

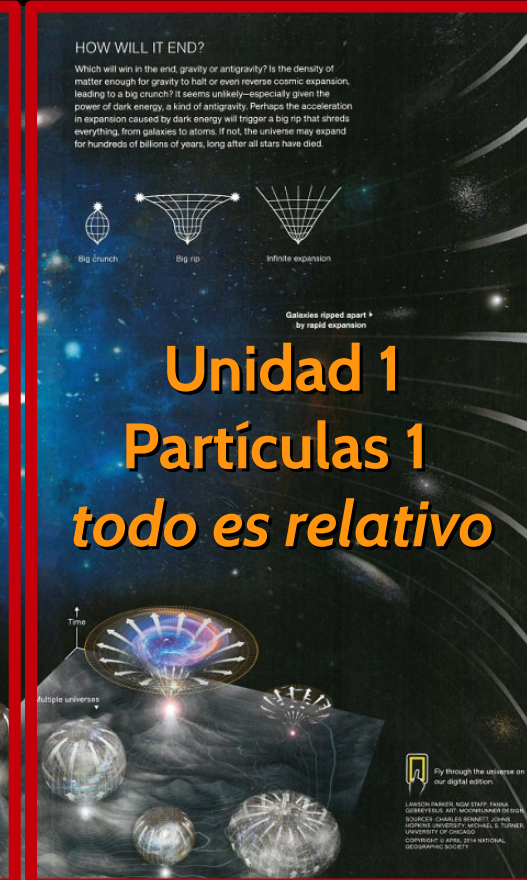
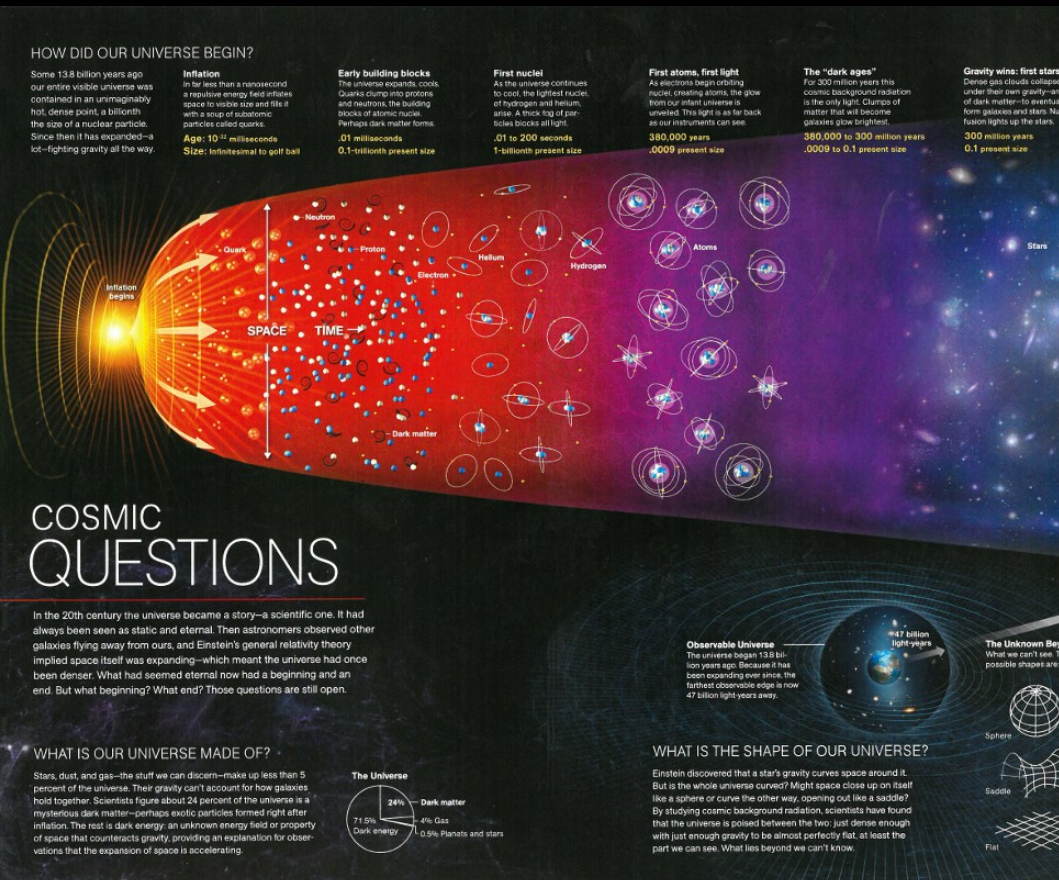
# Universidad Nacional de Río Negro

## Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2018

- **Unidad** 02 – Astrofísica: cálido y frío
- **Clase** U02 C05
- **Fecha** 17 Oct 2018
- **Cont** Estrellas – 2
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://asoreyh.github.io/unrn-ipac/>
- **Youtube** <https://goo.gl/UZJzLk>



# 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:

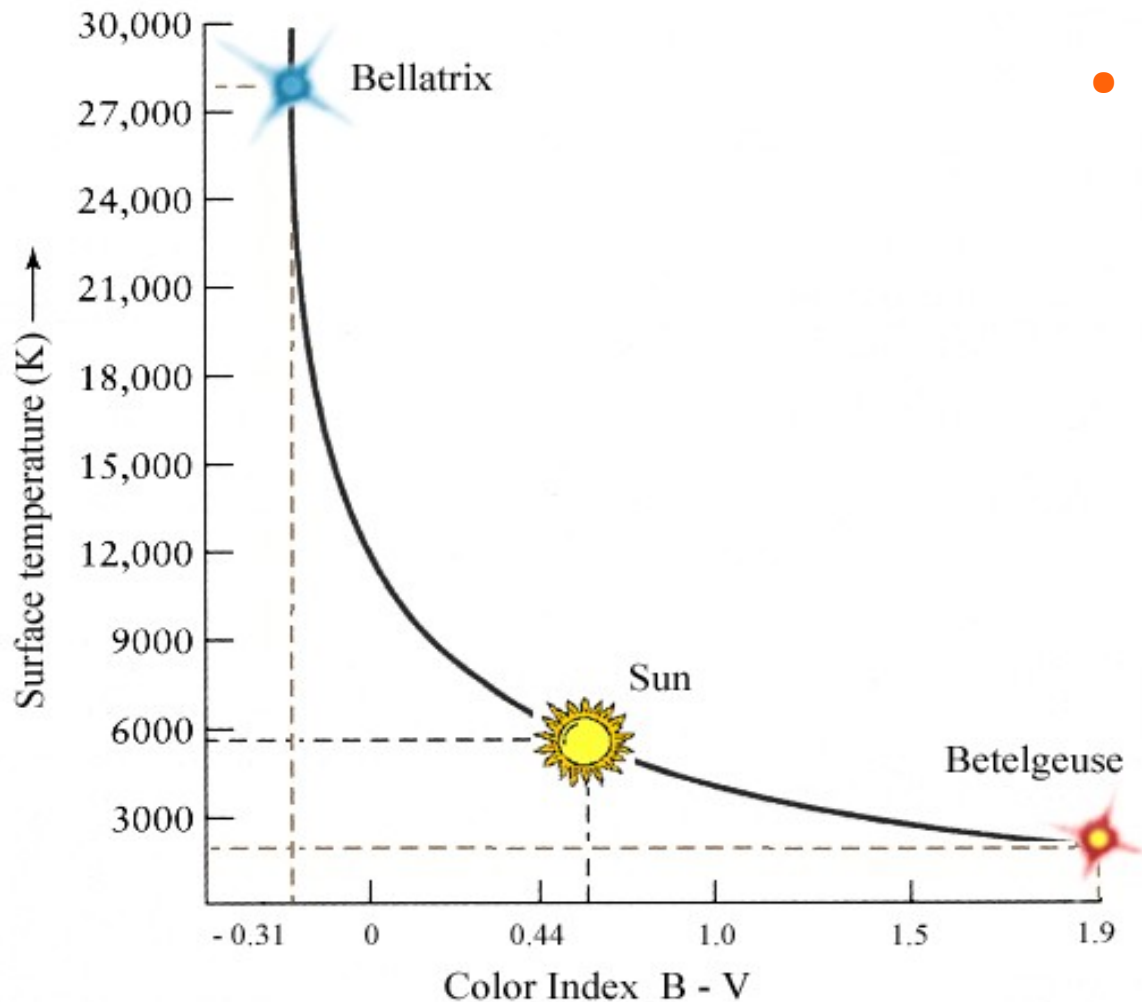
$$L_{\text{Sol}} = 3.83 \times 10^{26} \text{ W}$$

- 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 →**





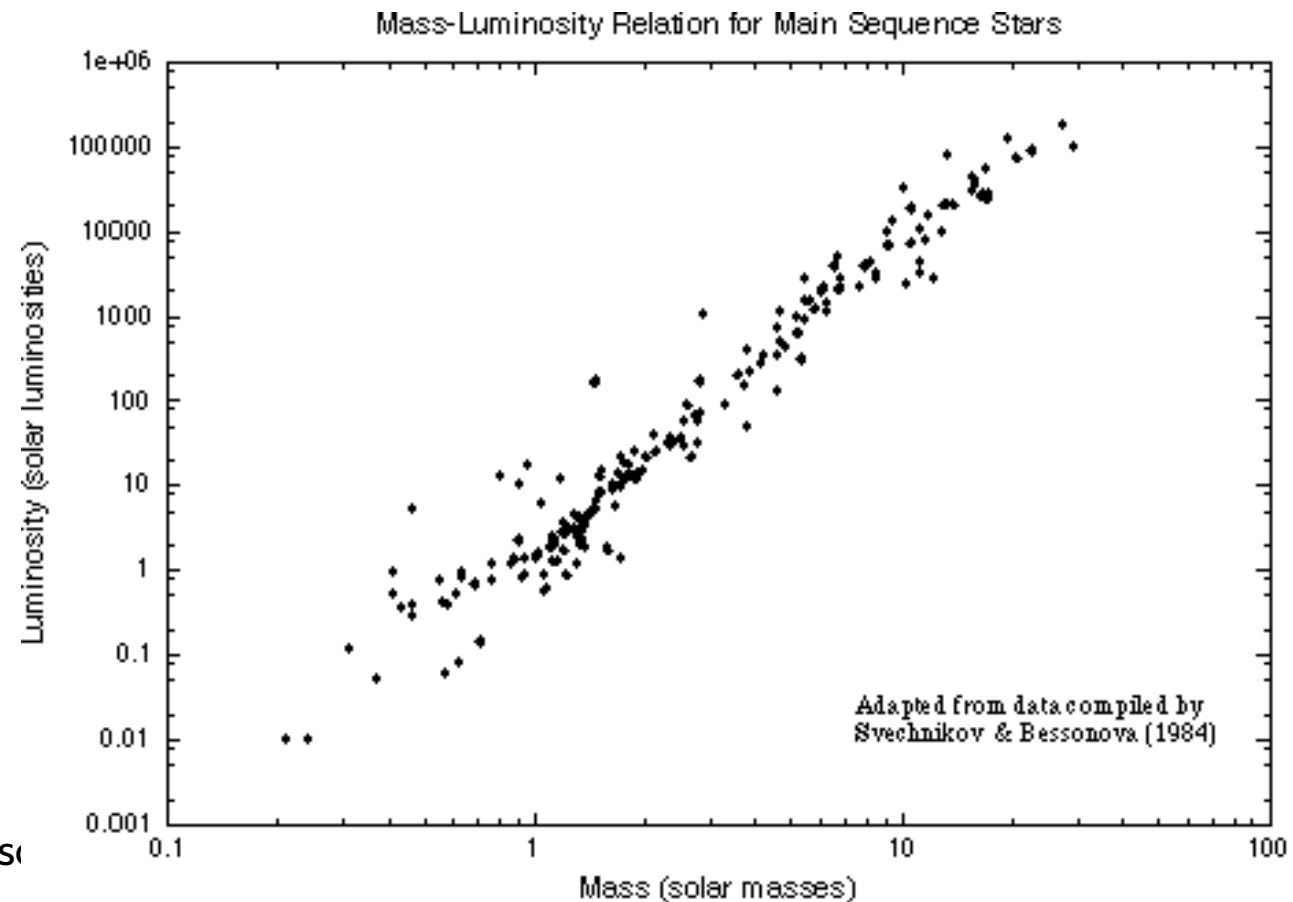
# Luminosidad → Masa

- 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 17, 2018

Así





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

$$R_B = 1026 R_{\text{Sol}}$$

**Betelgeuse es una supergigante roja**

mas luminoso que Betelgeuse

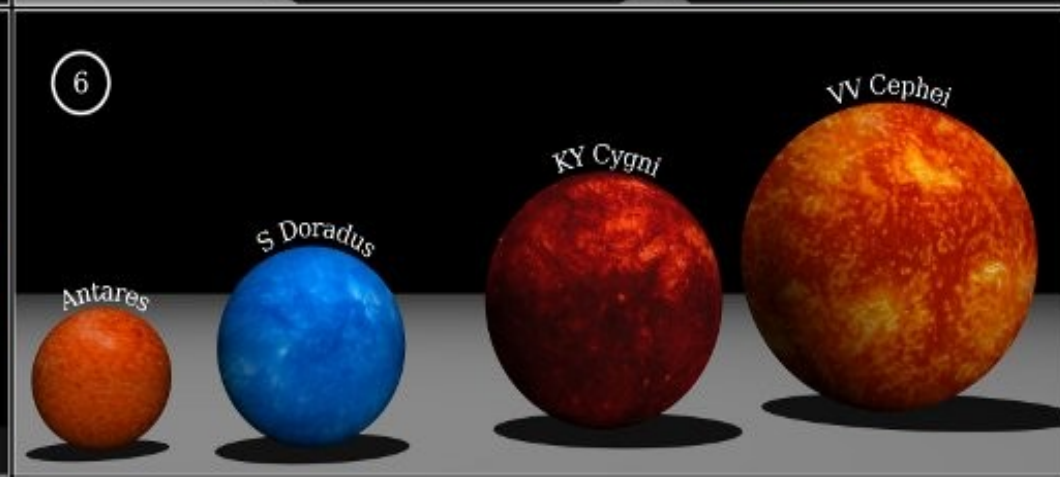
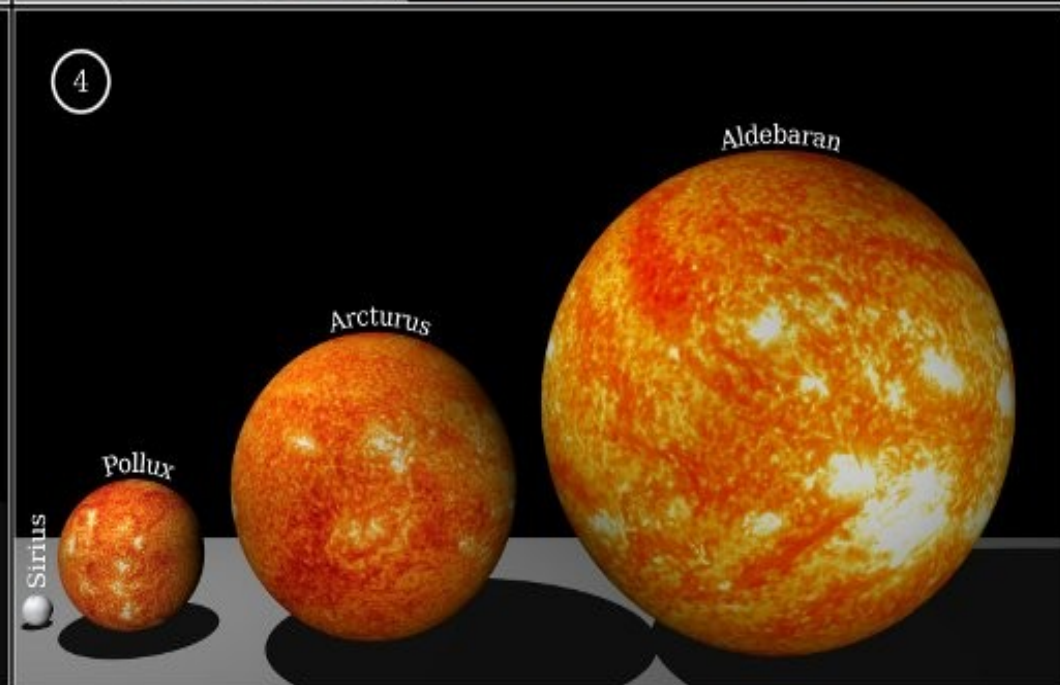
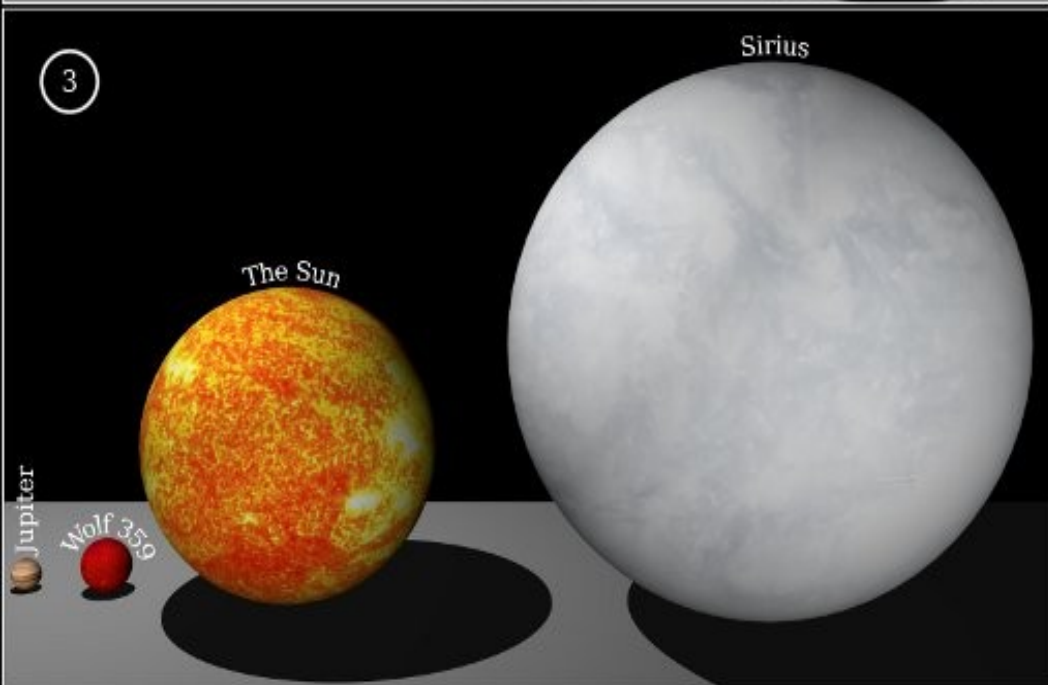
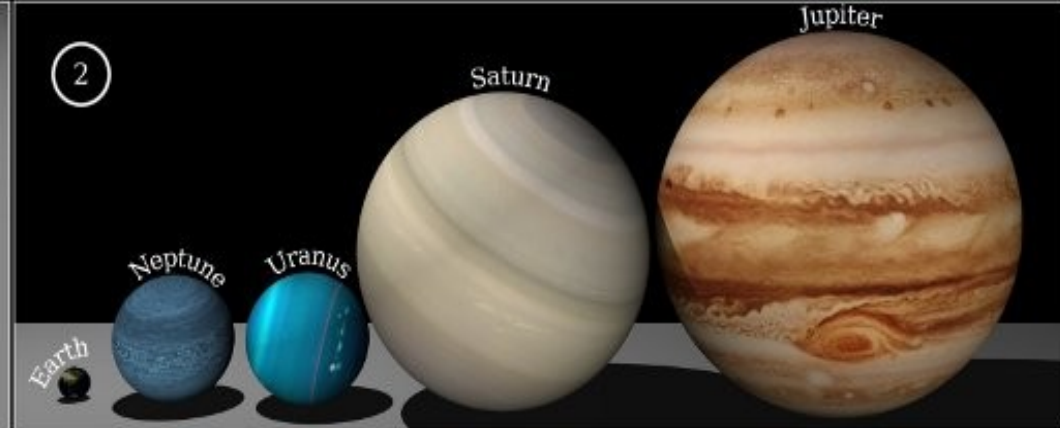
- Pero...

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

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

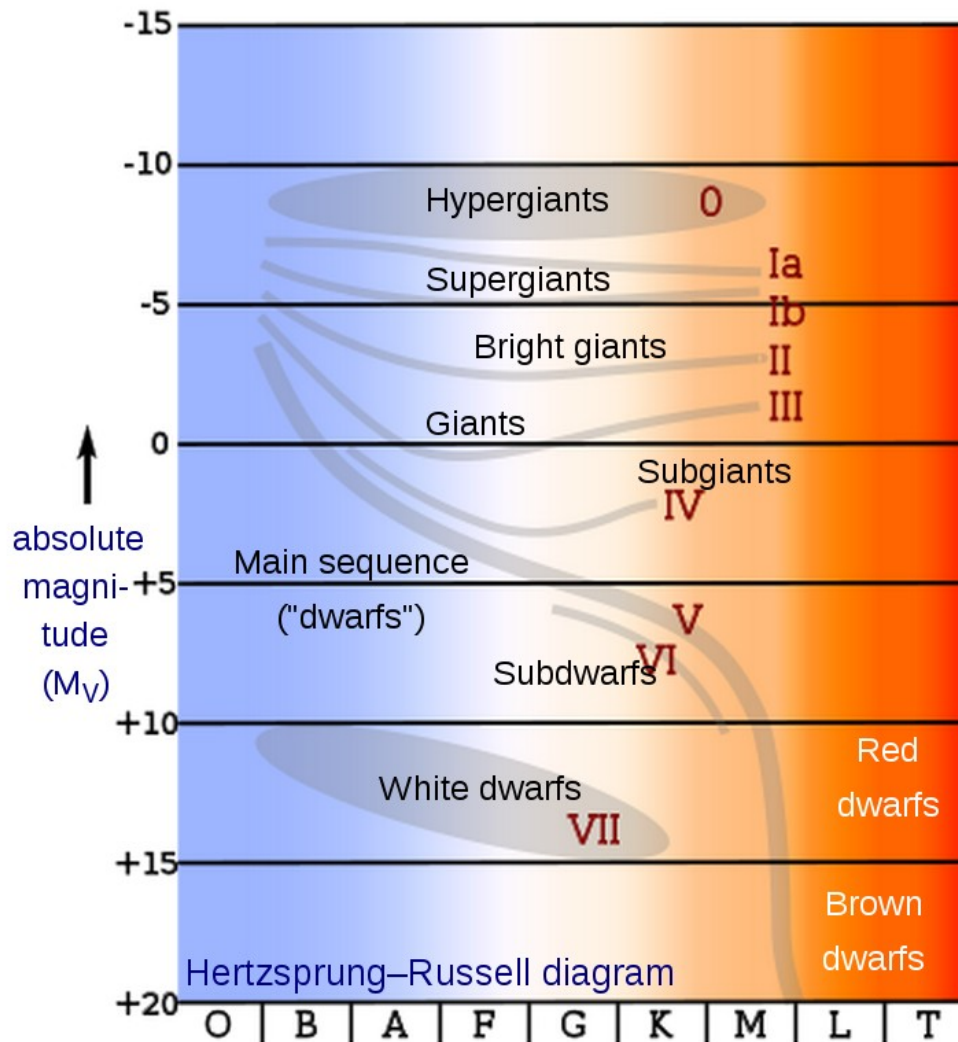
$$135000 = (R_B/R_S)^2 / 7.8$$

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



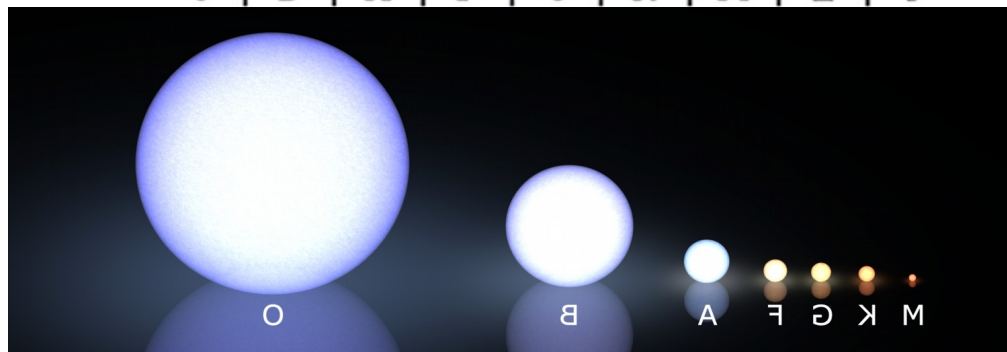


# Dijimos que la masa define todo

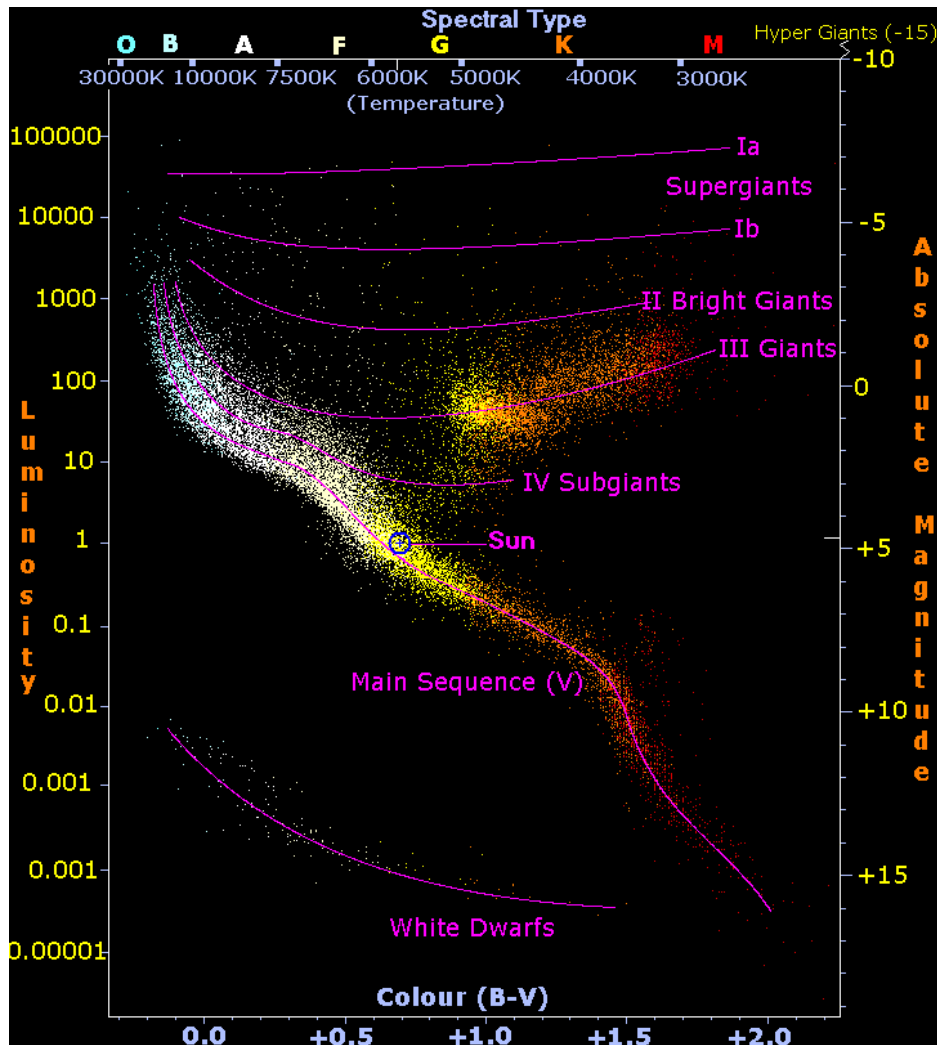


Surface temperature ranges for different stellar classes<sup>[134]</sup>

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



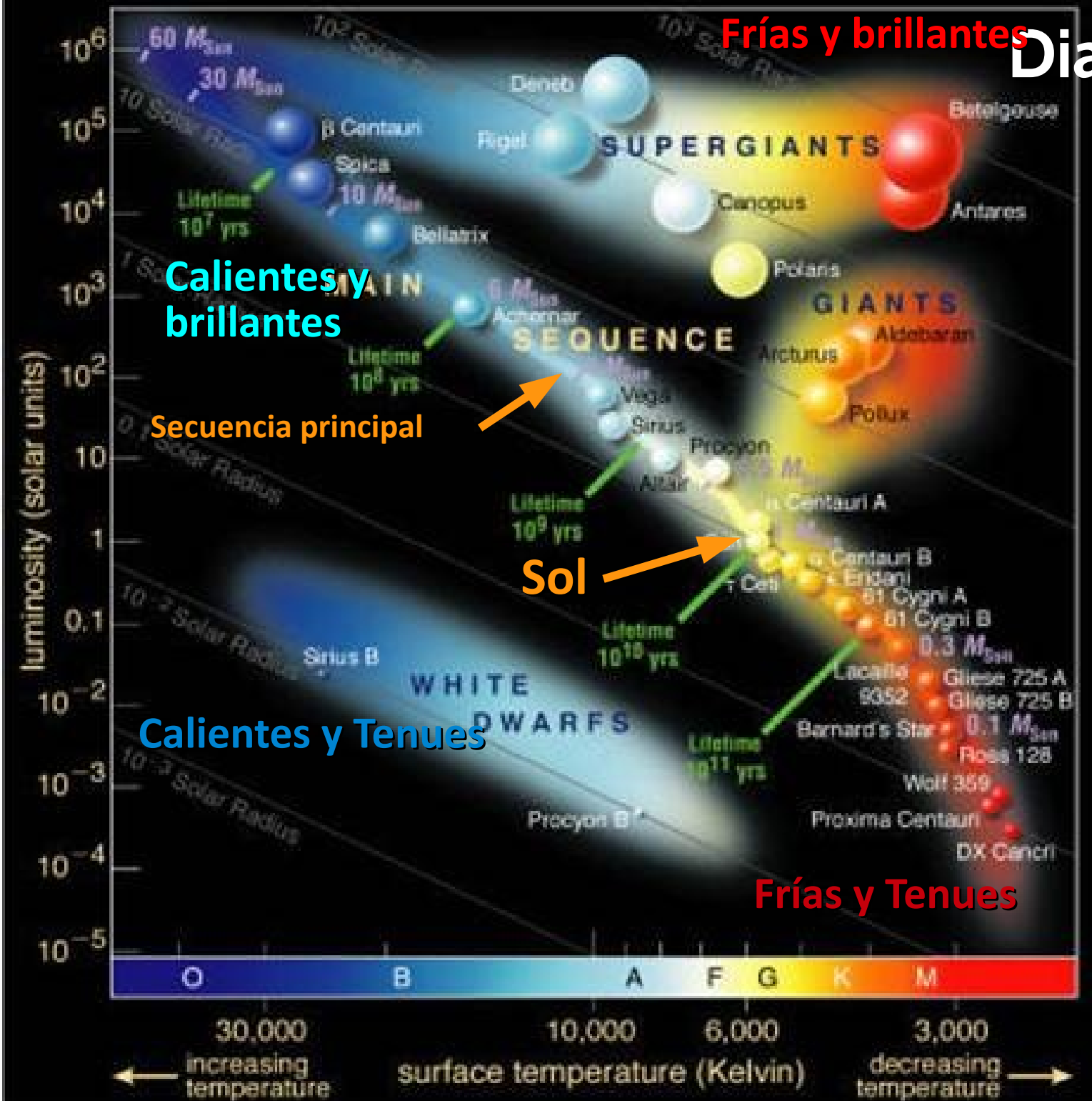
# Secuencia principal



- 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

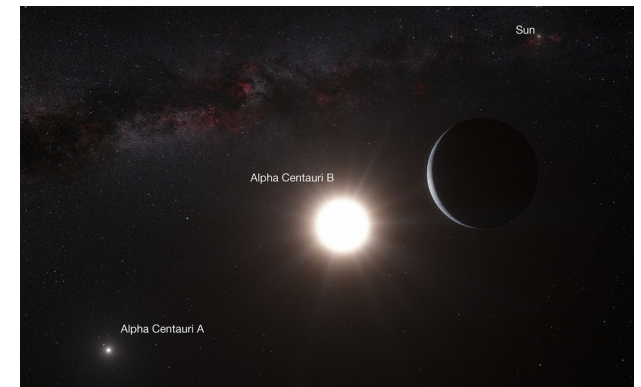
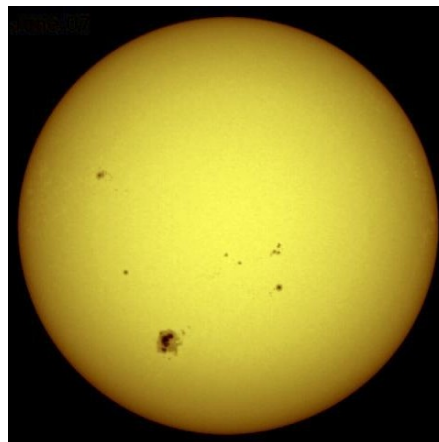
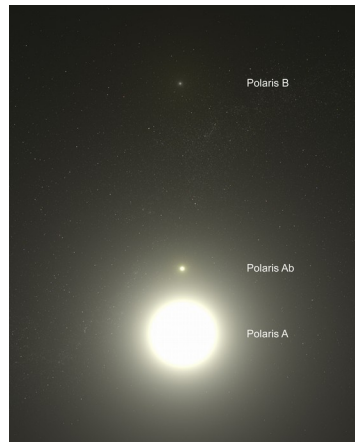
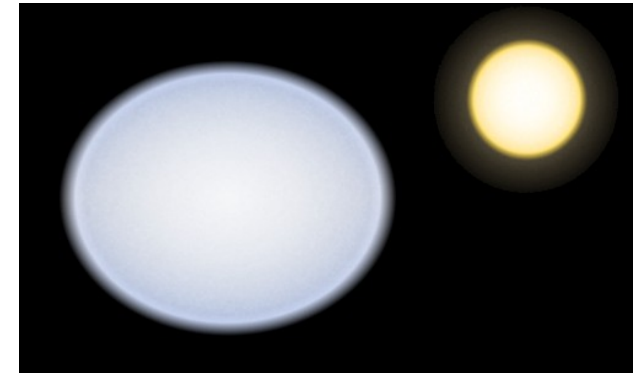


# Diagrama H-R



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

# 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

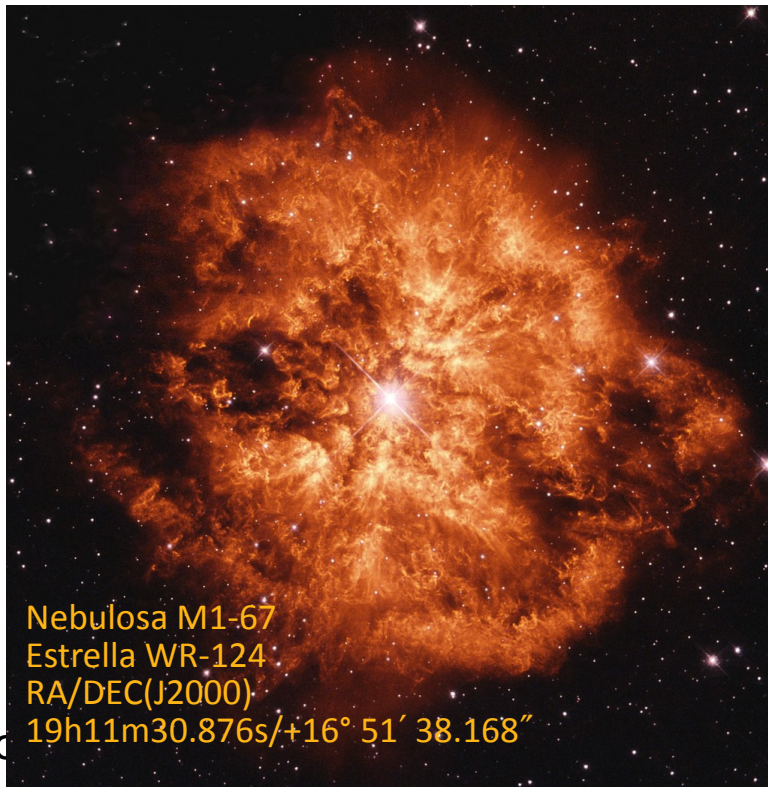
# Otros tipos de estrellas

- **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)

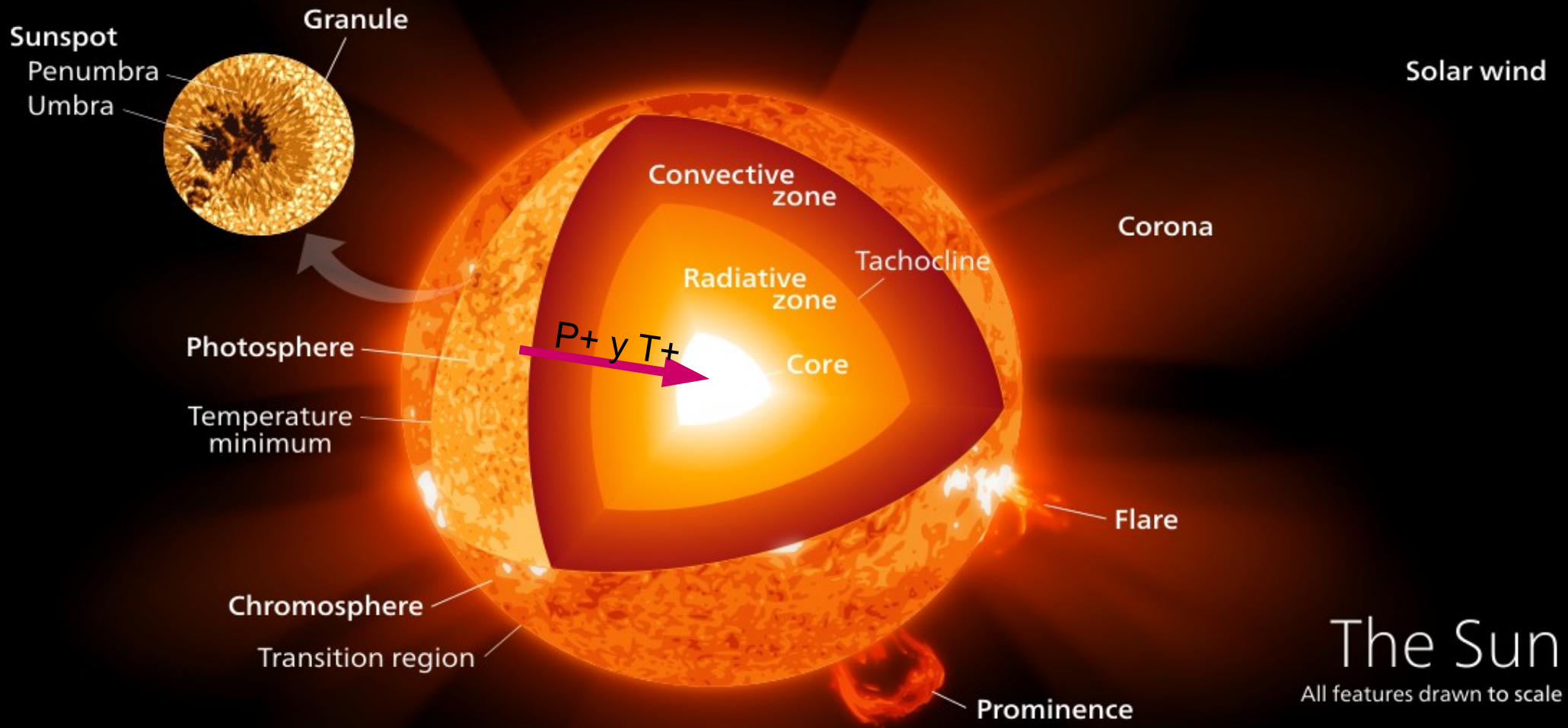


# $\eta$ Carinae: Una binaria a punto caramelo



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

# Estructura de una estrella típica (Sol)



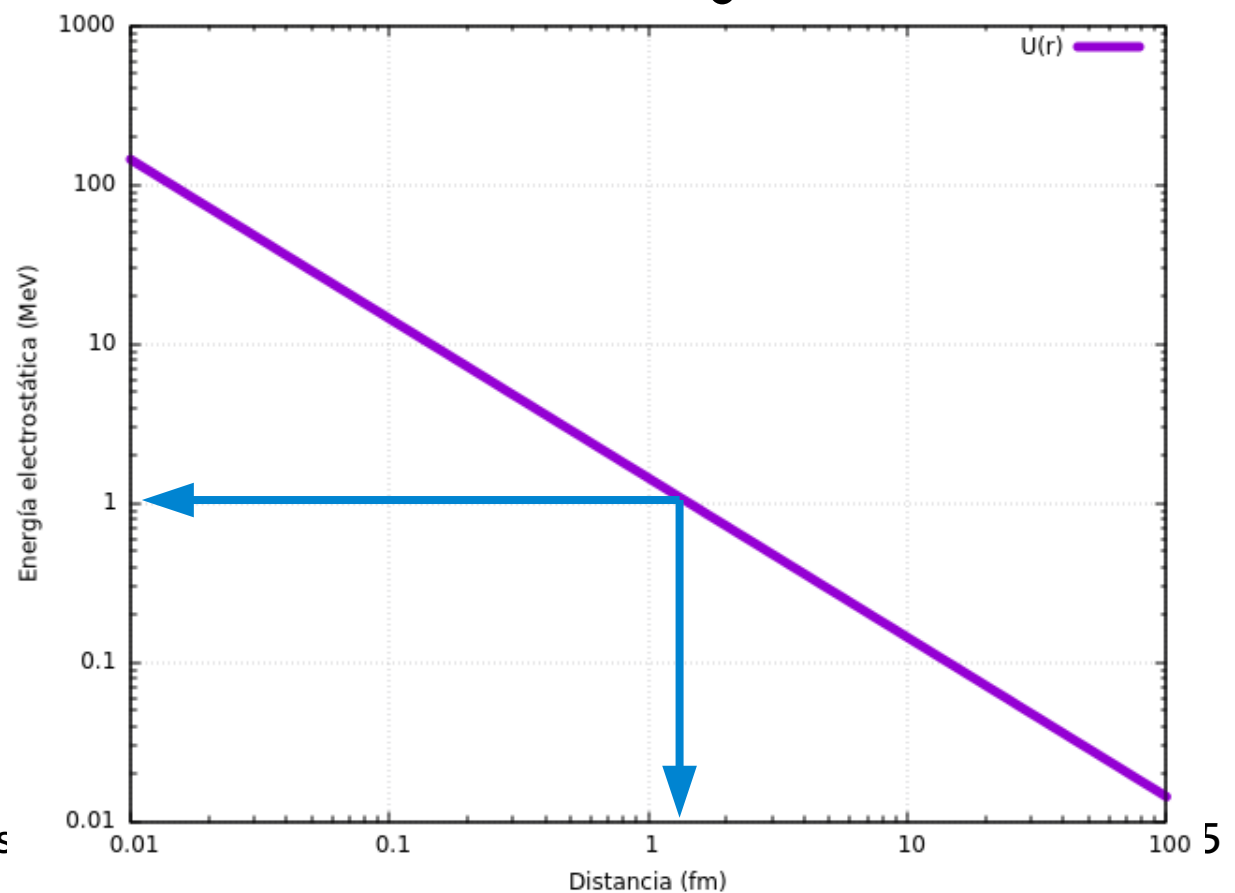


# Barrera Coulombiana

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



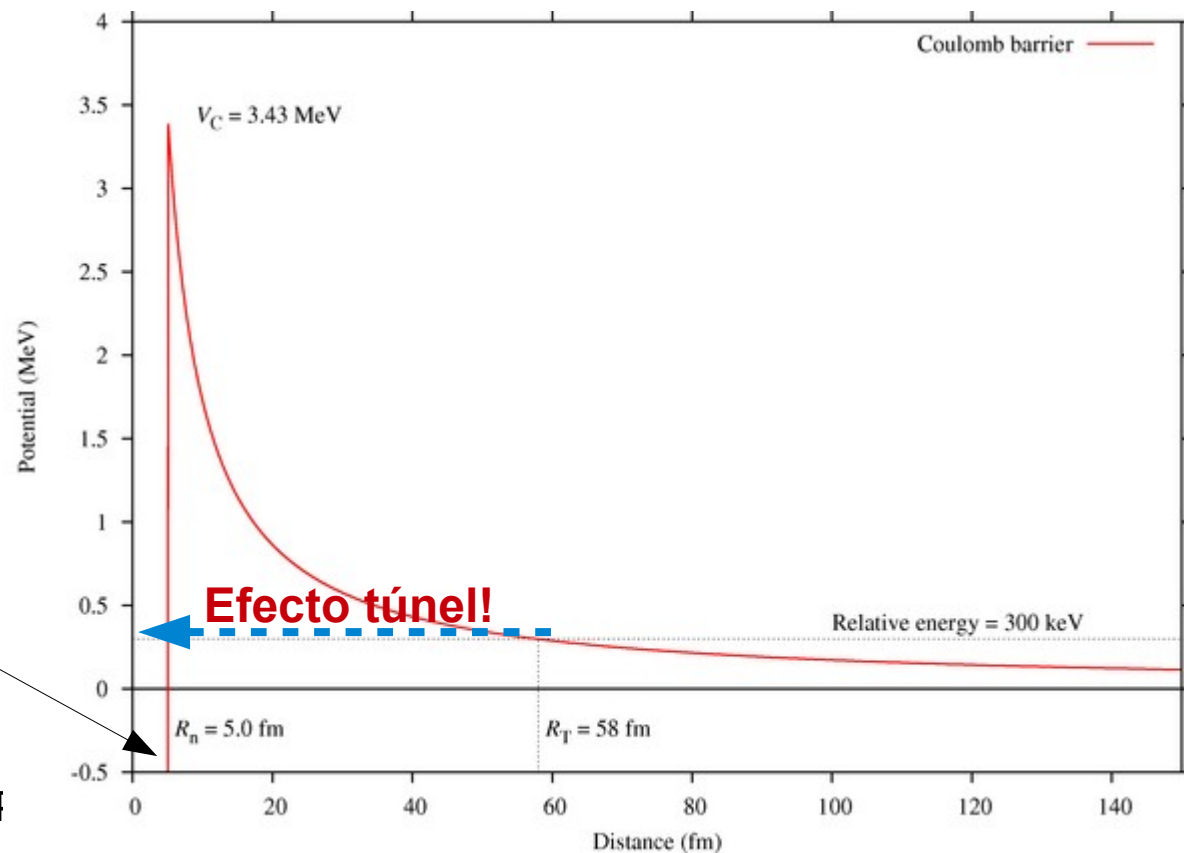
# Sistemas compuestos y potencial nuclear

- En general, para dos núcleos  ${}^AX_Z$  y  ${}^AY_Z$ , entonces

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

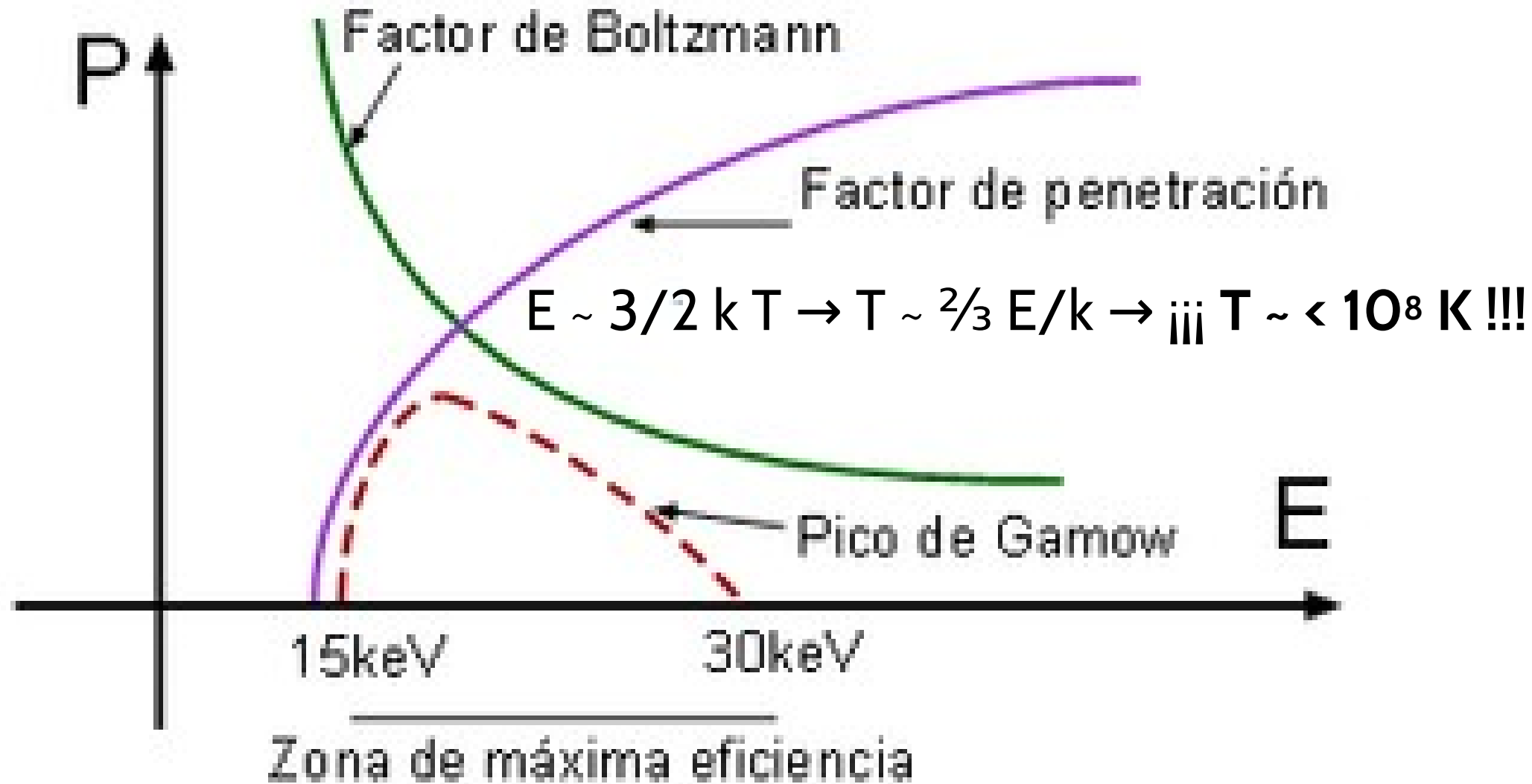
- Barrera de Coulomb.  
Por ej.,  ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$ :

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





# Efecto túnel → Pico de Gamow (1928)



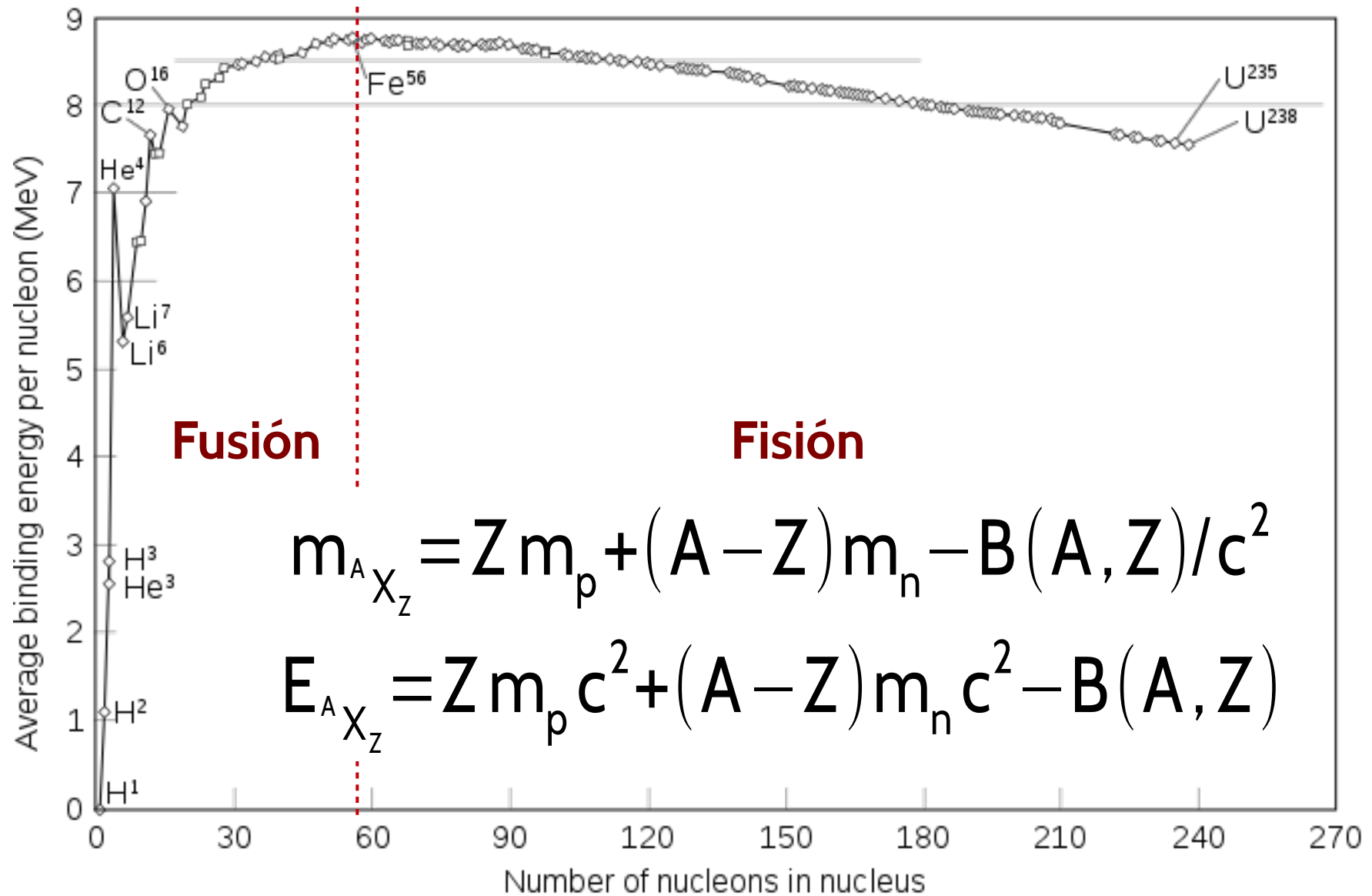


# En estrellas como el Sol

- 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....)



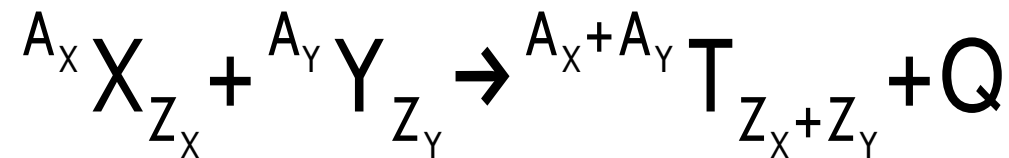
# Energías de ligaduras



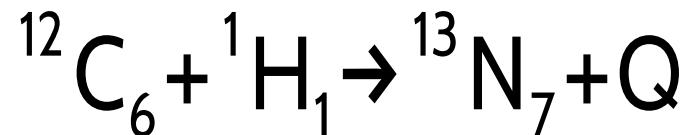
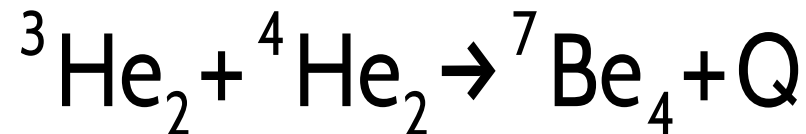


# Proceso de fusión

- 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>

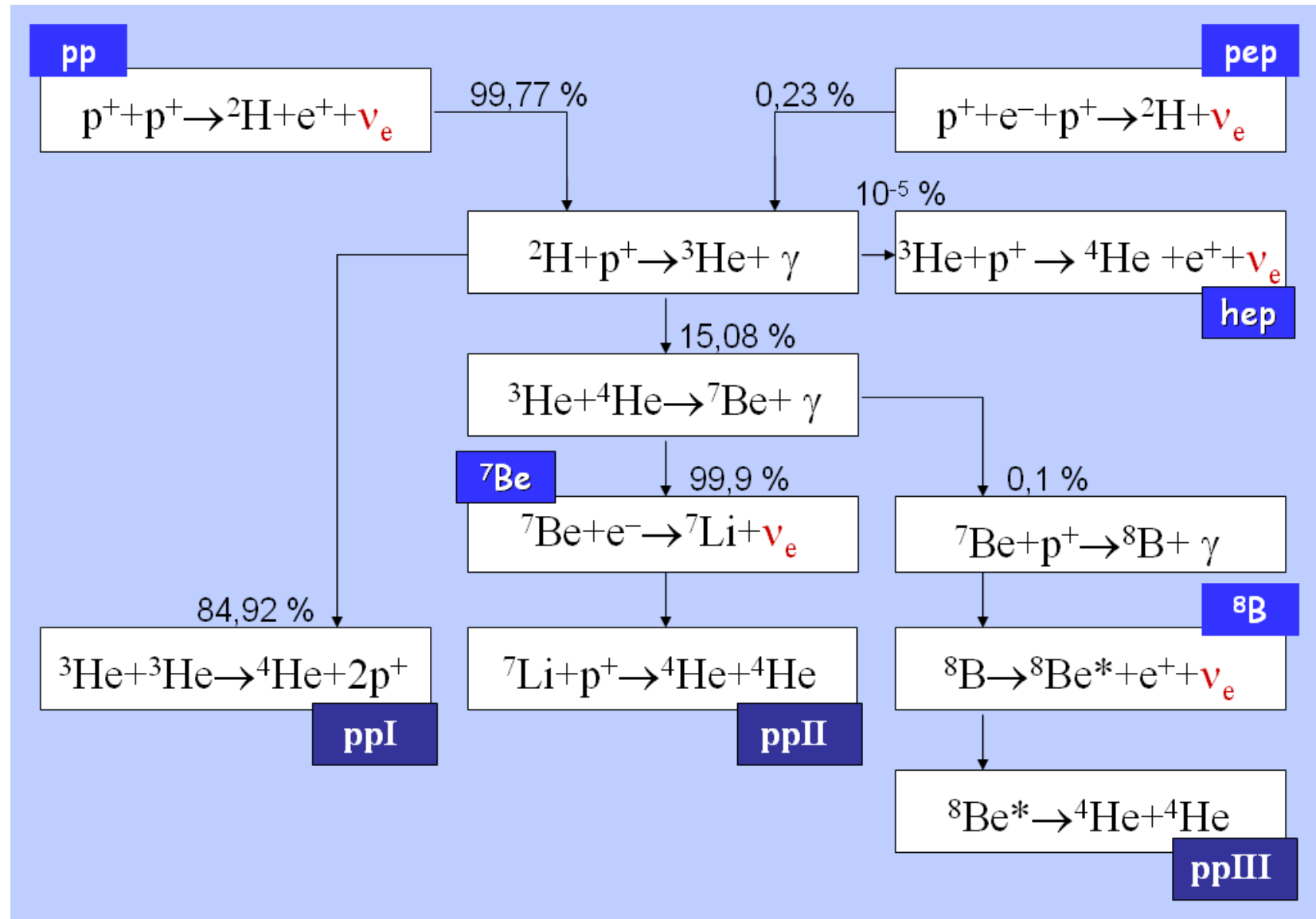
también en Google play!:

<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*)



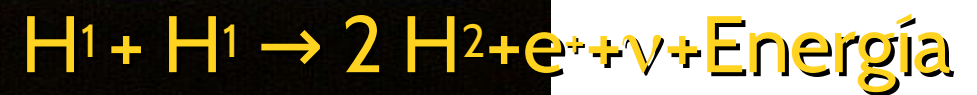
# Fusión: Paso 1

STEP 1

$H^1$

+

$H^1$



$e^+$

+

$D^2$

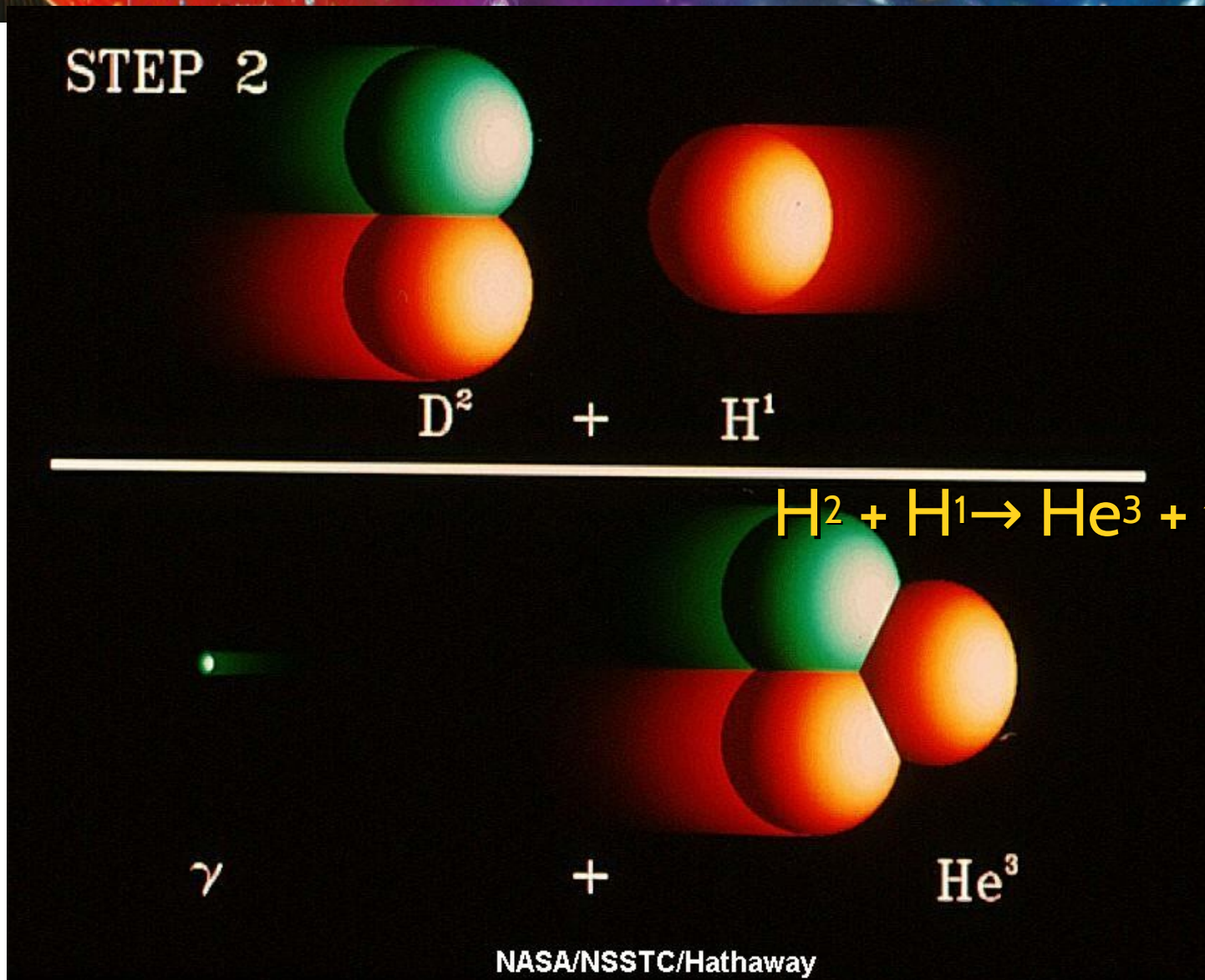
+

$\nu$

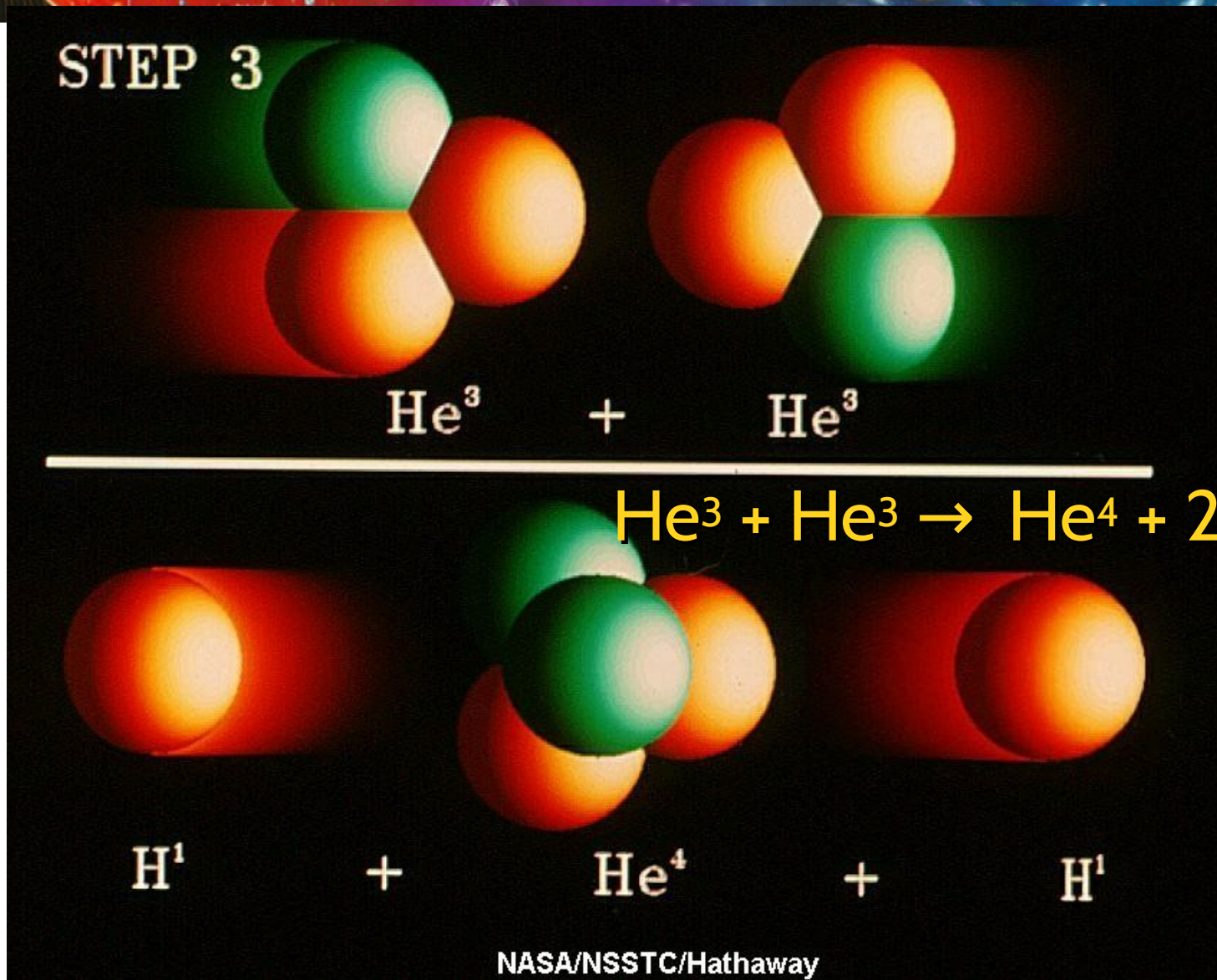
NASA/NSSTC/Hathaway



# 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**

A cosmic background image featuring a bright yellow sun-like object on the left, a red nebula in the center, and a blue galaxy field on the right. Various scientific diagrams and labels are overlaid on the image.

# La conservación de energía implica

- Para el Sol:

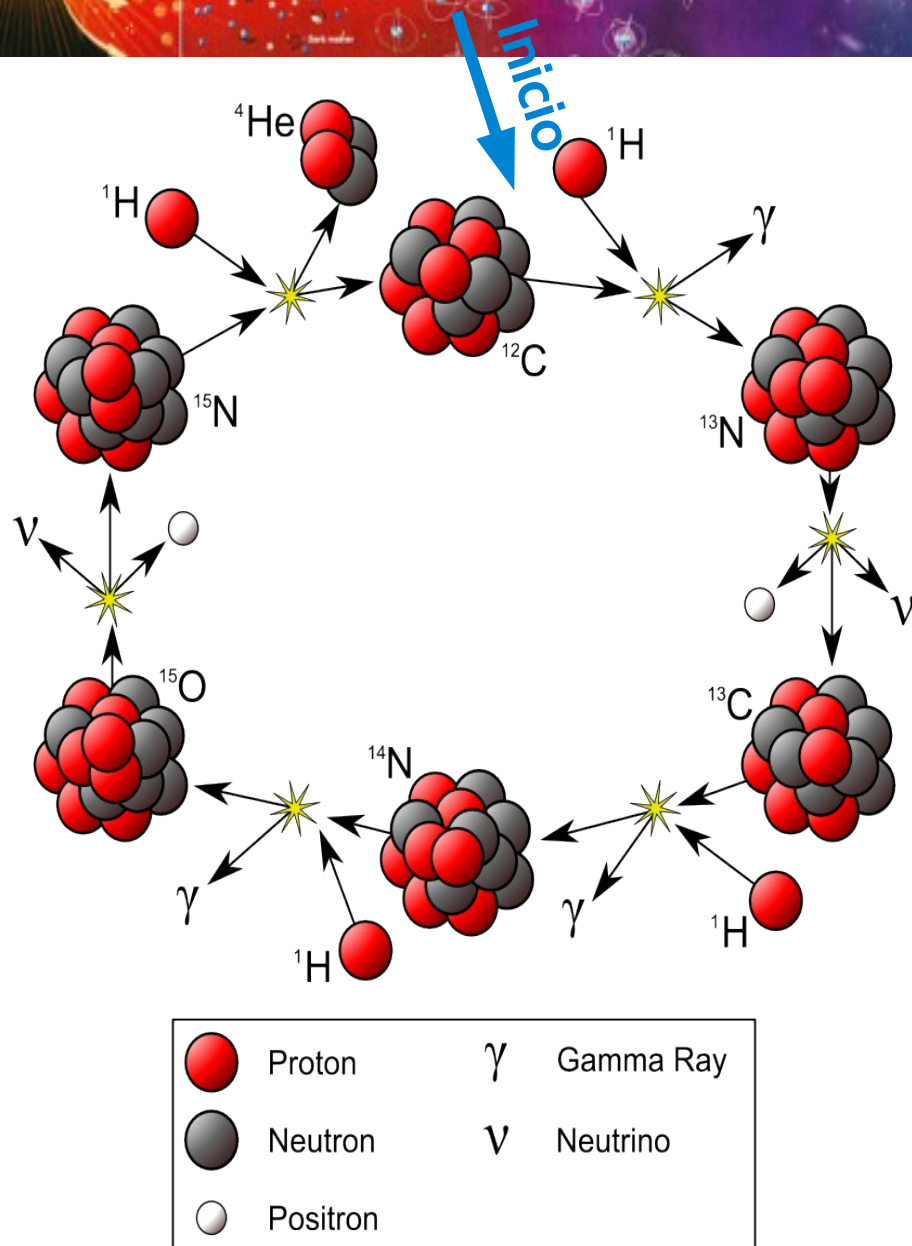
$L = 3.846 \times 10^{26} \text{ J/s}$  y sabiendo que  $E_1 = 26.73 \text{ MeV}$

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

**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  $4\text{ p} \rightarrow \text{He} + \text{neutrinos} + Q$ , al igual que la cadena pp
- Libera la misma cantidad de energía neta por reacción (26.73 MeV)