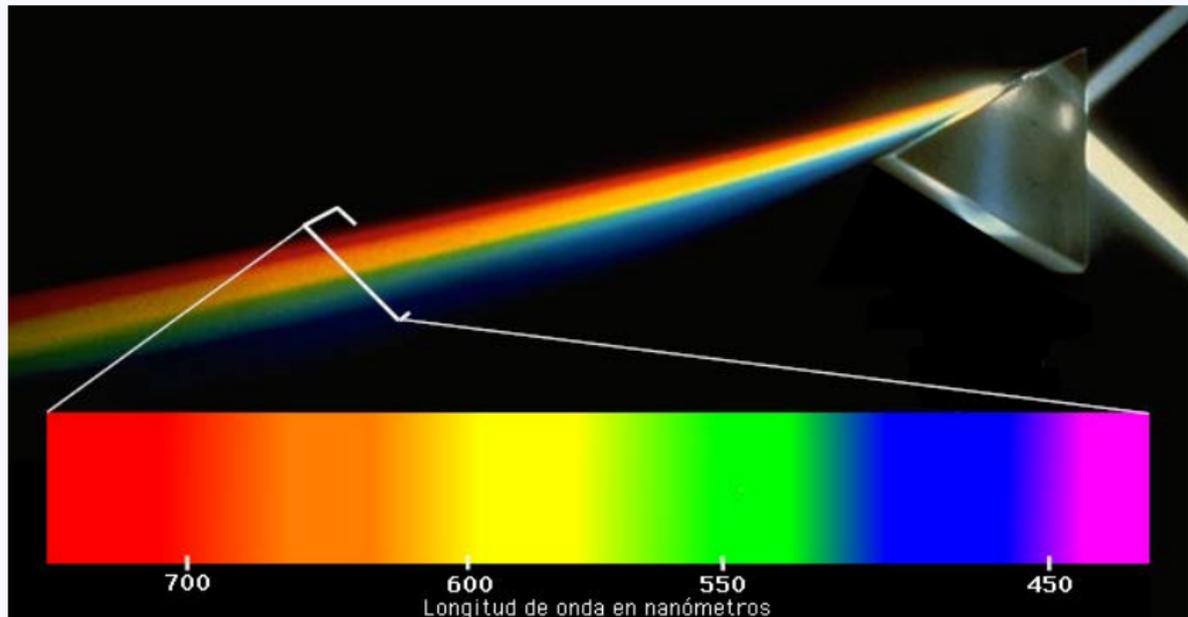
Las estrellas radian como cuerpos negros.

Medir la luz de las estrellas: Fotometría



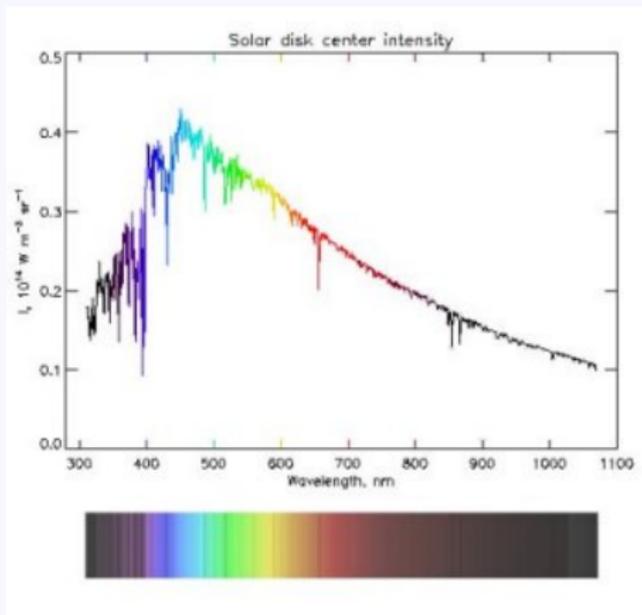
Diferencia en magnitudes en 2 filtros se llama COLOR e indica temperatura.

Espectroscopía



Separar la luz por longitud de onda.

Espectroscopía



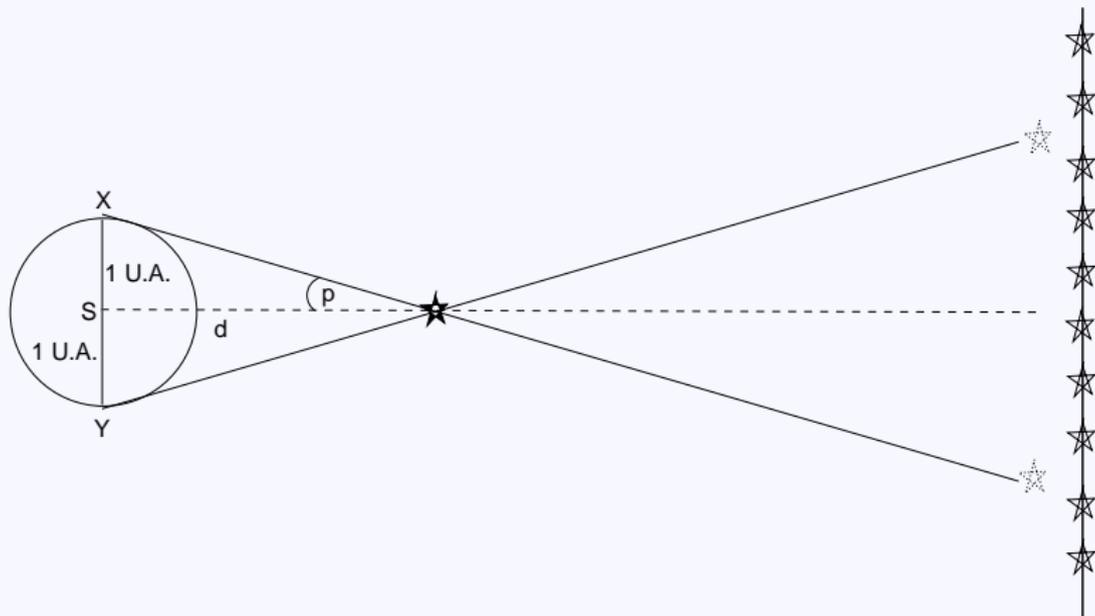
Espectro del Sol.

Clasificación de Espectros Estelares



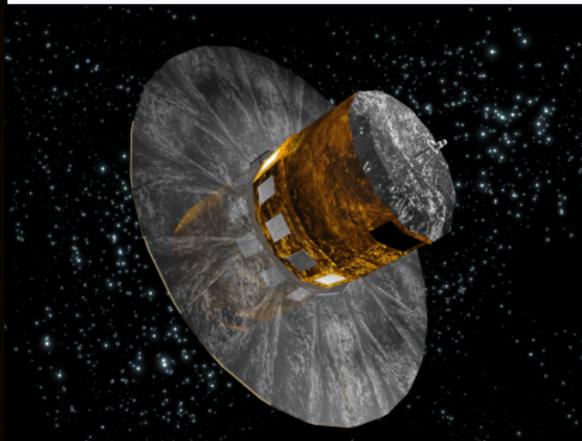
Tarea fundamental realizada por
Annie Jump Cannon.
O, B, A, F, G, K, M

Posiciones de las Estrellas en el Cielo

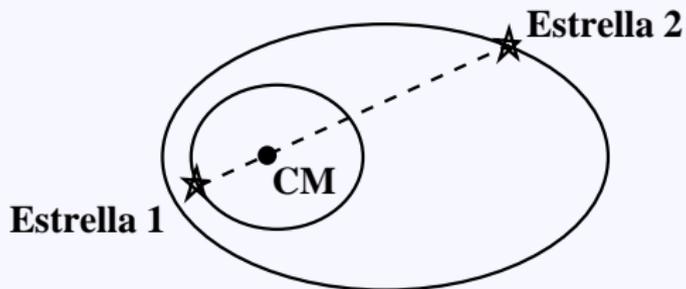
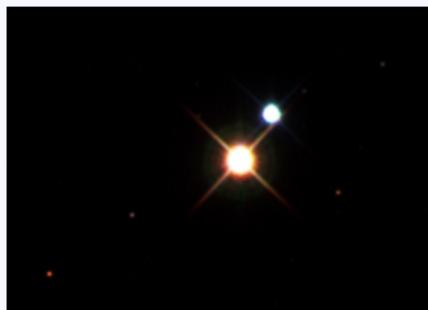


El fenómeno de paralaje permite encontrar distancias, y por lo tanto luminosidades.

Satélites Hipparcos y GAIA



Posiciones de las Estrellas en el Cielo



Se obtienen masas de estrellas en sistemas binarios, usando las leyes de Kepler.

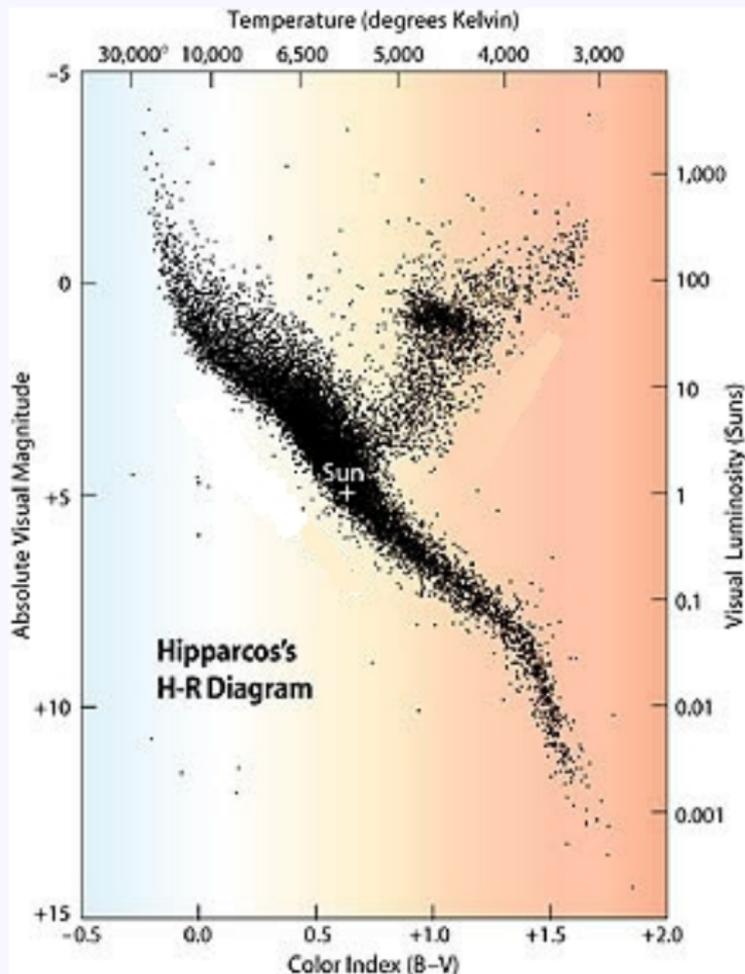
$$m_1 r_1 = m_2 r_2$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} r^3,$$

$$m_1 \alpha_1 = m_2 \alpha_2$$

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 (\alpha_1 + \alpha_2)^3 d^3}{G P^2}.$$

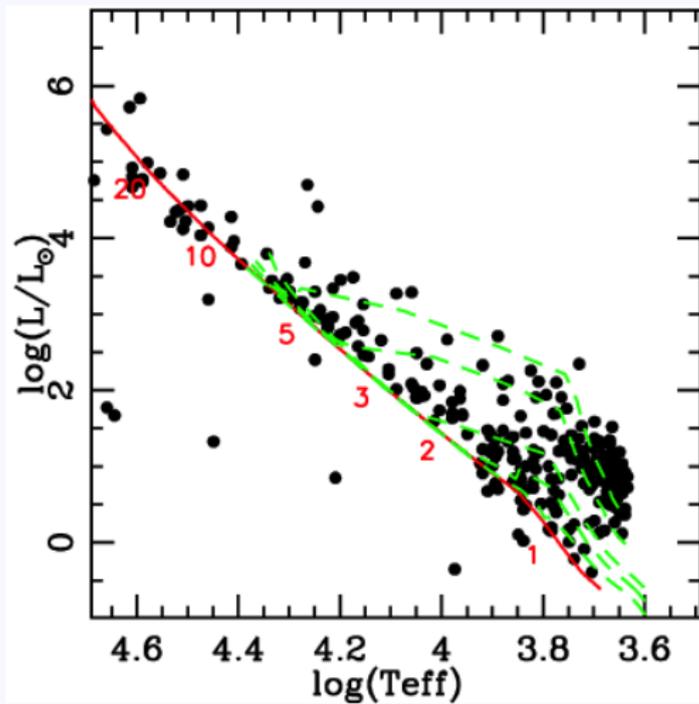
Diagrama
Herzsprung-
Russell



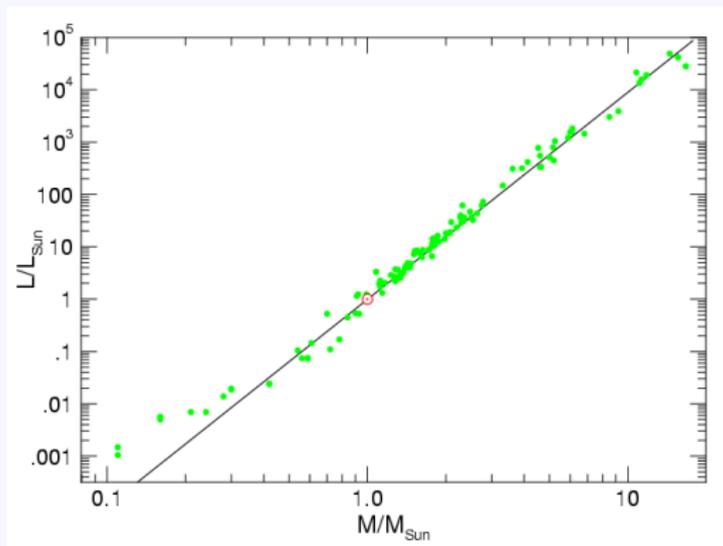
Hay Estrellas aún más Calientes



y más Luminosas



Relación Masa-Luminosidad en Secuencia Principal



La masa es el parámetro fundamental.



Teoría ~ 1920

Arthur
Eddington

Ideas Básicas de la Estructura Estelar

- Distribución de masa
- Equilibrio hidrostático
- Generación de energía
- Transporte de energía

Ideas Básicas de la Estructura Estelar

$$m(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr ,$$

- Equilibrio hidrostático
- Generación de energía
- Transporte de energía

Ideas Básicas de la Estructura Estelar

$$m(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr ,$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2} ,$$

- Generación de energía
- Transporte de energía

Ideas Básicas de la Estructura Estelar

$$m(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr ,$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2} ,$$

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon ,$$

- Transporte de energía

Ideas Básicas de la Estructura Estelar

$$m(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr ,$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2} ,$$

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon ,$$

Radiación ó Convección

Ecuación de Estado

¿De Qué están hechas las Estrellas?



Meghnad Saha (Ecuación 1920)



Cecilia Payne (Ph.D. 1925)

¿De Qué están hechas las Estrellas?

The diagram illustrates the Saha equation, which describes the ratio of populations of ionization states i and $i+1$. The equation is presented as follows:

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2Z_{i+1}}{n_e Z_i} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\chi_i/kT}$$

Labels and their corresponding parts in the equation:

- RATIO OF POPULATIONS OF IONIZATION STATES i AND $i+1$** : $\frac{N_{i+1}}{N_i}$
- ELECTRON NUMBER DENSITY**: n_e
- PARTITION FUNCTIONS FOR i AND $i+1$** : Z_i
- ELECTRON MASS**: m_e
- BOLTZMANN CONSTANT**: k
- PLANCK CONSTANT**: h
- IONIZATION ENERGY**: χ_i

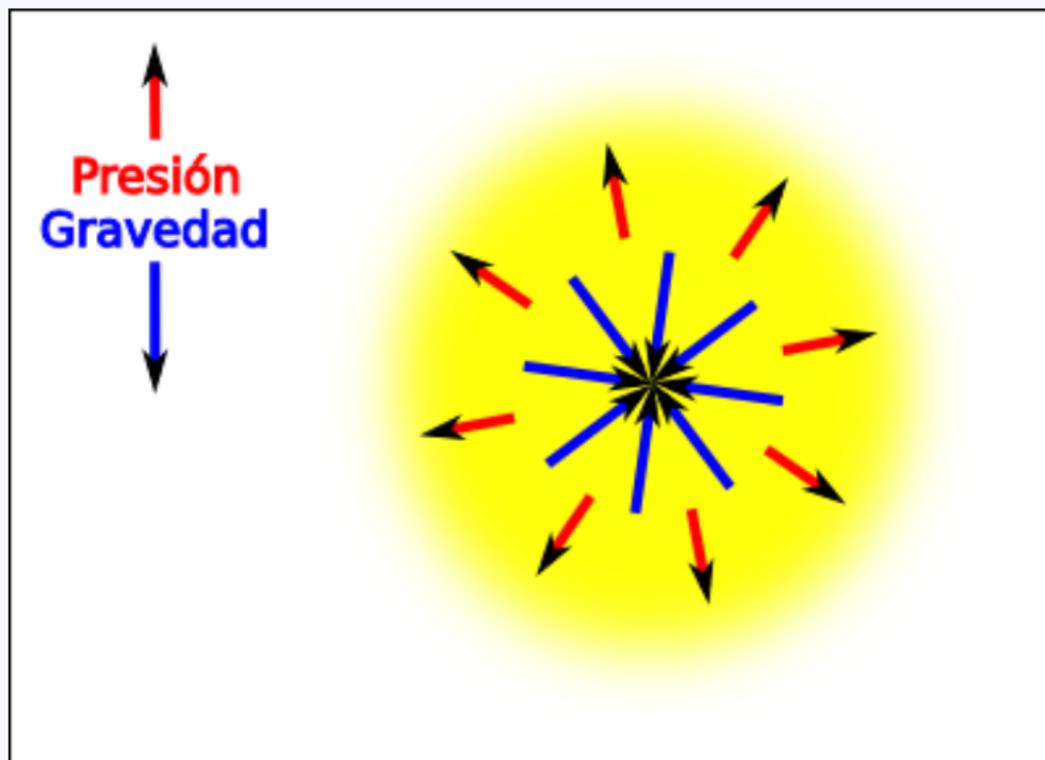
Ecuación de Saha

¿De Qué están hechas las Estrellas?

- ▶ Análisis de espectros estelares.
- ▶ Relación entre clase espectral (líneas de absorción) y temperaturas.
- ▶ C, O, Si, Fe presentes en las mismas proporciones que en la Tierra.
- ▶ H, He mucho más abundantes.
- ▶ H un millón de veces más abundante - debe ser el elemento más abundante en las estrellas y, por lo tanto, el Universo.

ii QUIZ!!

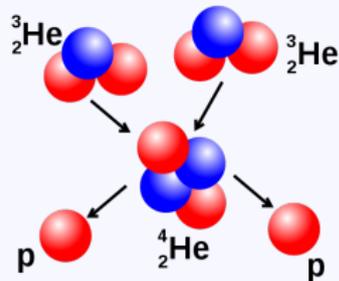
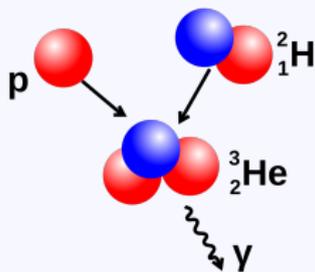
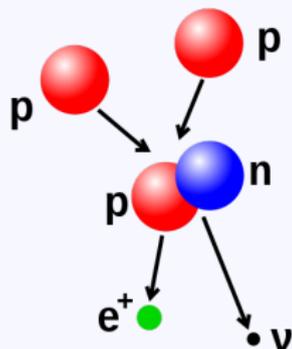
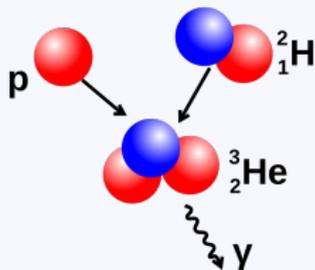
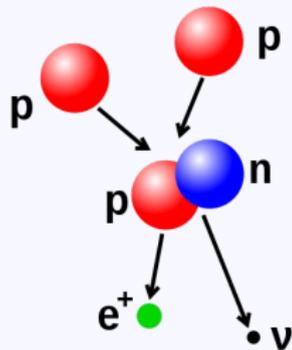
Equilibrio Hidrostático



Fuente de Energía Interna



Se Convierte Masa en Energía: $E = mc^2$



Hans Bethe

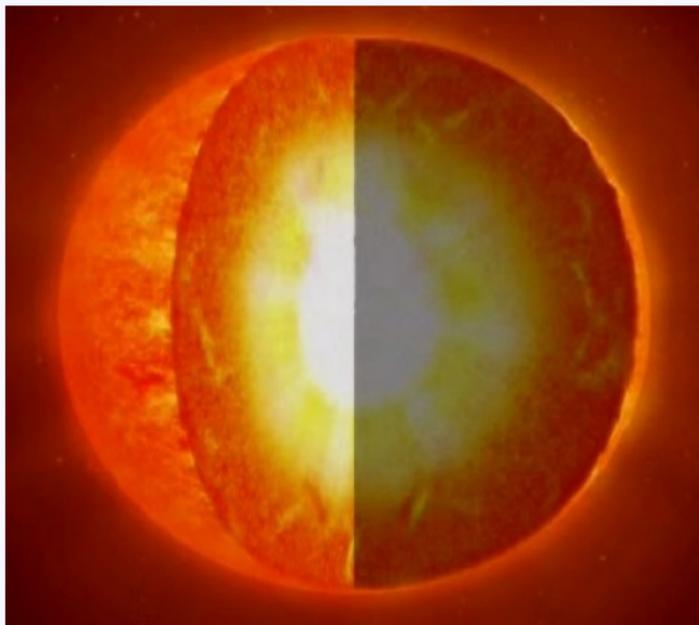


George Gamow



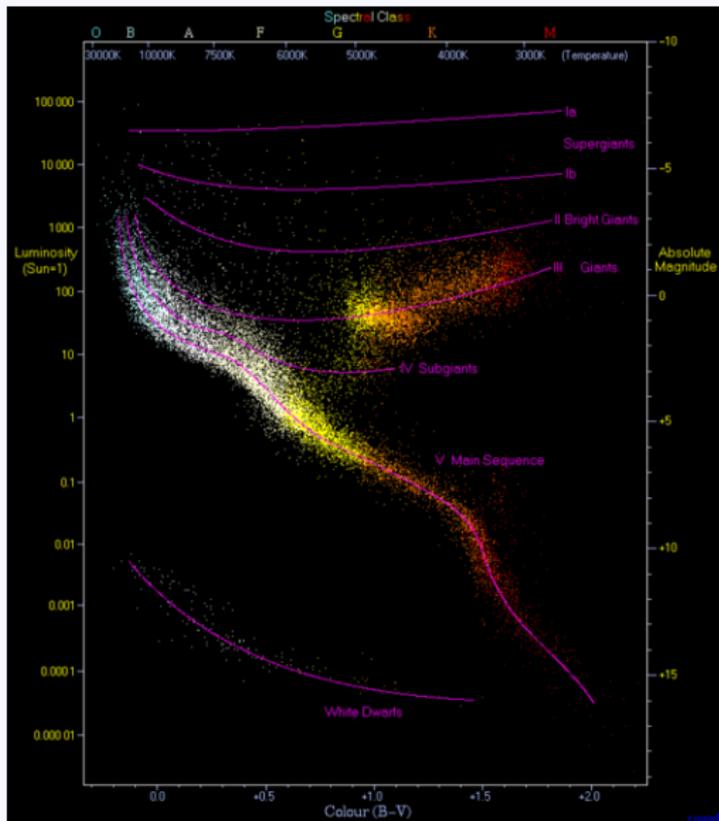
Se requiere la MECÁNICA CUÁNTICA

Sólo el 20 % se quema

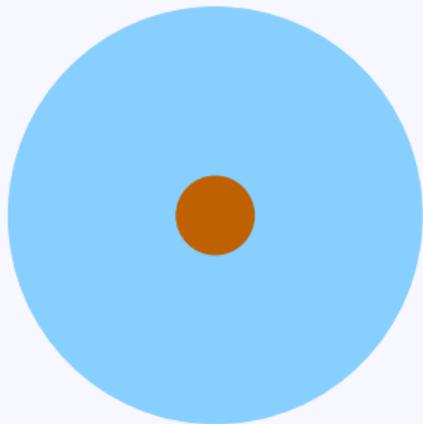


El resto transporta la energía hacia la superficie

Diagrama Hertzsprung-Russell

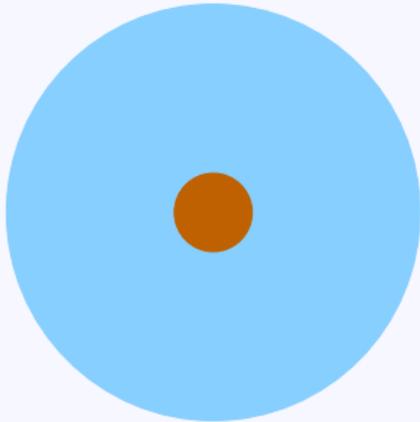


Secuencia principal

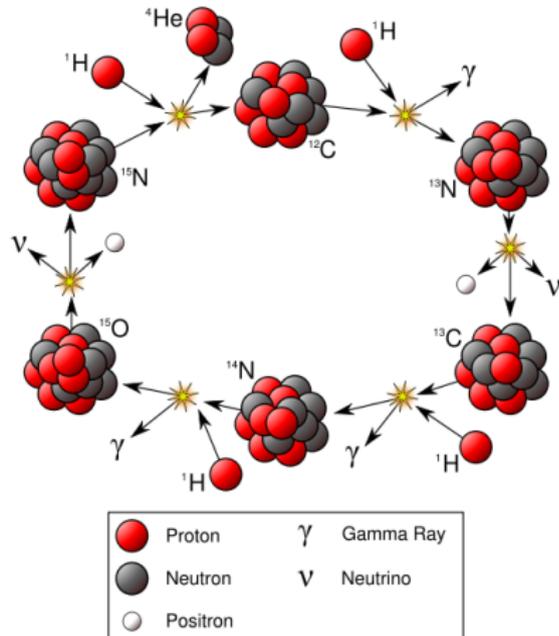


Quemado de H en He

Secuencia principal



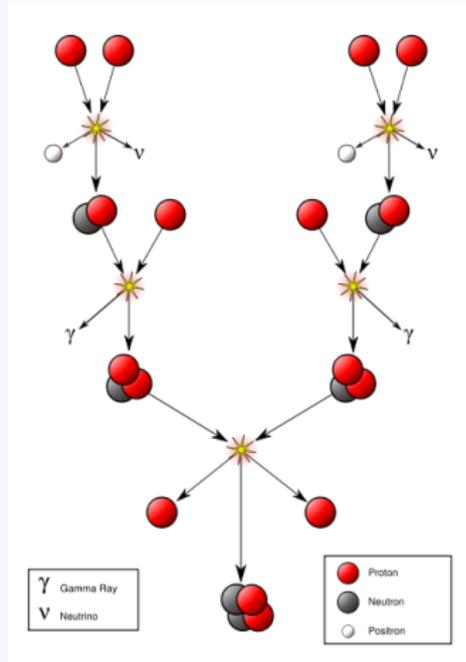
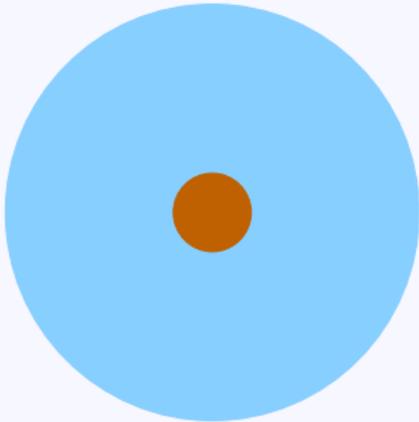
$M > 1.2M_{\odot}$ — Ciclo CNO



$$T_c > 17 \times 10^6 \text{ K}$$

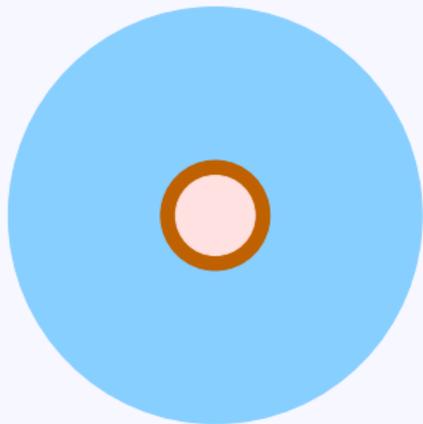
Secuencia principal

$M < 1.2M_{\odot}$ — Cadena protón-protón



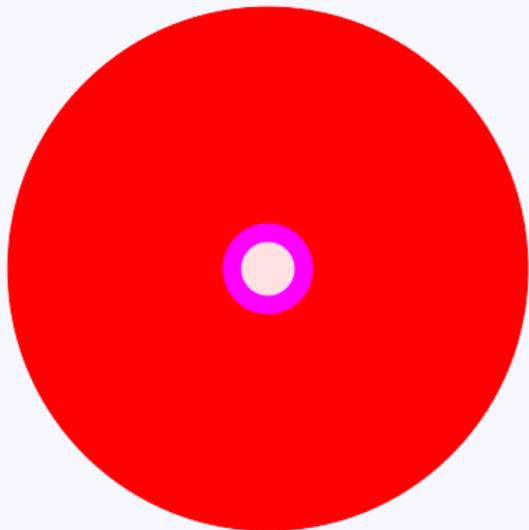
$$T_c < 17 \times 10^6 \text{ K}$$

Secuencia principal

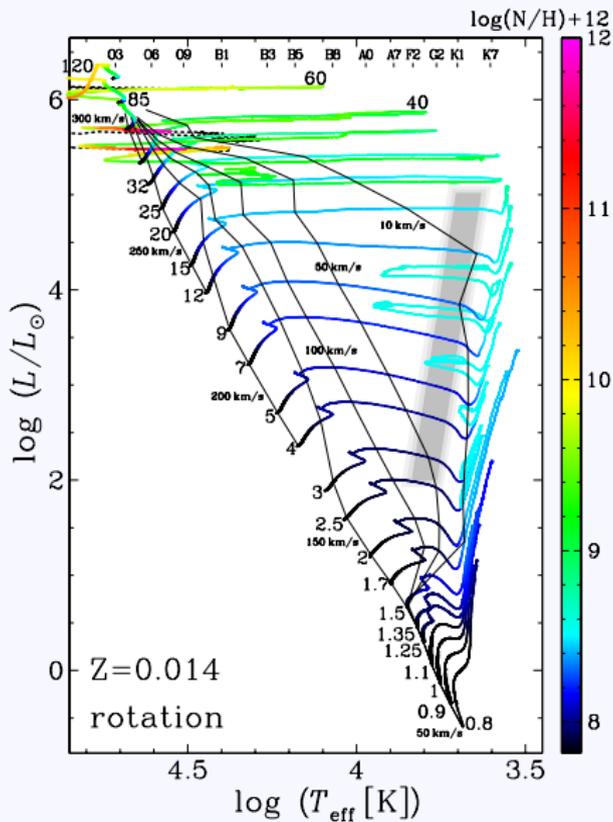


He acumula en el núcleo

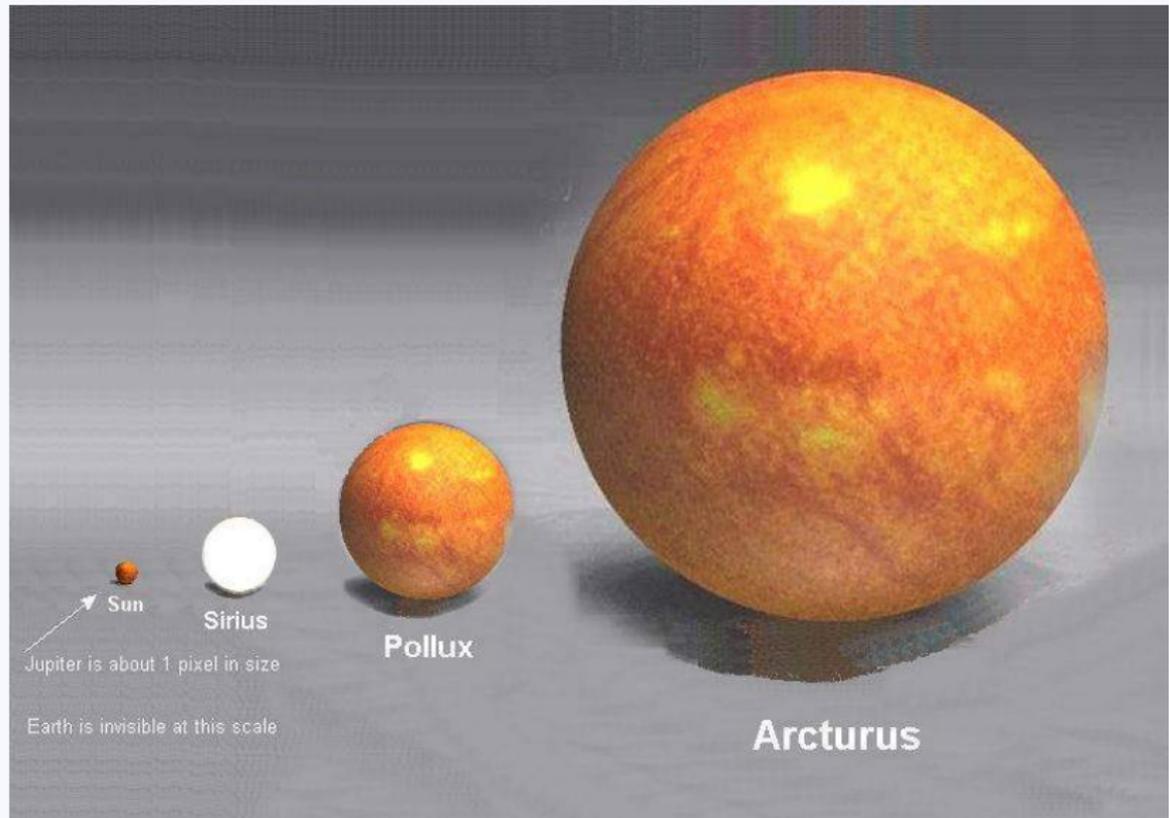
(Super)gigante Roja



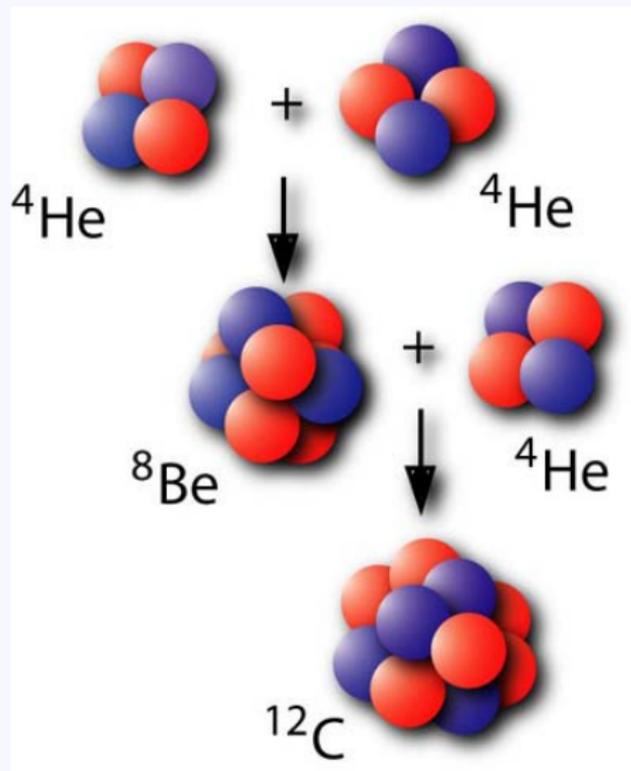
Trazas Evolutivas



La estrella se infla: $L = \sigma R_*^2 T_*^4$

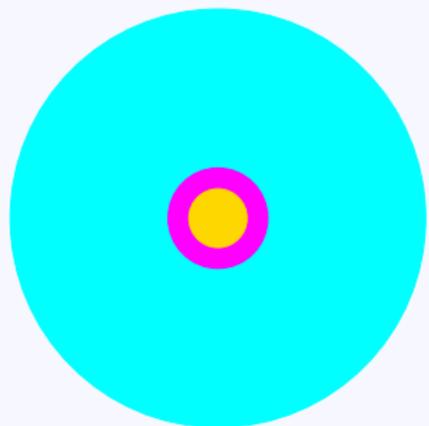


Fusión de Helio: $E = mc^2$

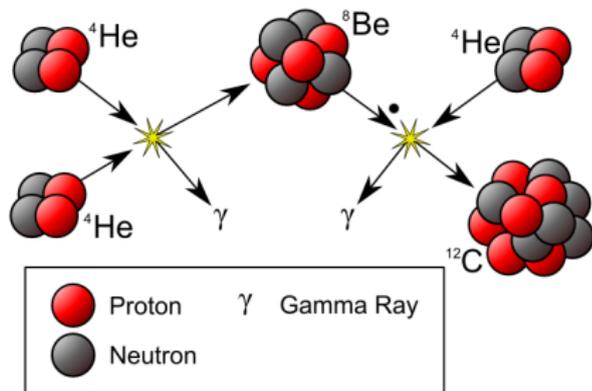


Fred Hoyle

Quemado del helio

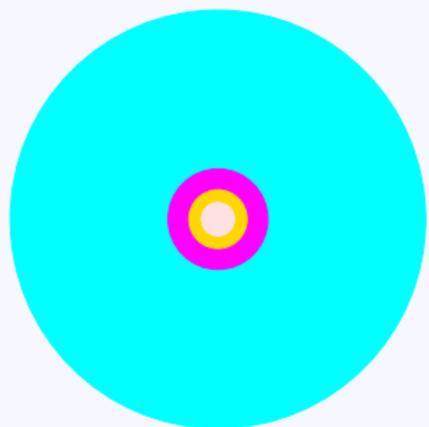


Proceso triple- α

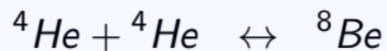


$$T > 10^8 \text{ K}, \epsilon \propto T^{40}$$

Quemado del helio



Proceso triple- α



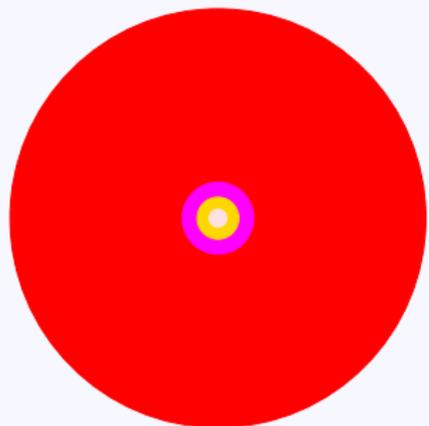
y



$$T > 10^8 \text{ K}, \epsilon \propto T^{40}$$

Quemado del helio

C y O acumulan en el núcleo



Presión en el núcleo

- Presión de gas ideal
- Presión de electrones degenerados
- Enana blanca
- Límite de Chandrasekhar
- $1.44M_{\odot}$



Subrahmanyan Chandrasekhar

Nebulosa Planetaria, $M < 8M_{\odot}$



- ▶ Capas exteriores expulsados
- ▶ C-O núcleo expuesto

Nebulosa Planetaria, $M < 8M_{\odot}$



- ▶ No hay reacciones nucleares
- ▶ Presión de degeneración de los electrones
- ▶ Enfriamiento paulatino
- ▶ $M(\text{enana blanca}) < 1.4M_{\odot}$

Nebulosa Planetaria, $M < 8M_{\odot}$

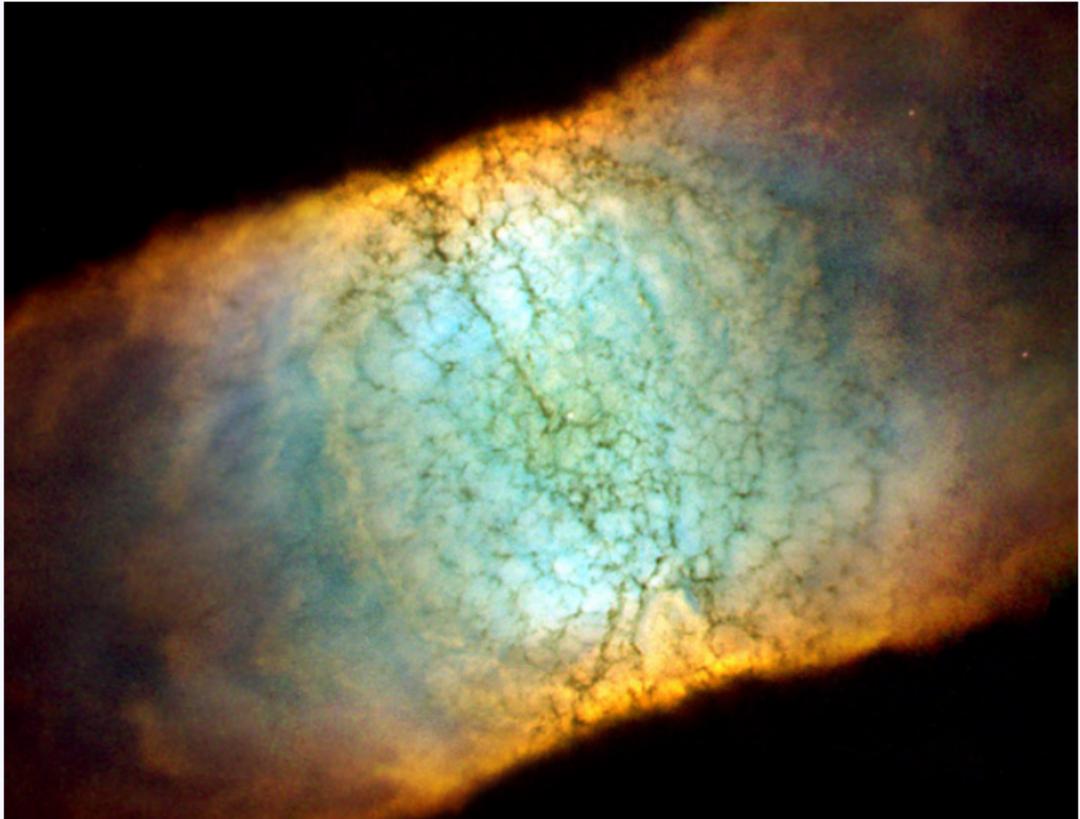
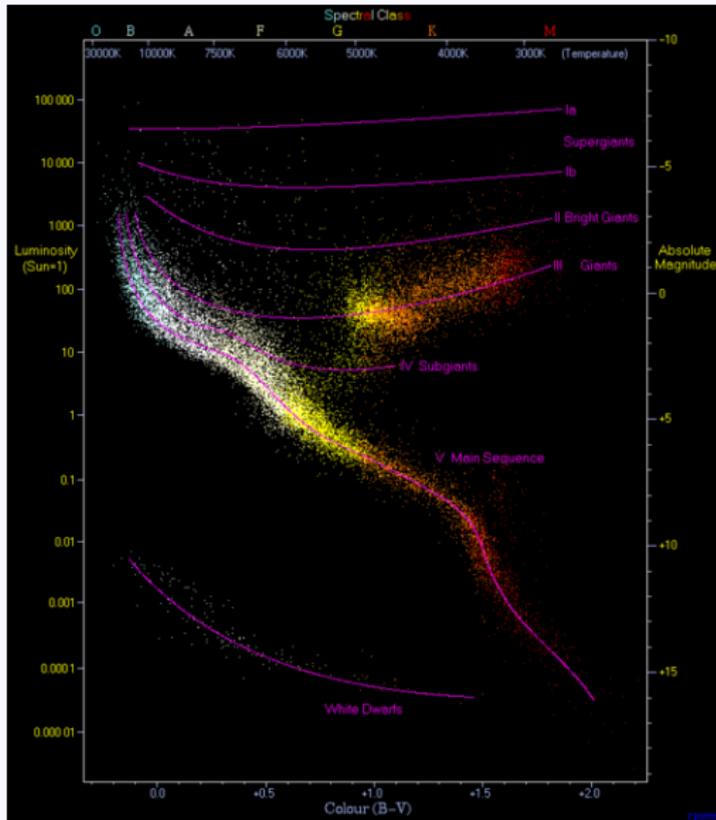


Diagrama Hertzsprung-Russell

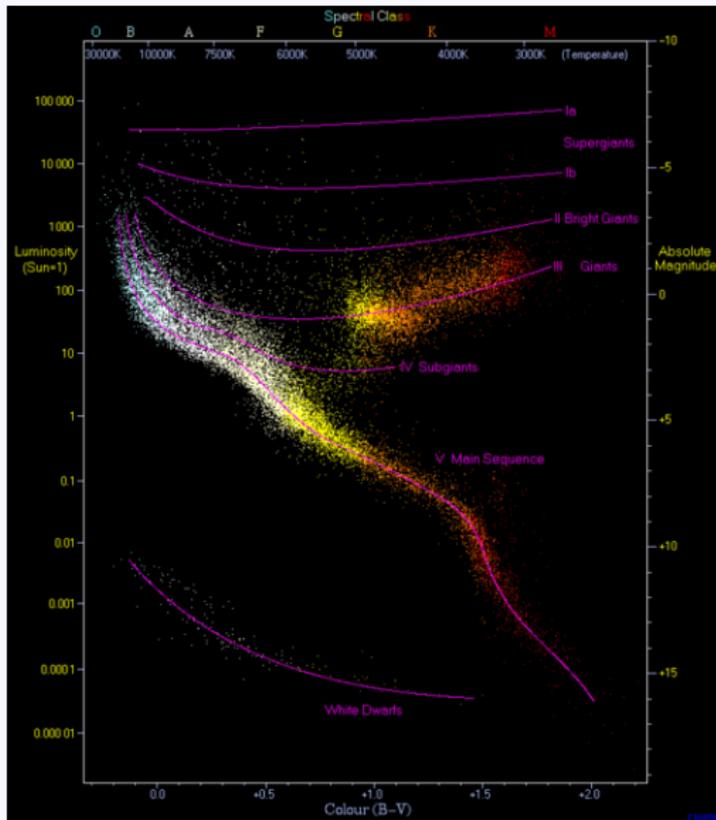


Estrellas masivas

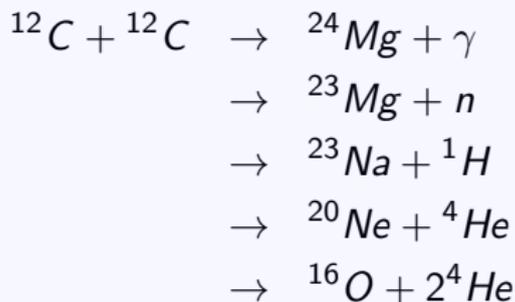
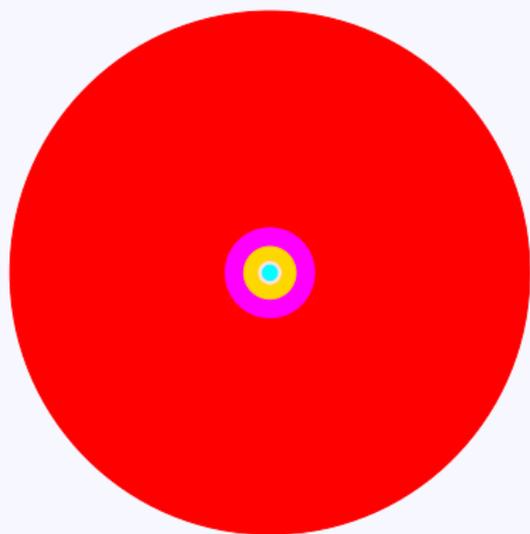
... y las estrellas masivas, $M > 8M_{\odot}$?

- ▶ Hay más de 100,000,000,000 estrellas en la Galaxia
- ▶ Aproximadamente 25,000 estrellas con masa $M_* > 20M_{\odot}$
- ▶ Solamente 500 estrellas con masa $M_* > 50M_{\odot}$
- ▶ Tienen luminosidades muy altas y queman su combustible muy rápido,
- ▶ No viven mucho tiempo.

Diagrama Hertzsprung-Russell

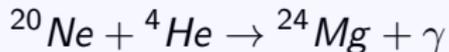
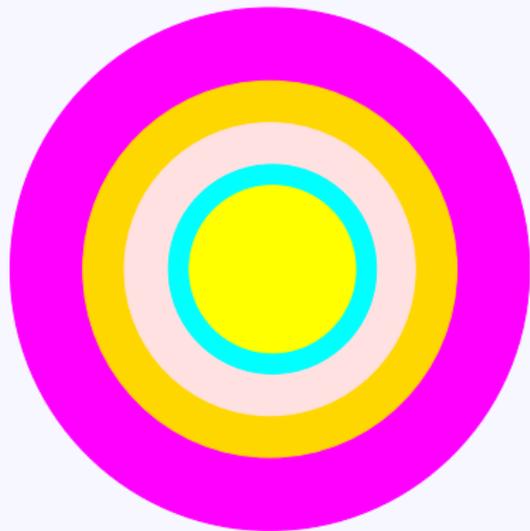


Quemado del carbono, $M > 8M_{\odot}$: milenios

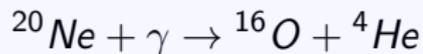


- ▶ $T \sim 6 \times 10^8$ K,
 $\rho \sim 2 \times 10^8$ kg m⁻³
- ▶ O, Mg, Ne acumulan en el núcleo

Quemado de Neon: meses

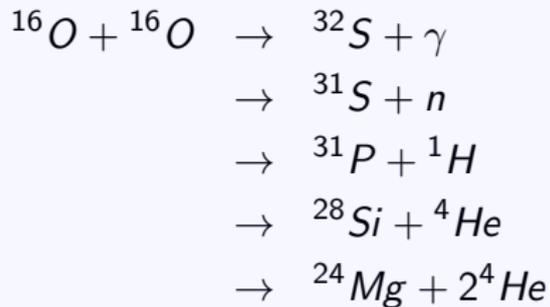


Fotodesintegración



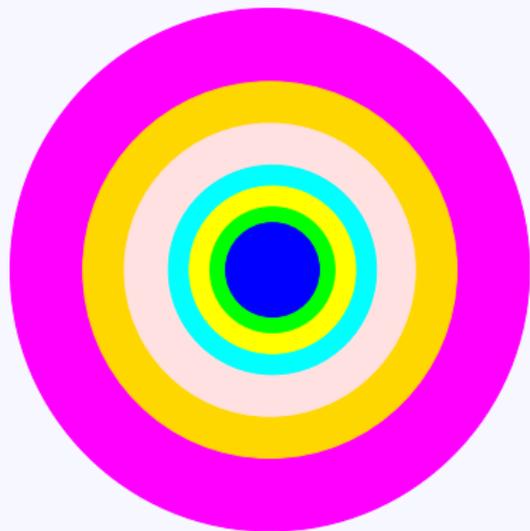
- ▶ $T \sim 1.5 \times 10^9$ K,
 $\rho \sim 4 \times 10^9$ kg m⁻³
- ▶ O, Mg acumulan en el núcleo
- ▶ Envoltante ya no puede responder

Quemado de Oxígeno: meses



- ▶ $T \sim 2 \times 10^9$ K,
 $\rho \sim 10^{10}$ kg m⁻³
- ▶ Si acumula en el núcleo

Quemado de Silicio: semanas



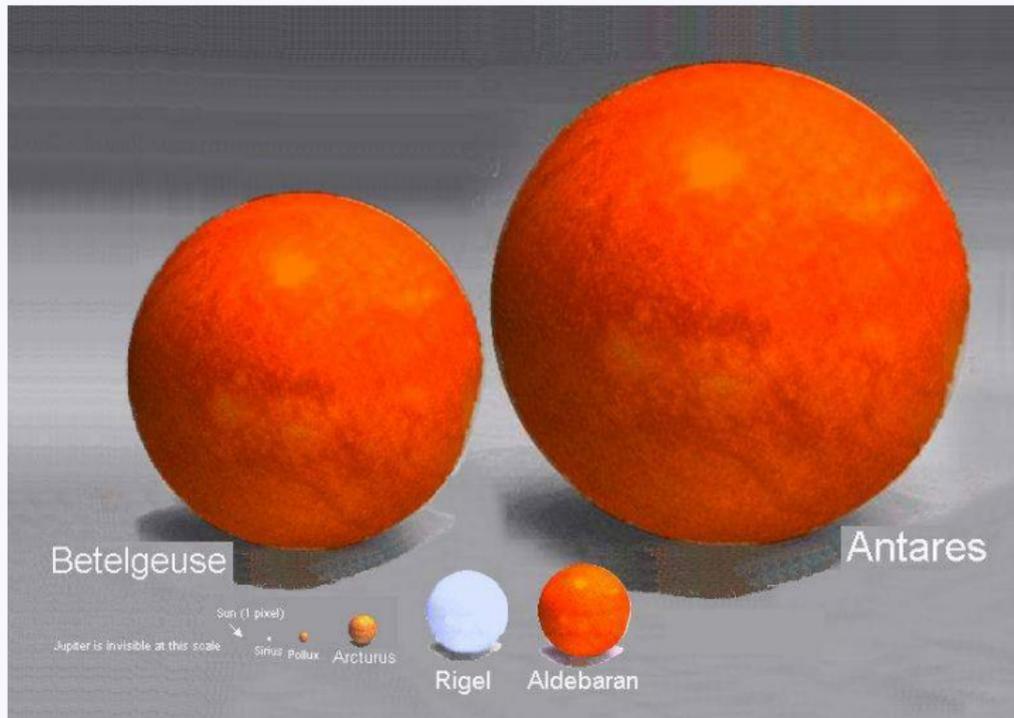
- ▶ $T \sim 3 \times 10^9$ K,
 $\rho \sim 3 \times 10^{10}$ kg m⁻³
- ▶ Fe acumula en el núcleo

Supergigante

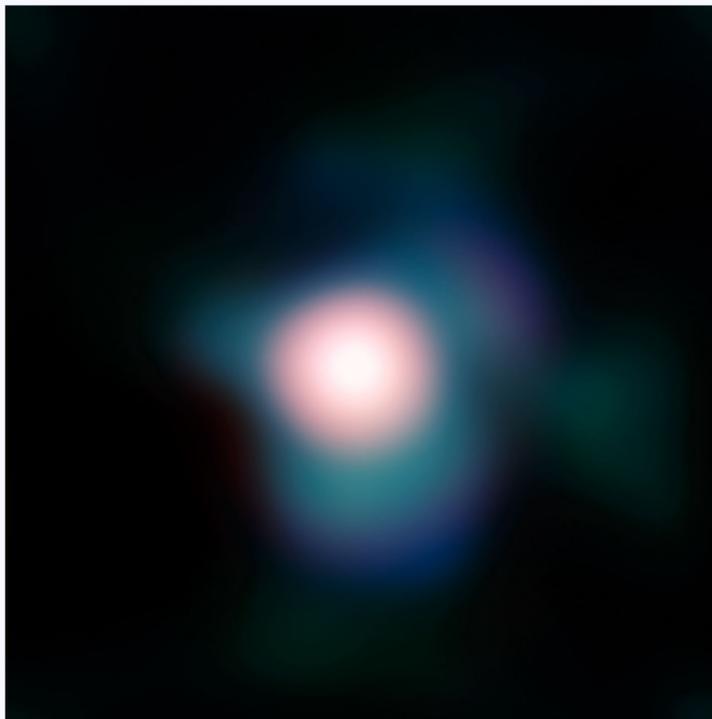
Etapa	Tiempo	Combustible	Ceniza	T $\times 10^6$ K
Hidrógeno	11 M años	H	He	35.0
Helio	2 M años	He	C, O	180
Carbono	2000 años	C	Ne, Mg	810
Neon	0.7 años	Ne	O, Mg	1600
Oxígeno	2.6 años	O, Mg	Si, S,	1900
		O, Mg	Ar, Ca	
Silicio	18 días	Si, S,	Fe, Ni,	3300
		Ar, Ca	Cr, Ti	
Hierro (colapso)	\sim 1 seg	Fe, Ni, Cr, Ti	Estrella de neutrones	7100

Evolución de una estrella de $15M_{\odot}$

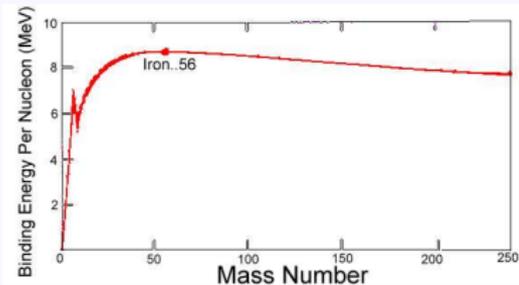
Supergigante



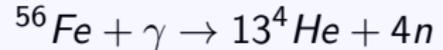
Supergigante



Colapso del núcleo: segundos



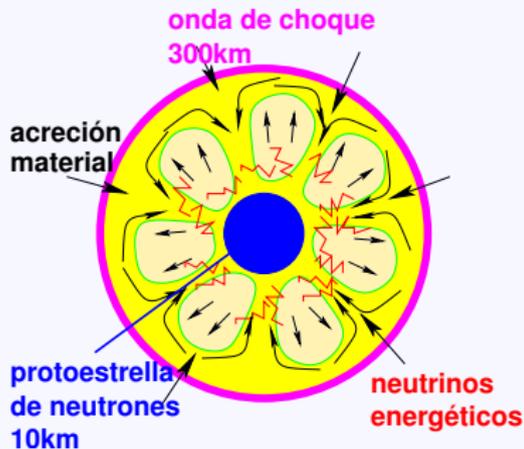
- ▶ Fotodesintegración de Fe



- ▶ Reacción endotérmica
- ▶ Captura de electrones



Supernova Tipo II



- ▶ Centro del núcleo se colapsa en 1 segundo
- ▶ Rebota y envía onda de choque
- ▶ Disociación de Fe estanca el choque
- ▶ Reaceleración por calentamiento por neutrinos
- ▶ Energía transferido al envolvente de H, He estalla la supernova

ii QUIZ!!