

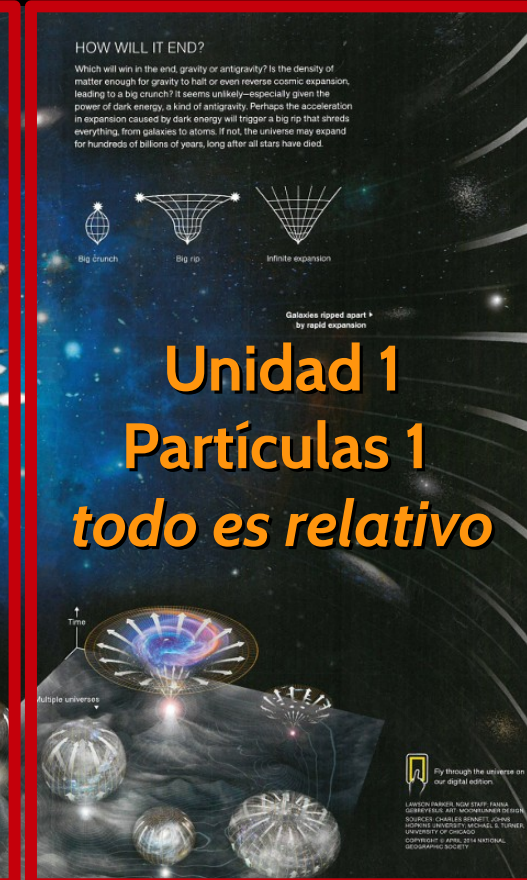
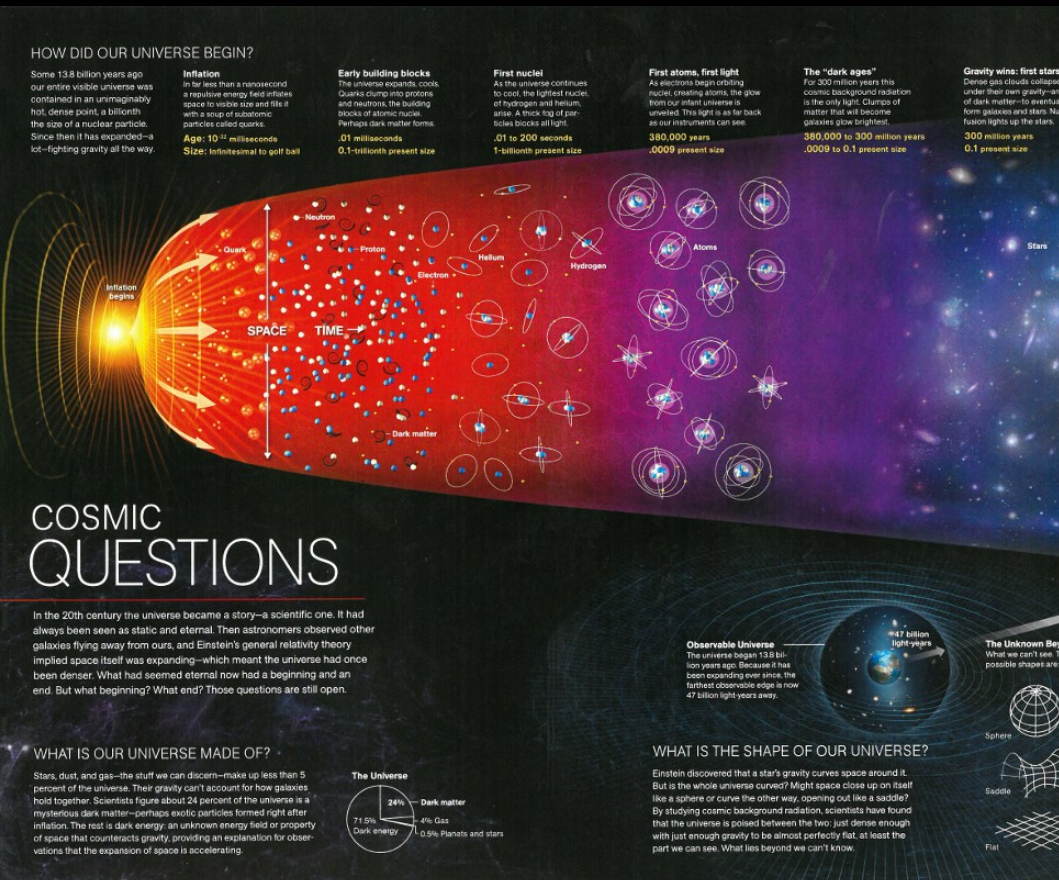
Universidad Nacional de Río Negro

Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2019

- **Unidad** 02 – Astrofísica: cálido y frío
- **Clase** U02 C03
- **Fecha** 09 Oct 2019
- **Cont** Estrellas – 2
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://asoreyh.github.io/unrn-ipac/>



Contenidos: un viaje en el tiempo



Nuestra fuente de energía



Es cómodo medir las cosas en términos solares

- Masa Solar:

$$M_{\text{Sol}} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg} \simeq 1000 M_{\text{Júpiter}} \simeq 333000 M_{\text{Tierra}}$$

- Radio Solar:

$$R_{\text{Sol}} = 6.96 \times 10^8 \text{ m} = 696000 \text{ km}$$

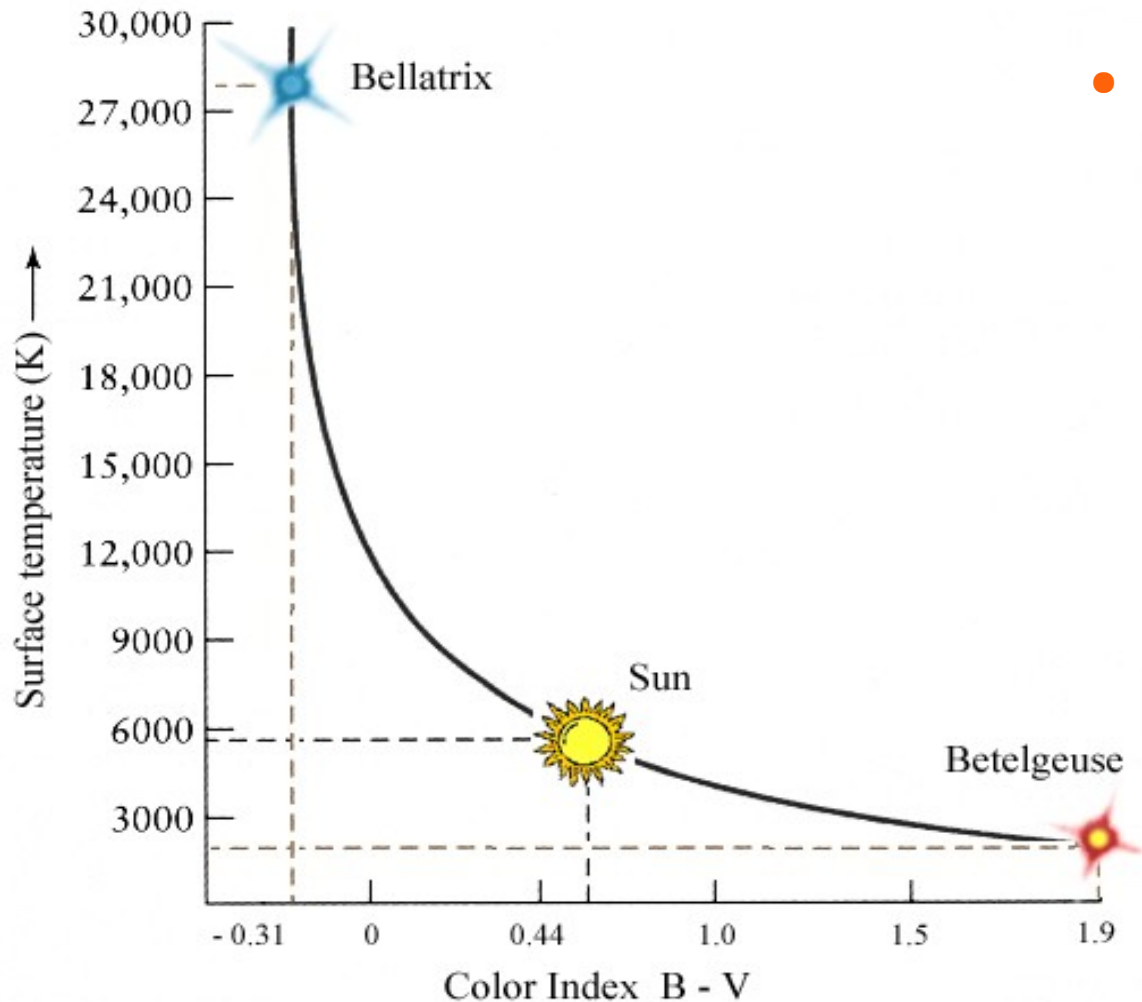
- Luminosidad Solar:

$$L_{\text{Sol}} = 3.83 \times 10^{26} \text{ W}$$

- Alto:

**1 segundo de energía liberada en el Sol
equivale a 800000 años de consumo humano (2013)**

Se observa que para estrellas, $B-V \rightarrow T$



- Índice B-V

- m_B = magnitud en el canal B
- m_V = magnitud en el canal V

$$(B-V) = m_B - m_V$$

(Recordar que m es logarítmica)

$$T = 4600 \left(\frac{1}{0.92(B-V) + 1.7} + \frac{1}{0.92(B-V) + 0.62} \right) K$$



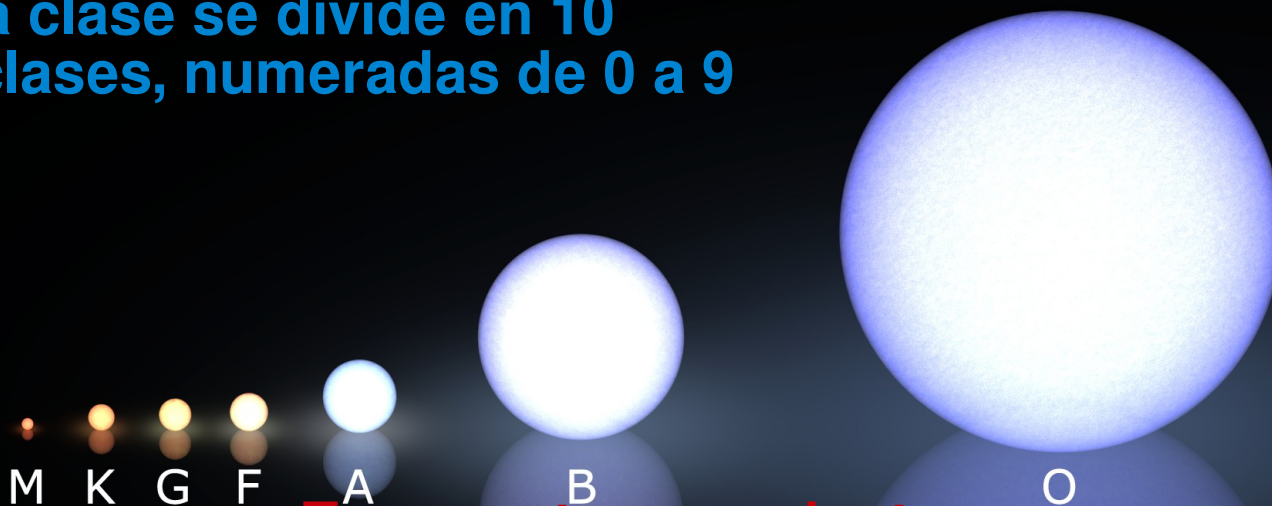
¡Podemos clasificarlas!

- A B C... por temperatura superficial

O B A F G K M R N S

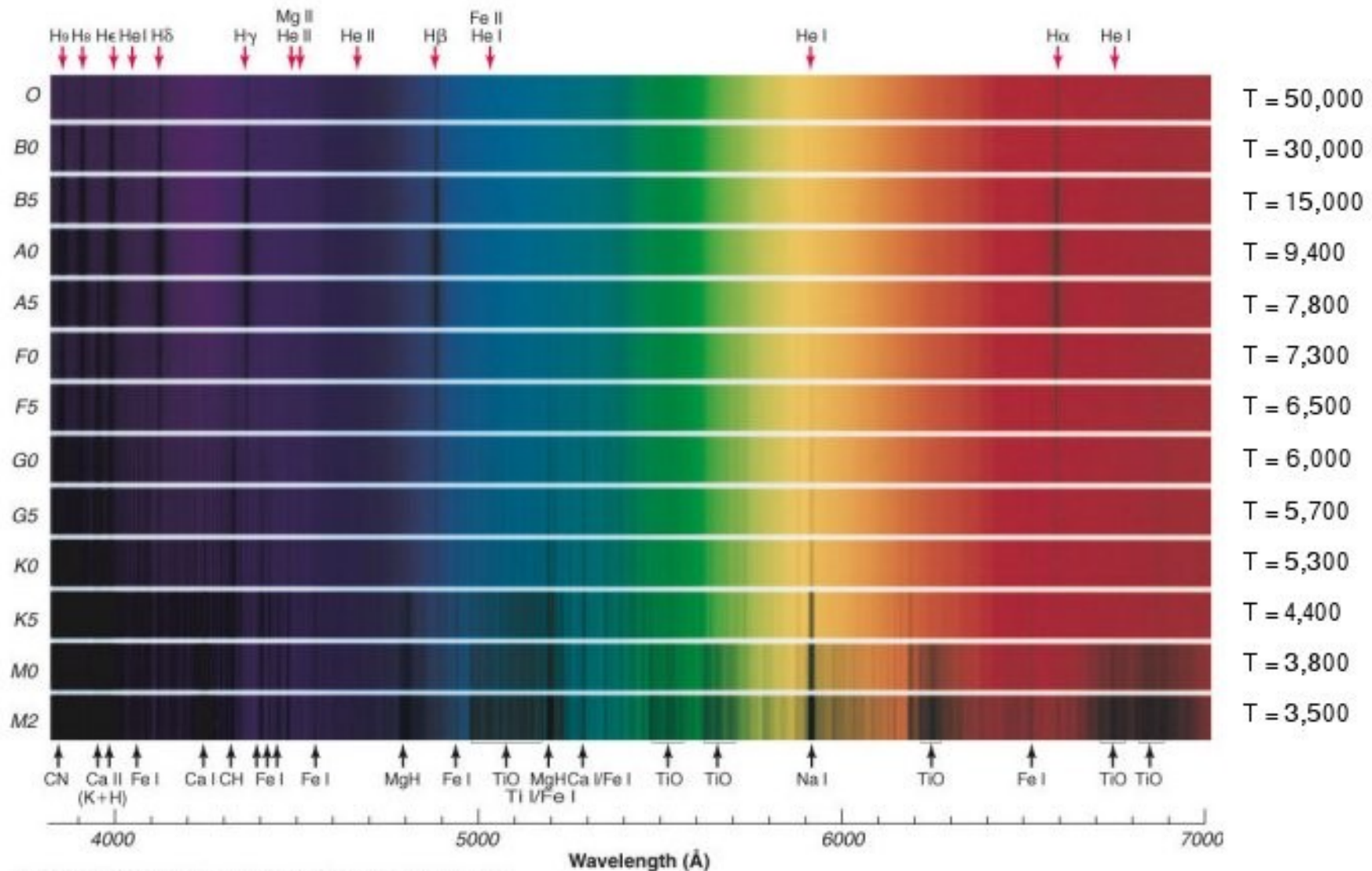
- Oh Be A Fine Girl and Kiss Me Right Now Sweet
- Oh Besame Amor, Fasinadora Gitana, Kilómetros Median Rompiendo Nuestros Sueños

Cada clase se divide en 10 subclases, numeradas de 0 a 9



Temperatura creciente →

Clasificación espectral



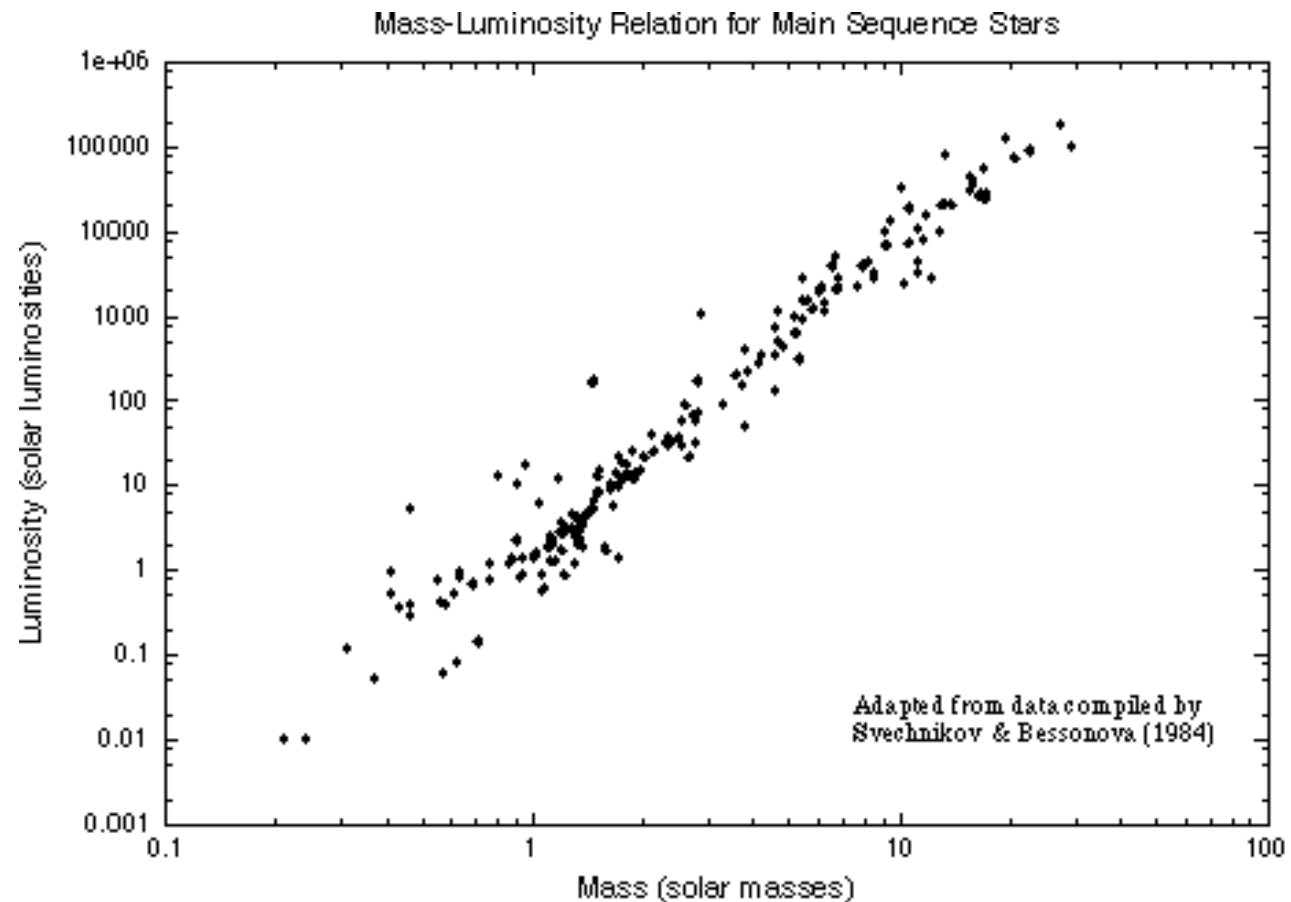
Roger Bell, University of Maryland, and Michael Briery, U. Wisconsin at Oshkosh

Luminosidad → Masa

- Si: $(0.1 < \text{Masa Estelar} < 50)$ masas solares:
L es proporcional a la M^4
- Nota: En general, M^a , con a entre 3 y 4 (~ masa)

$$\left(\frac{L_{\text{Estrella}}}{L_{\text{Sol}}} \right) = \left(\frac{M_{\text{Estrella}}}{M_{\text{Sol}}} \right)^4$$

Oct 09, 2019



- Veamos.... $(T_B/T_S)^4$

$$R_B = 1026 R_{Sol}$$

Betelgeuse es una supergigante roja

mas luminoso que Betelgeuse

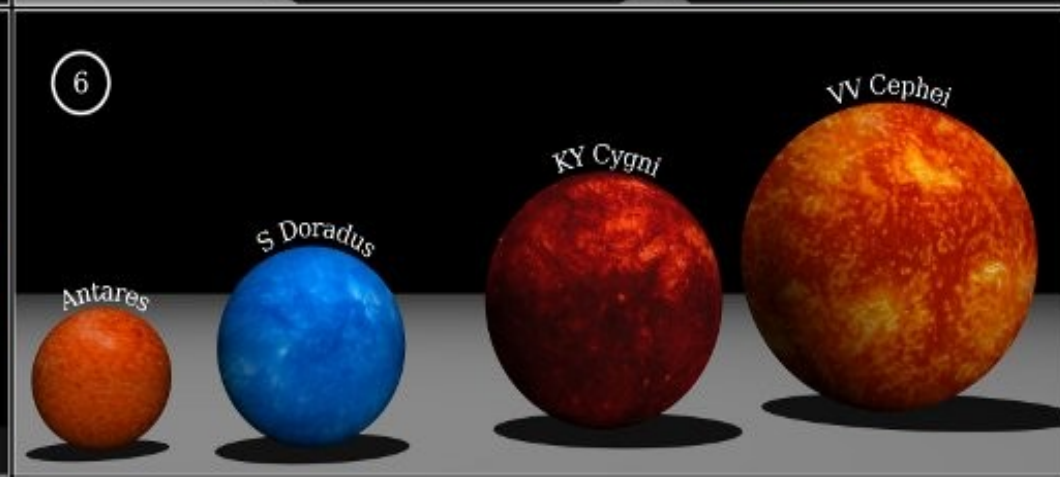
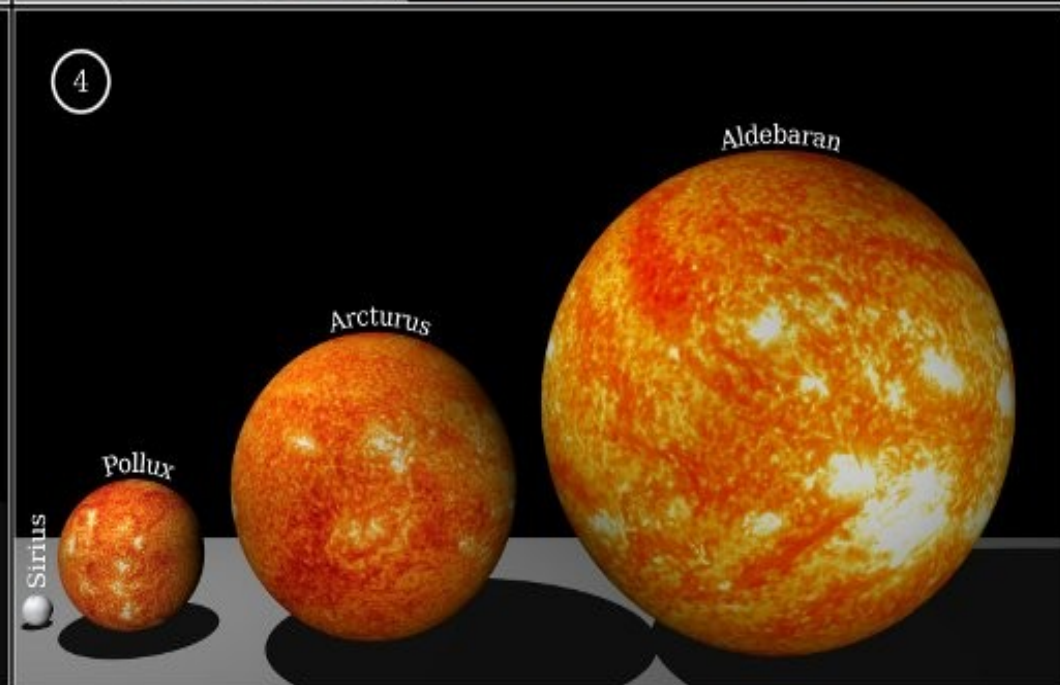
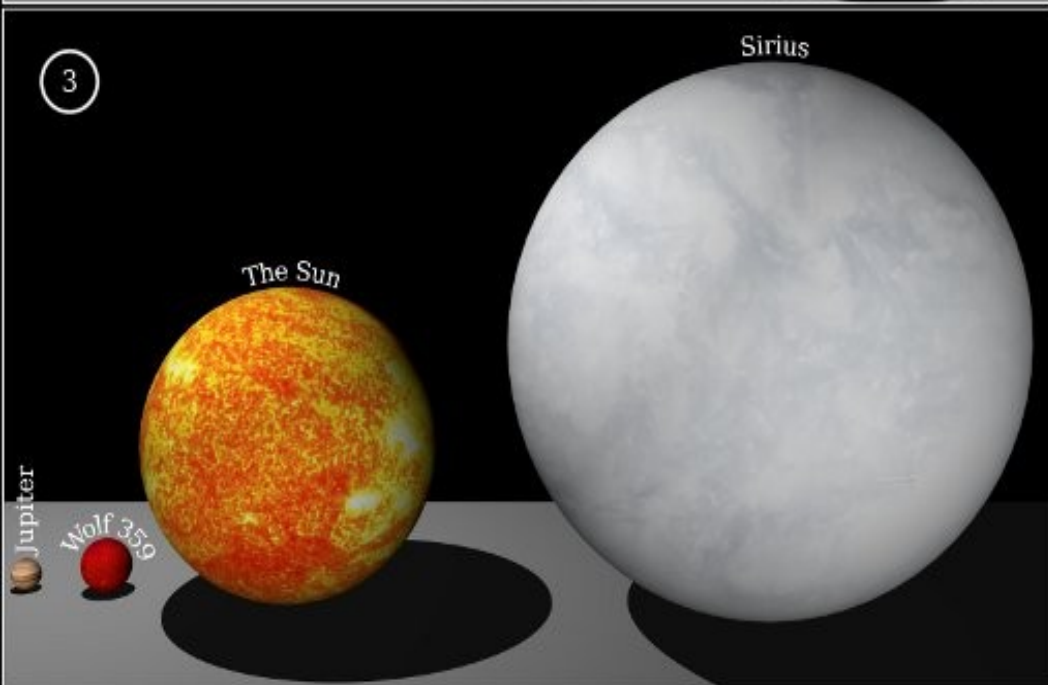
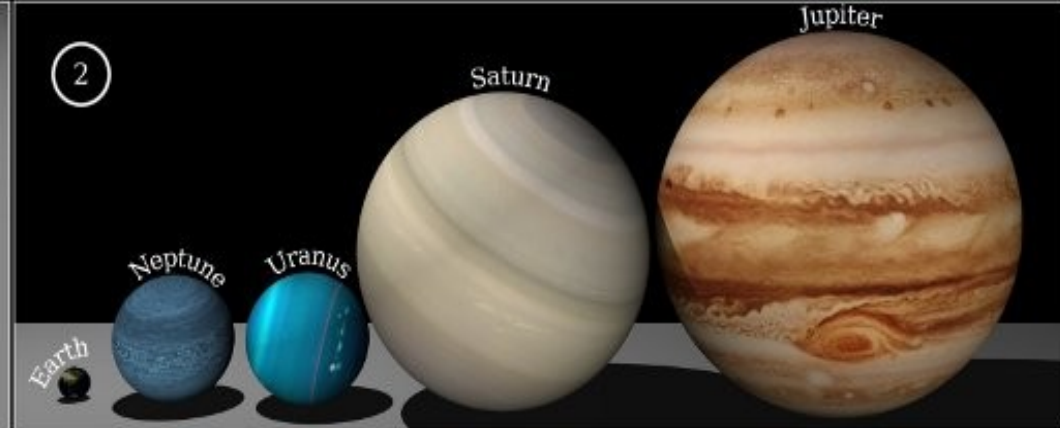
- Pero...

$$L_B / L_S = [(4\pi R_B^2) \sigma T_B^4] / [(4\pi R_S^2) \sigma T_S^4]$$

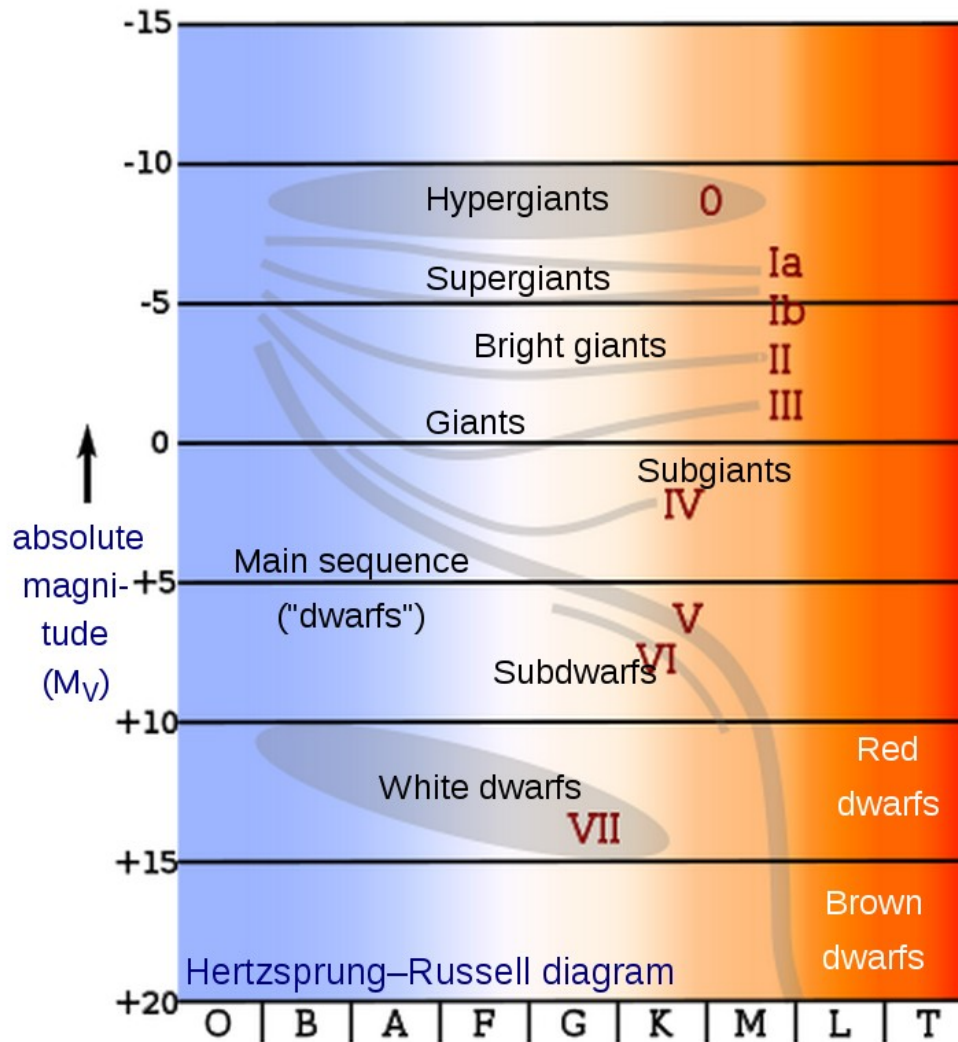
$$135000 = (R_B/R_S)^2 (T_B/T_S)^4$$

$$135000 = (R_B/R_S)^2 / 7.8$$

$$1.053 \times 10^6 = (R_B/R_S)^2$$

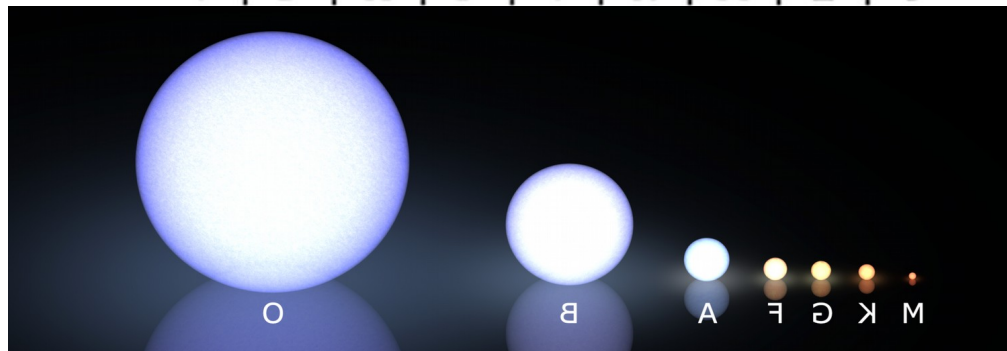


Dijimos que la masa define todo

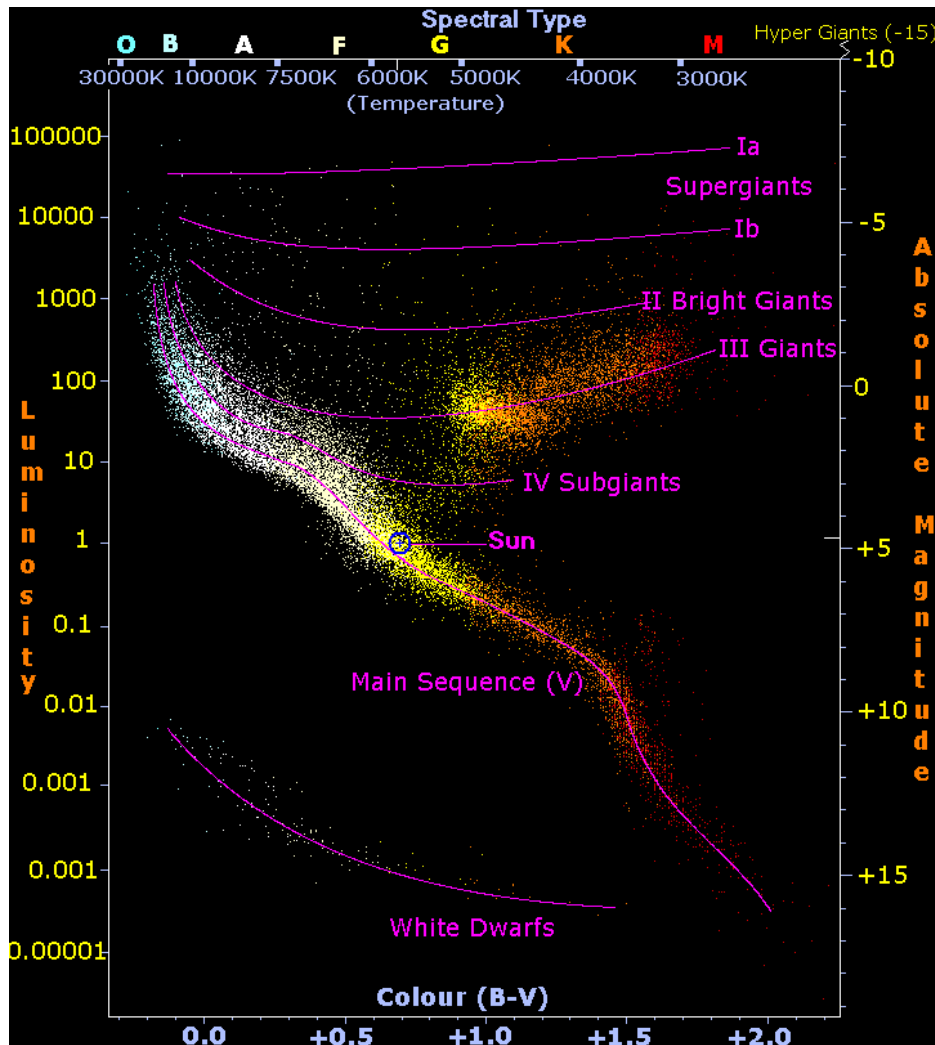


Surface temperature ranges for different stellar classes^[134]

Class	Temperature	Sample star
O	33,000 K or more	Zeta Ophiuchi
B	10,500–30,000 K	Rigel
A	7,500–10,000 K	Altair
F	6,000–7,200 K	Procyon A
G	5,500–6,000 K	Sun
K	4,000–5,250 K	Epsilon Indi
M	2,600–3,850 K	Proxima Centauri

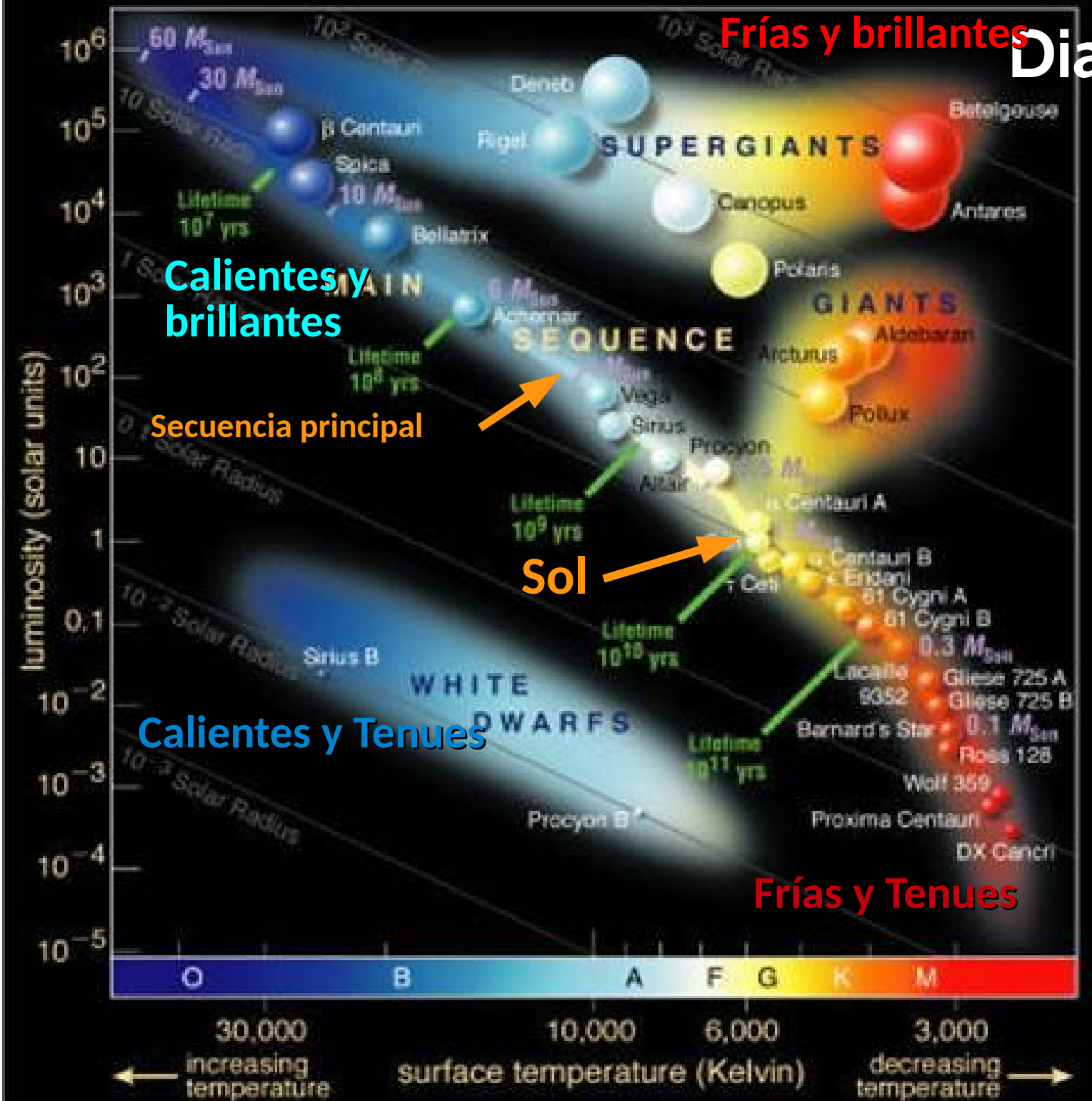


Secuencia principal



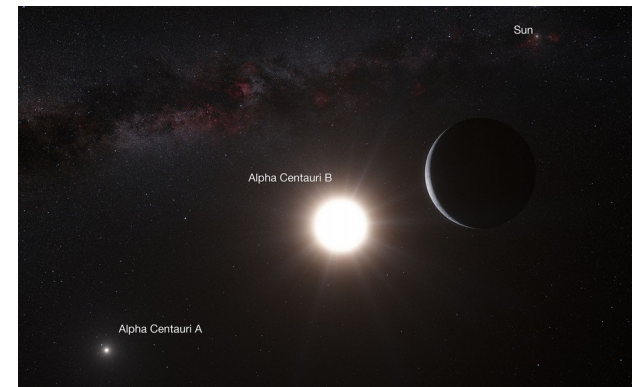
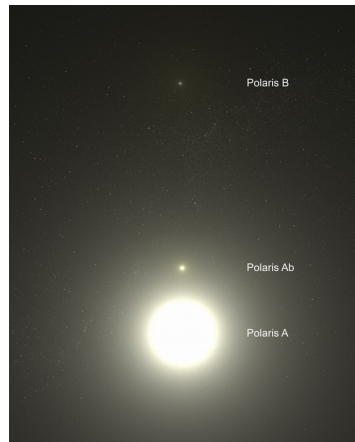
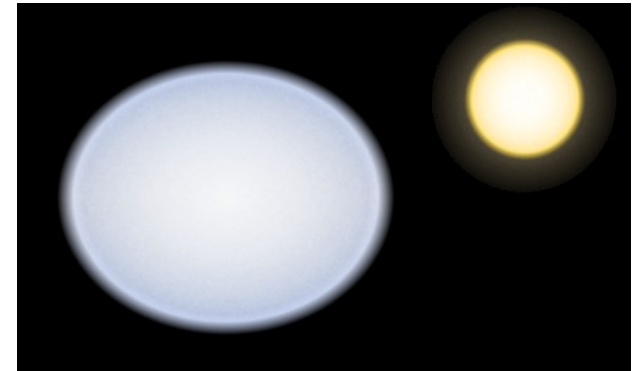
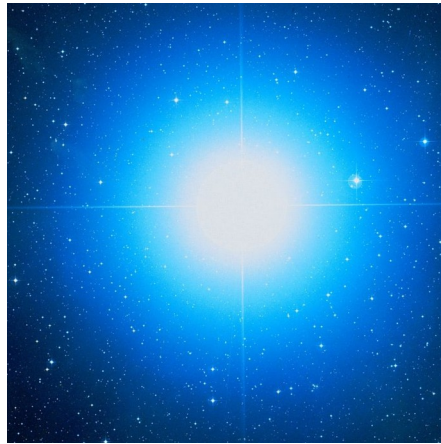
- Estrellas que están en su fase normal de quema de combustible:
 $H \rightarrow He$
- 90% del tiempo de vida las estrellas permanecen en este estadio
- **Metalicidad:** contenido de elementos más masivos que el Helio

Diagrama H-R



$$L \sim R^2 T^4$$

Secuencia principal → OBAFGKM





SPECTRAL CLASS O
 Dark Blue
 28,000 - 50,000 K
 Ionized Atoms, especially helium
 Example: Mintaka (O1-3III)



SPECTRAL CLASS B
 Blue
 10,000 - 28,000 K
 Neutral helium, some hydrogen
 Alpha Eridani A (B3V-IV)



SPECTRAL CLASS A
 Light Blue
 7,500 - 10,000 K
 Strong hydrogen, some ionized metals
 Sirius A (A0-IV)



SPECTRAL CLASS F
 White
 6,000 - 7,500 K
 Hydrogen and ionized metals,
 calcium and iron
 Procyon A (F5V-IV)

Yellow
 5,000 - 6,000 K
 Ionized calcium, both neutral and
 ionized metals
 Example: Sol (G2V)

SPECTRAL CLASS G



Orange
 3,500 - 5,000 K
 Neutral Metals
 Alpha Centauri B (K0-3V)

SPECTRAL CLASS K



Red
 2,500 - 3,500 K
 Ionized atoms, especially helium
 Wolf 359 (M5-8V)

SPECTRAL CLASS M



Non-Main Sequence Types

- Class W: Wolf-Rayet Star
 - Up to 70,000 K
 - Carbon, nitrogen, or oxygen
 - Gamma Velorum A (WC)
- Class L: Dwarf Star
 - 1,300 - 2,000 K
 - Metal hydrides and alkali metals
 - VW Hyi
- Class T: Methane Dwarf
 - 700 - 1,000 K
 - Methane
 - Epsilon Indi Ba
- Class Y: Ammonia Dwarf
 - <700 K
 - Ammonia
 - Not yet observed
- Class C: Carbon
- Class S: Zirconium Oxide
- Classes MS and SC
- Class D: Dwarf

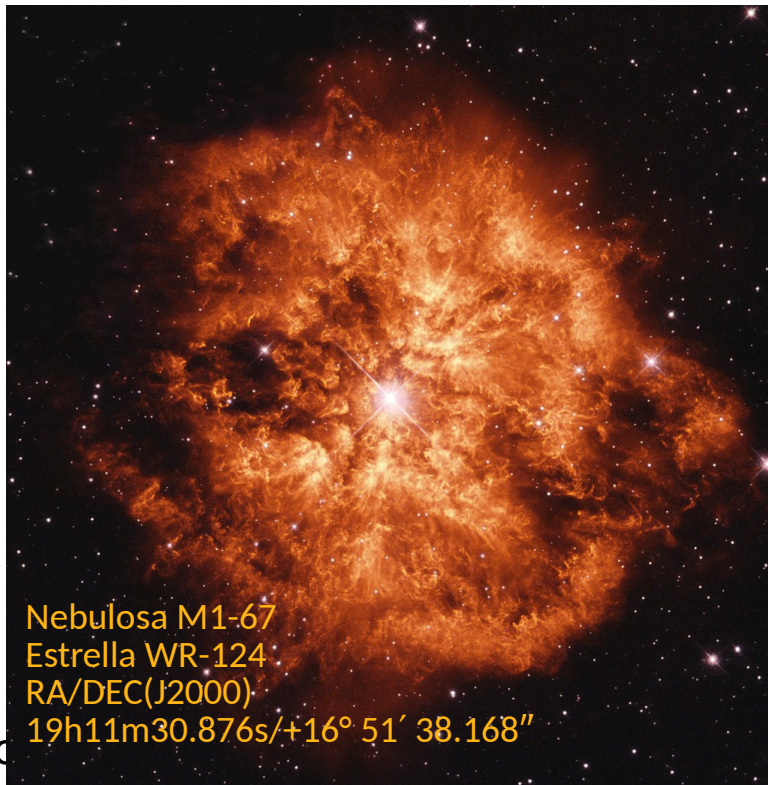
Otros tipos de estrellas

- **W: Wolf-Rayet**

- Estrellas masivas ($>20M_{\odot}$)
- Excesivamente calientes

- **Los nuevos: L, T, Y**

- **L:** Enanas frías o subestrellas, temperaturas $1300K < T < 2400K$
- **T:** Enanas marrones (subestrellas, sin fusión H) con prominencia de metano y $500K < T < 1300K$
- **Y:** enanas marrones ultra frías (superplanetas?) c/amoniaco y $T < 600K$, y $10 < M/M_{Júp} < 90$



Nebulosa M1-67
Estrella WR-124
RA/DEC(J2000)
19h11m30.876s/+16° 51' 38.168"

Estrellas supermasivas



NGC3372 – Nebulosa Carina (Carina)

Estrellas supermasivas



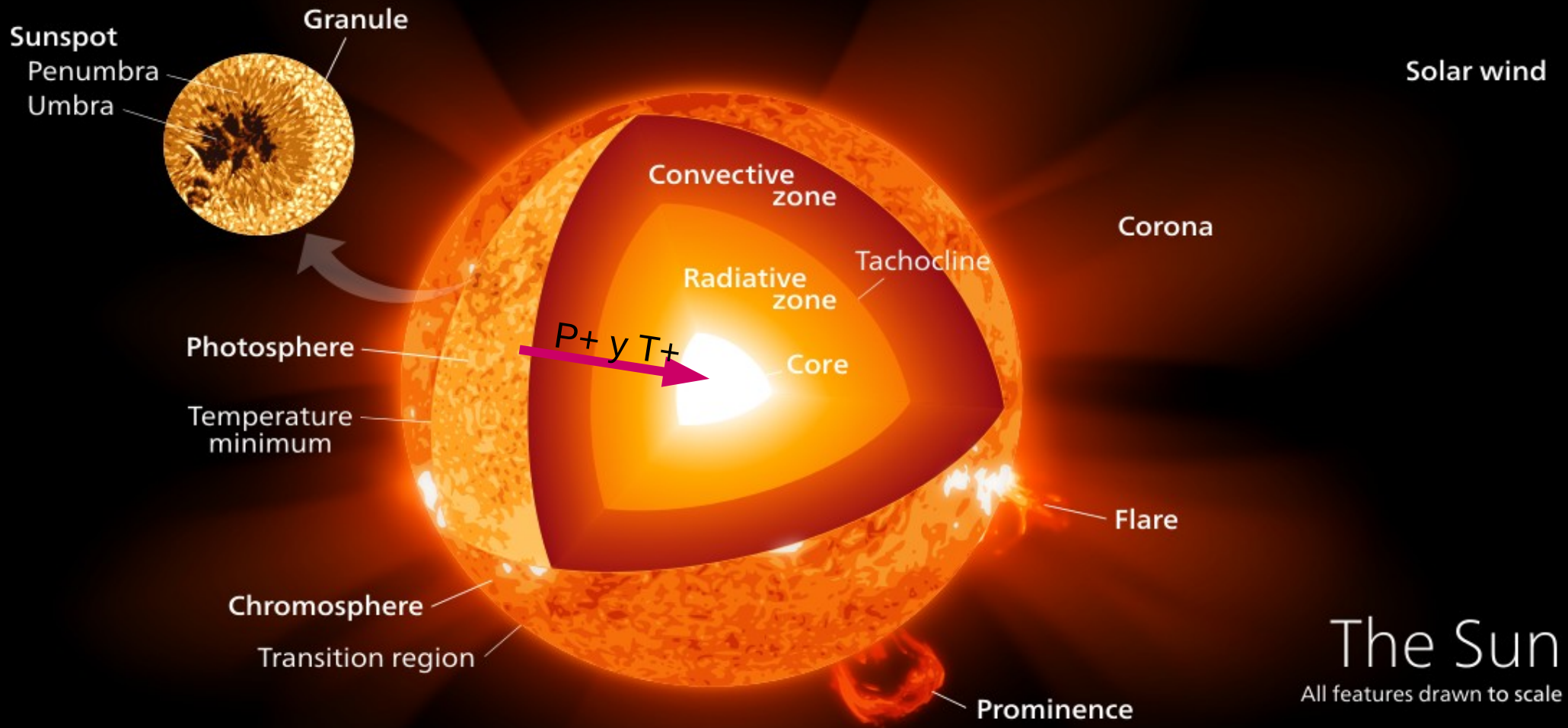
NGC3372 – Nebulosa Carina (Carina)

η Carinae: Una binaria a punto caramelo



Nebulosa Homúnculo en la Nebulosa Eta Carina (en la Nebulosa Carina)

Estructura de una estrella típica (Sol)

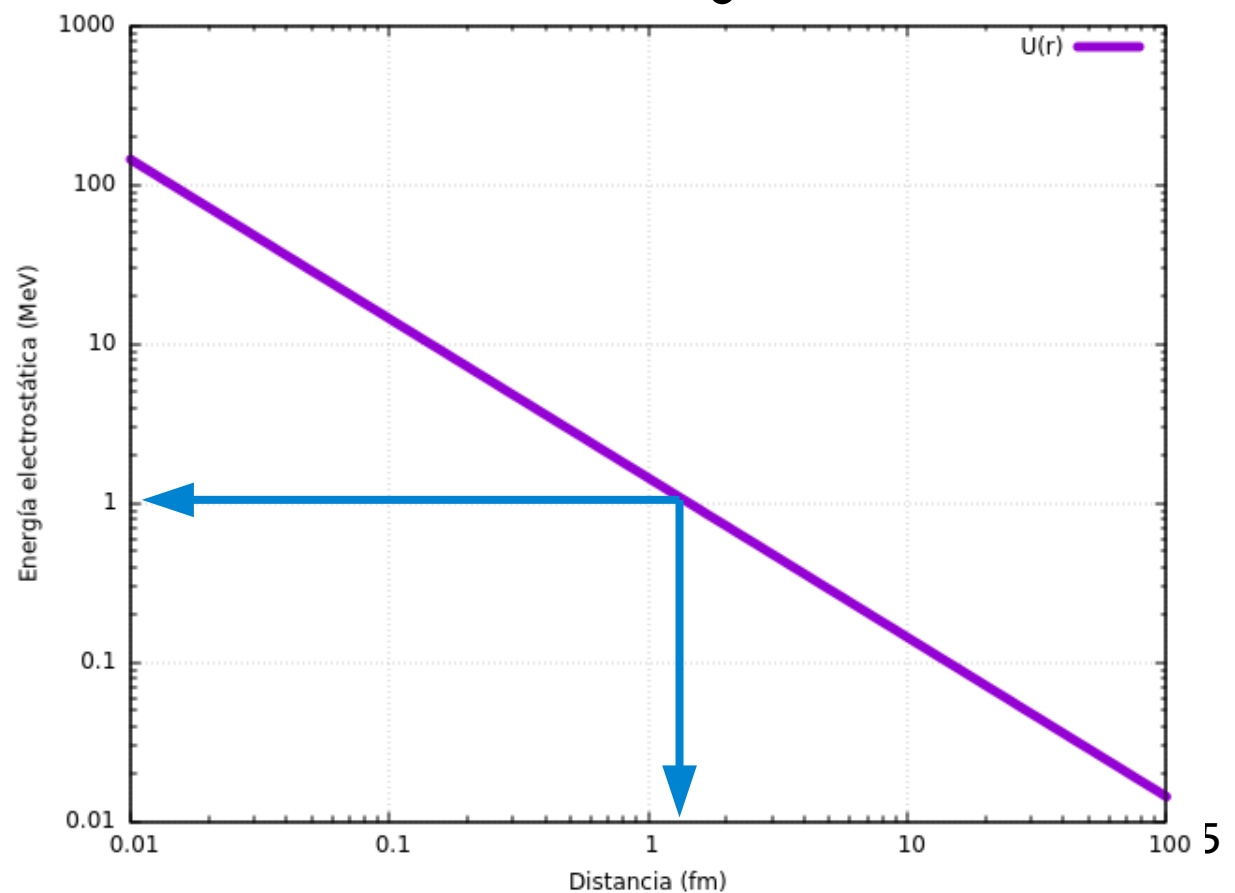


Barrera Coulombiana

- Recordar, para dos cargas eléctricas puntuales,

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \rightarrow U_{pp}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

- Poniendo valores:
 $r \sim 1.2 \text{ fm}$
 $U_{pp}(r) \sim 1 \text{ MeV}$
- $E \sim 3/2 k T \rightarrow$
 $\text{iii } T \sim 2 \times 10^{10} \text{ K} !!!$



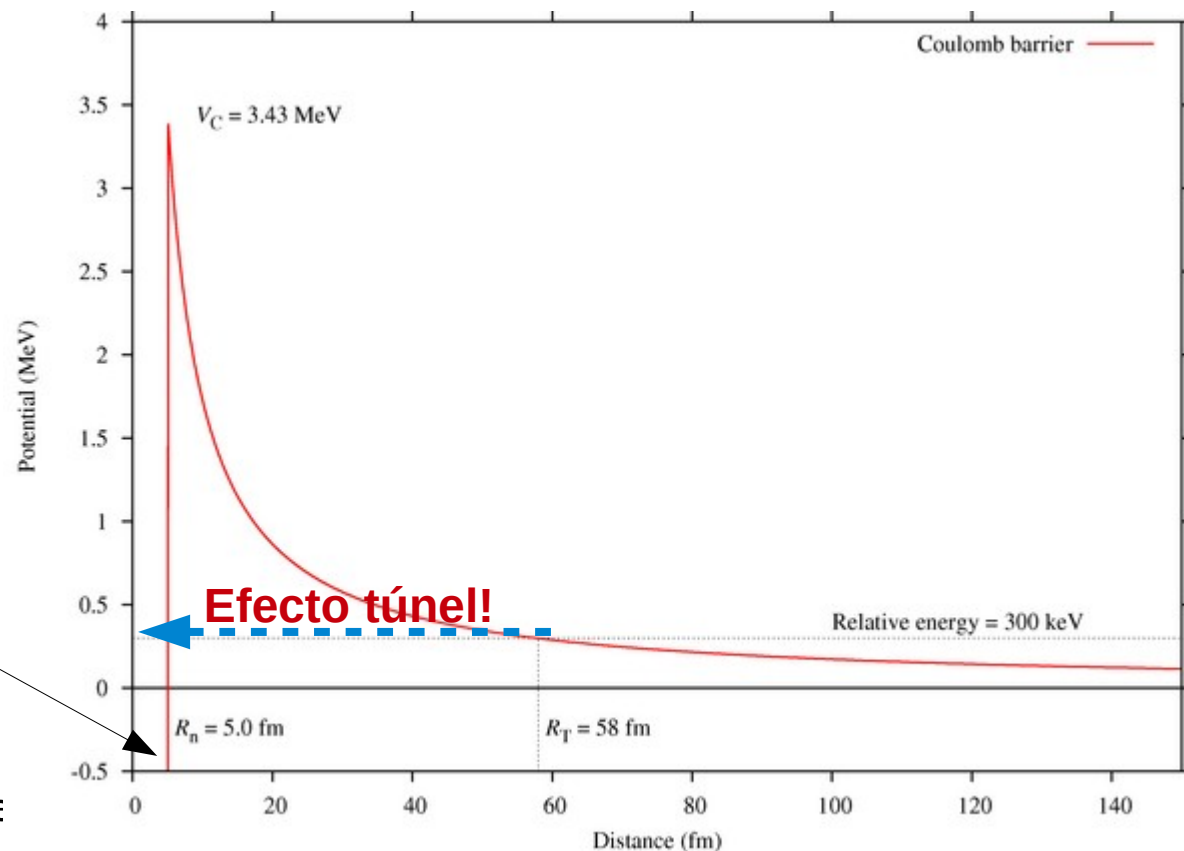
Sistemas compuestos y potencial nuclear

- En general, para dos núcleos AX_Z y AY_Z , entonces

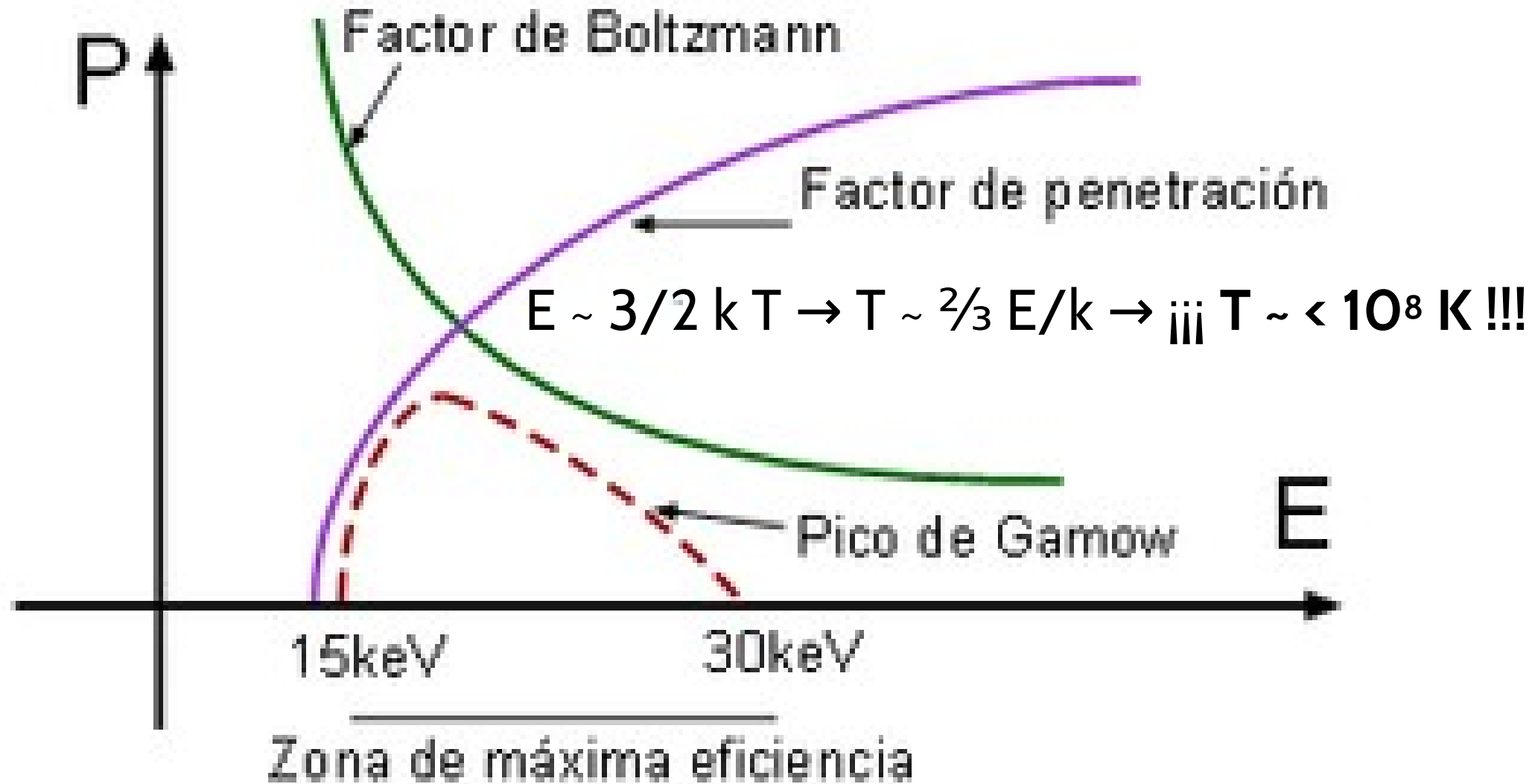
$$U_{XY}(r) = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{Z_X Z_Y}{A_X^{1/3} + A_Y^{1/3}} \right) \frac{1}{r} \rightarrow U_{XY}(r) \simeq 1.44 \left(\frac{Z_X Z_Y}{A_X^{1/3} + A_Y^{1/3}} \right) \frac{1}{r} \text{ MeV}$$

- Barrera de Coulomb.
Por ej., ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$:

**A distancias cortas,
el potencial nuclear es atractivo!**



Efecto túnel → Pico de Gamow (1928)

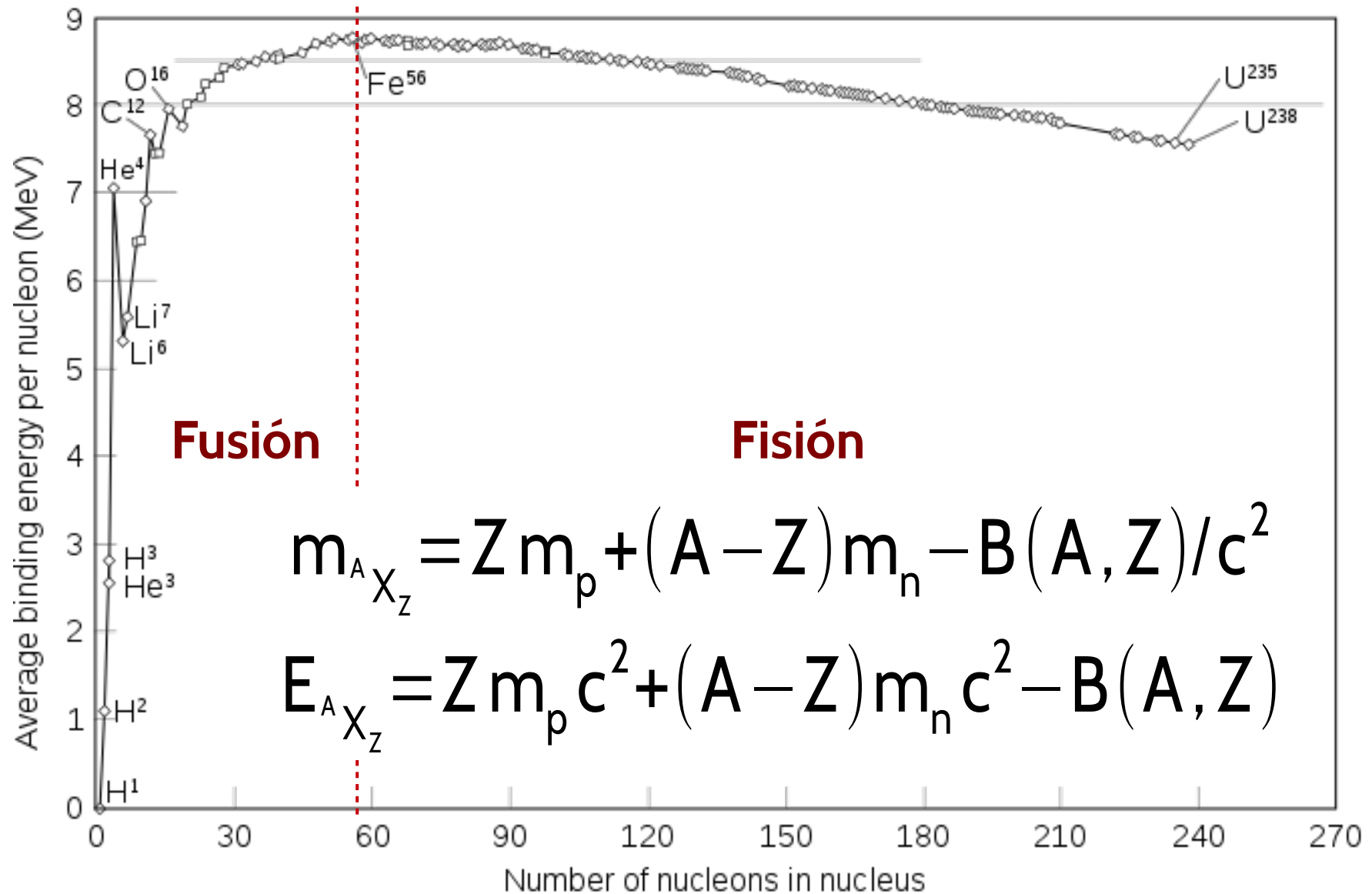




En estrellas como el Sol

- La temperatura central es $10 \text{ MK} < T < 20 \text{ MK}$
- El tiempo de reacción es $\sim 10^9$ años!!
- Hay tanto hidrógeno que el ritmo de reacción es sostenible (volveremos....)

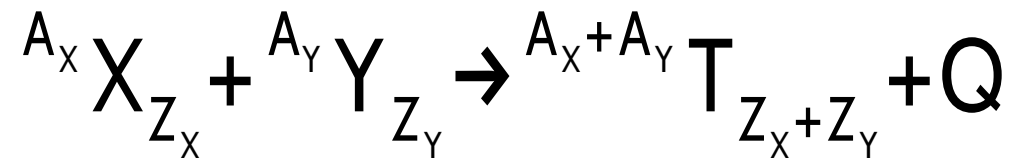
Energías de ligaduras



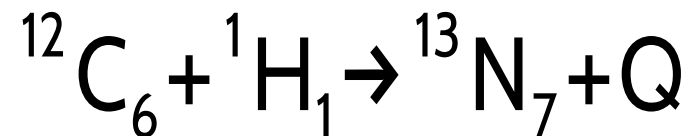
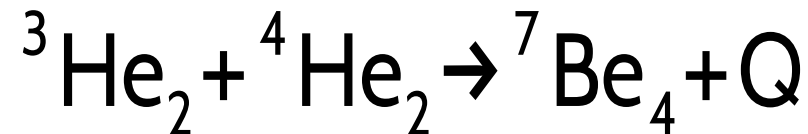


Proceso de fusión

- Dos núcleos se fusionan liberando energía:



- Por ejemplo:



- Y entonces, la energía liberada será

$$Q = \left(m_{\text{reactivos}} - m_{\text{productos}} \right) c^2$$

Energía liberada en un proceso de fusión



$$m_{3\text{He}} = 2m_p + (3-2)m_n - B(3,2) = 2m_p + m_n - B(3,2)$$

$$m_{4\text{He}} = 2m_p + (4-2)m_n - B(4,2) = 2m_p + 2m_n - B(4,2)$$

$$m_{7\text{Be}} = 4m_p + (7-4)m_n - B(7,4) = 4m_p + 3m_n - B(7,4)$$

$$\Rightarrow Q = m_{3\text{He}} + m_{4\text{He}} - m_{7\text{Be}}$$

$$\Rightarrow Q = \cancel{2m_p + m_n - B(3,2)} + \cancel{2m_p + 2m_n - B(4,2)} - \cancel{4m_p + 3m_n - B(7,4)}$$

$$\Rightarrow Q = B(7,4) - B(3,2) - B(4,2). \text{ Usando las tablas (ojo, es } B/A \text{ entable)} \Rightarrow$$

$$Q = 5,37 \text{ MeV} \cdot 7 - 2,572 \text{ MeV} \cdot 3 - 7,07 \text{ MeV} \cdot 4 = 1,594 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow Q = 1,594 \text{ MeV} > 0.$$

En general

$$Q = B_{\text{producto}} - \sum B_{\text{reactivos}}$$

Si $Q > 0$ la fusión es un proceso de liberación de energía



Energía liberada en un proceso de fusión

- Entonces:

$$Q = B_{\text{productos}} - \sum B_{\text{reactivos}}$$

- Los valores de $B(A,Z)$ pueden obtenerse de tablas
- Ver por ejemplo:

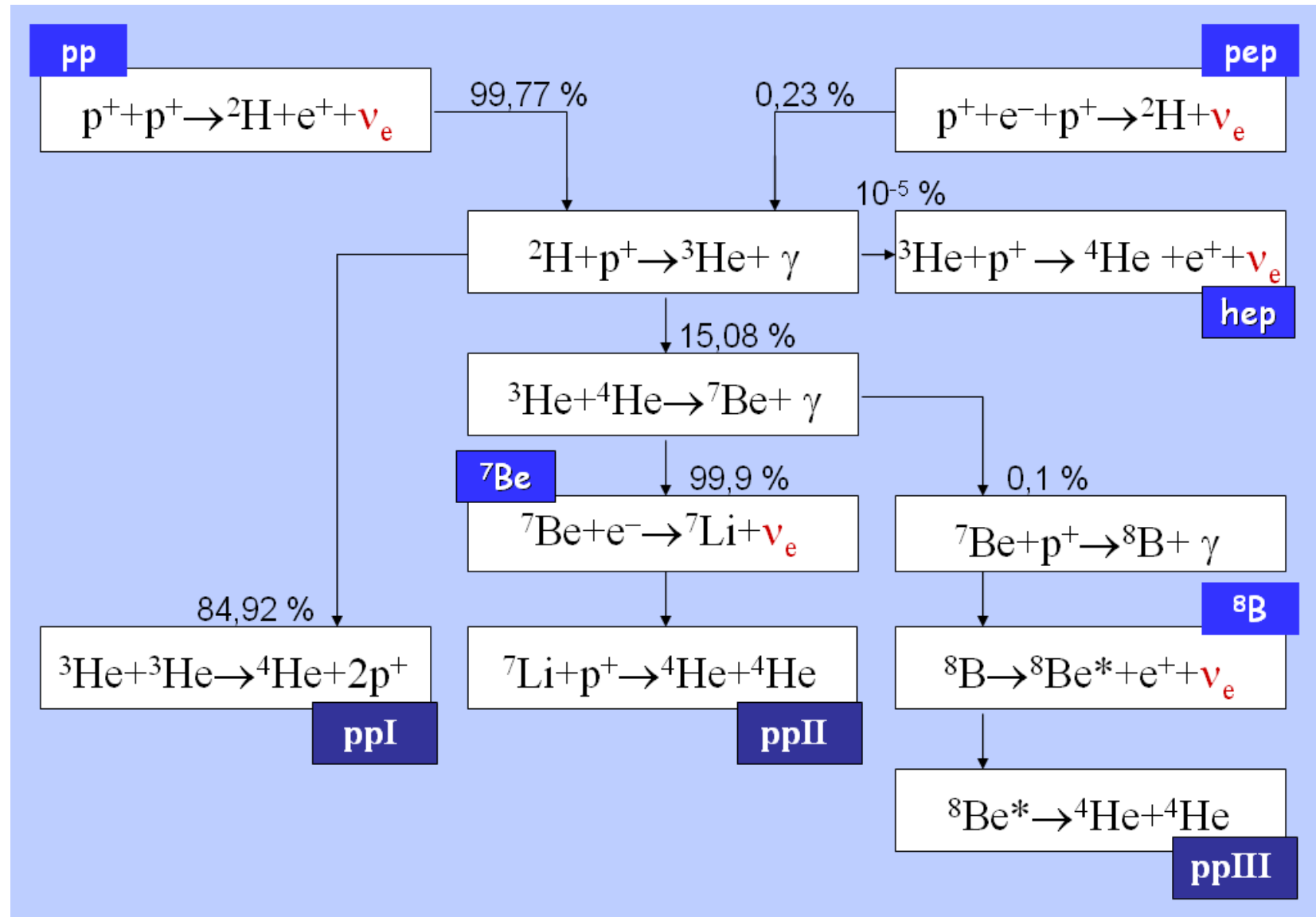
<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

también en Google play!:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=iaea.nds.nuclides>

- Tener en cuenta que en la mayoría de las tablas se reporta la energía de ligadura por nucleón, es decir, B/A

La cadena protón protón (*pp chain*)



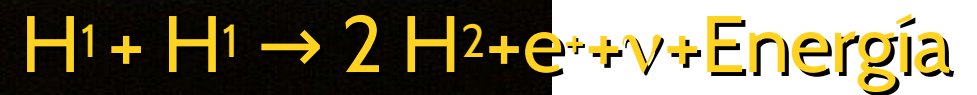
Fusión: Paso 1

STEP 1

H^1

+

H^1



e^+

+

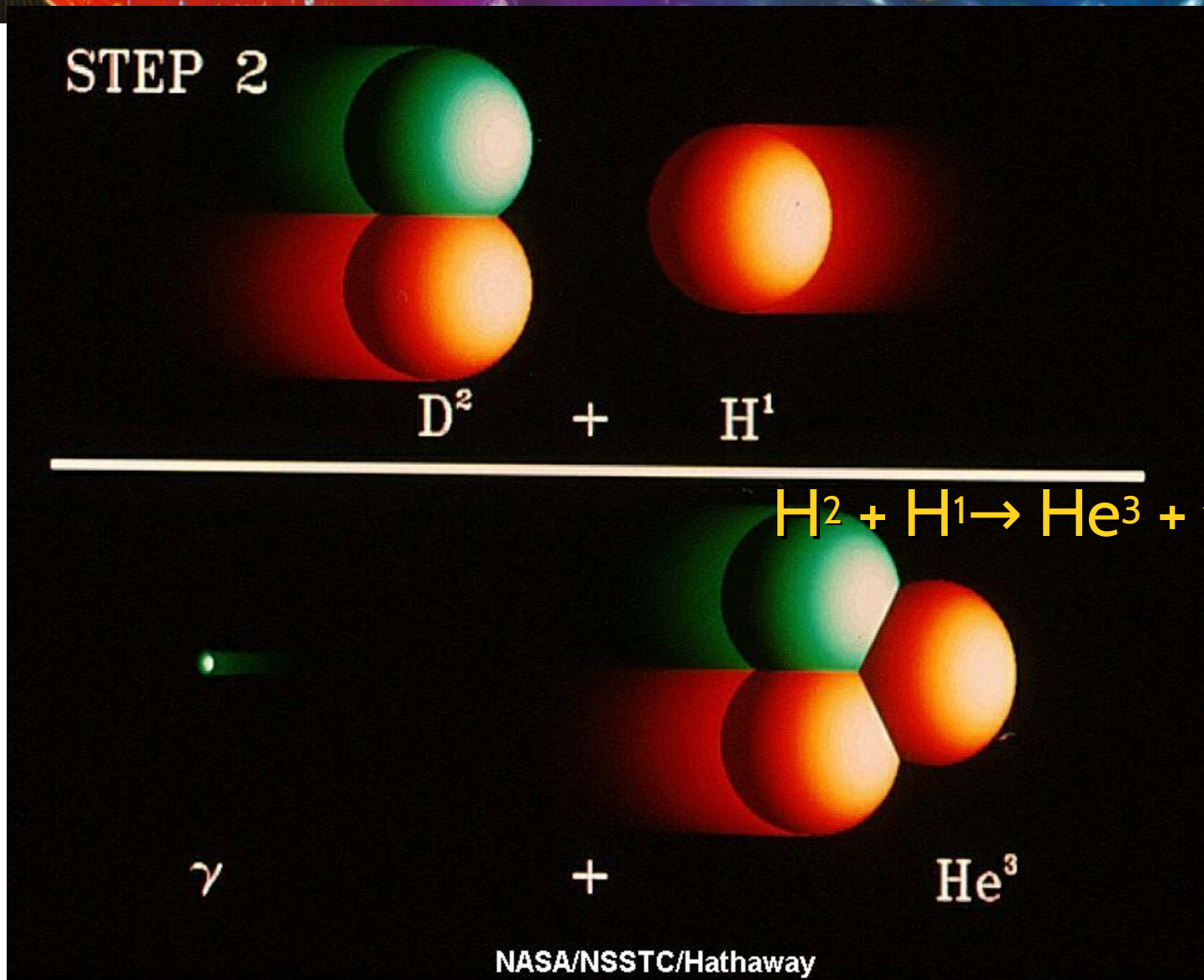
D^2

+

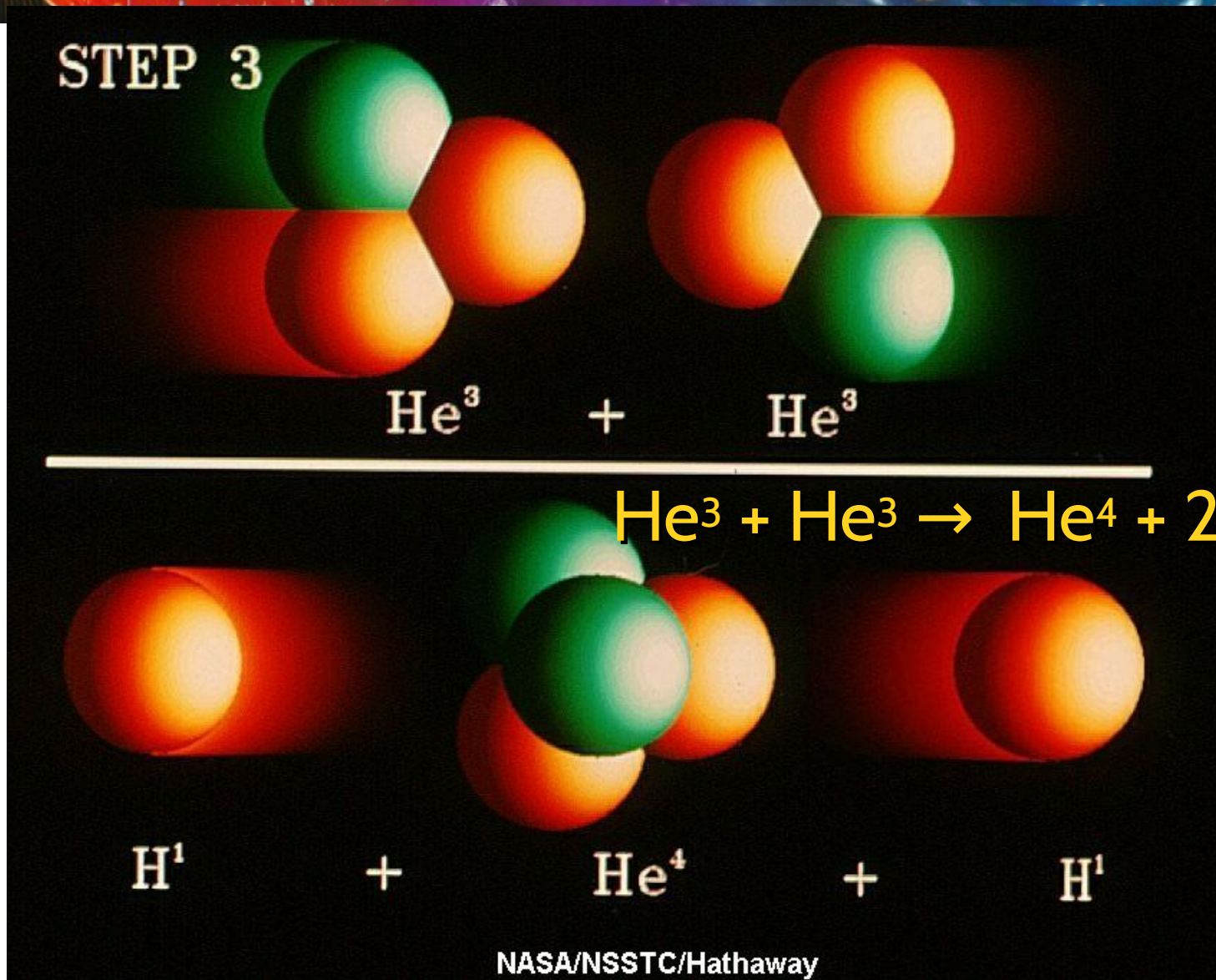
ν

NASA/NSSTC/Hathaway

Fusión: Paso 2



Fusión: Paso 3





Fusión: Producción neta



Masa inicial: $1.003 \times 10^{-26} \text{ kg}$

Masa final: $0.991 \times 10^{-26} \text{ kg}$

$$E=mc^2$$

$\sim 26,7 \text{ MeV}$ por reacción



La conservación de energía implica

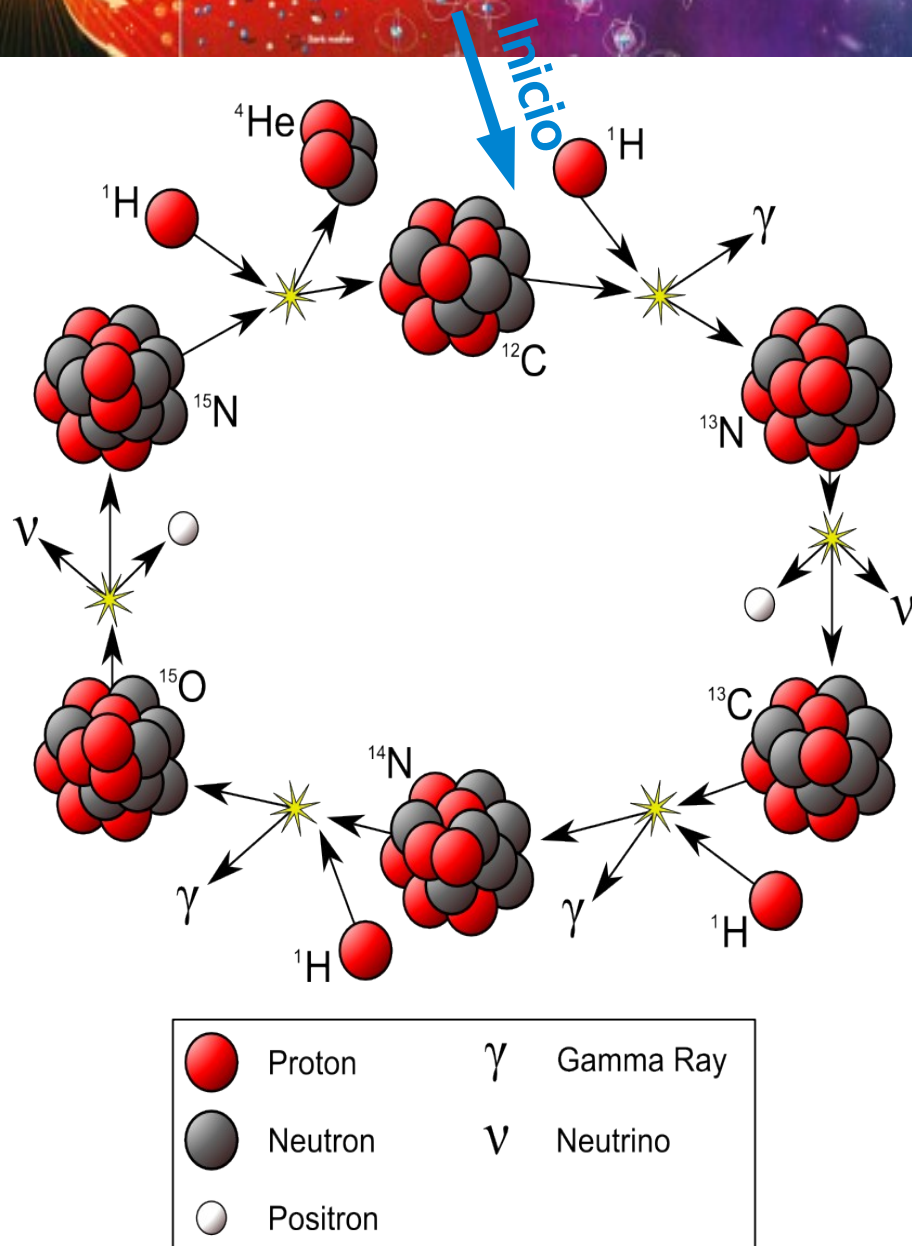
- Para el Sol:

$L = 3.846 \times 10^{26} \text{ J/s}$ y sabiendo que $E_1 = 26.73 \text{ MeV}$

$$L = nE_1 \rightarrow n = \frac{L}{E_1} \simeq 9 \times 10^{37} \text{ reacciones/s}$$

**Conversión de masa en energía:
4.000.000 toneladas/seg**

En estrellas más masivas, además.... ciclo CNO



- Ciclo CNO (Carbono, Nitrógeno, Oxígeno)
- Usa el CNO como “catalizador”
- La reacción neta convierte $4p \rightarrow \text{He} + \text{neutrinos} + Q$, al igual que la cadena pp
- Libera la misma cantidad de energía neta por reacción (26.73 MeV)