Universidad Nacional de Río Negro
Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2017

- **Unidad** 02 – Astrofísica
- **Clase** U02C05 – 11
- **Fecha** 24 Oct 2017
- **Cont** Estrellas 3
- **Cátedra** Asorey
- **Web** github.com/asoreyh/unrn-ipac
  www.facebook.com/fisicareconocida/

Contenidos: un viaje en el tiempo

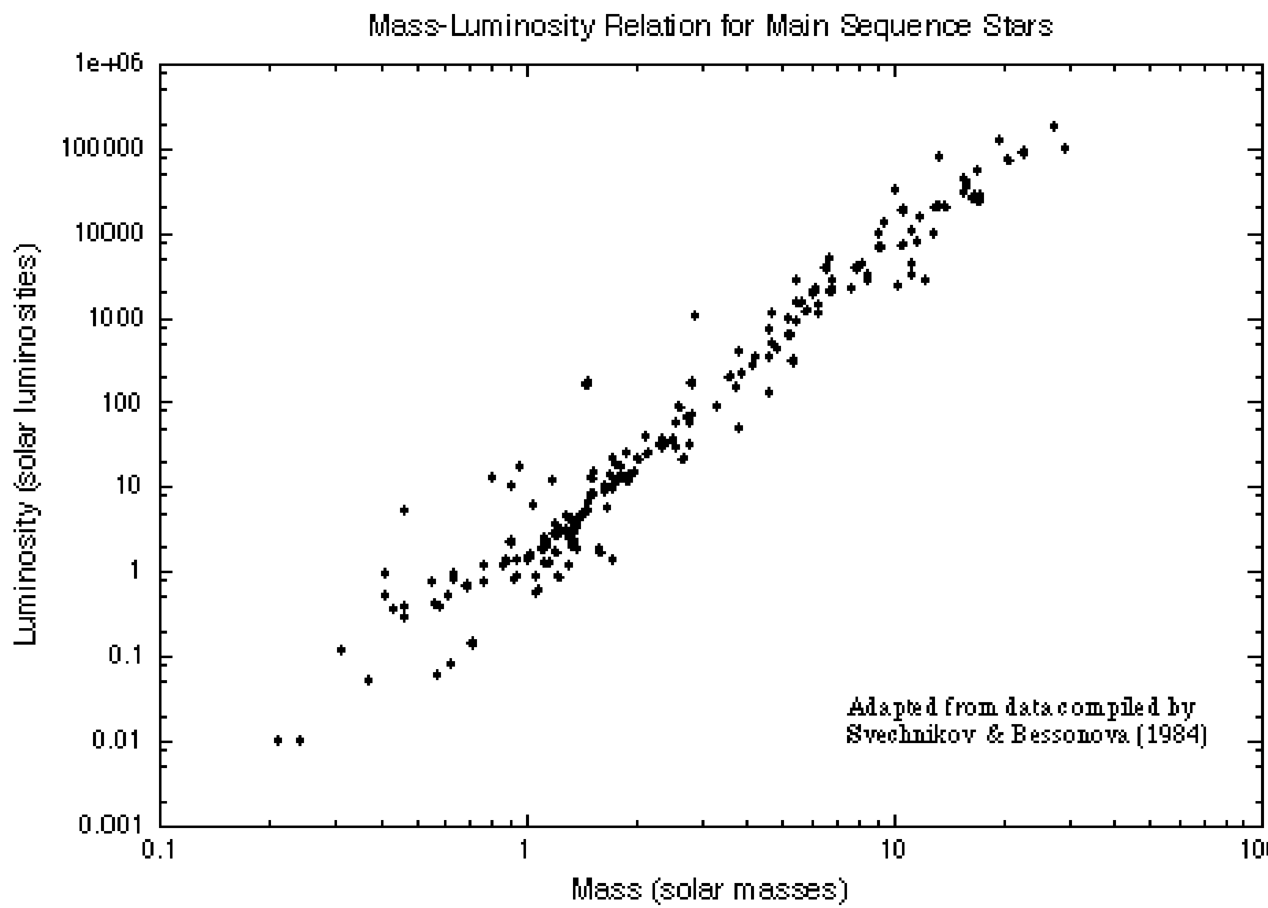
Luminosidad → Masa

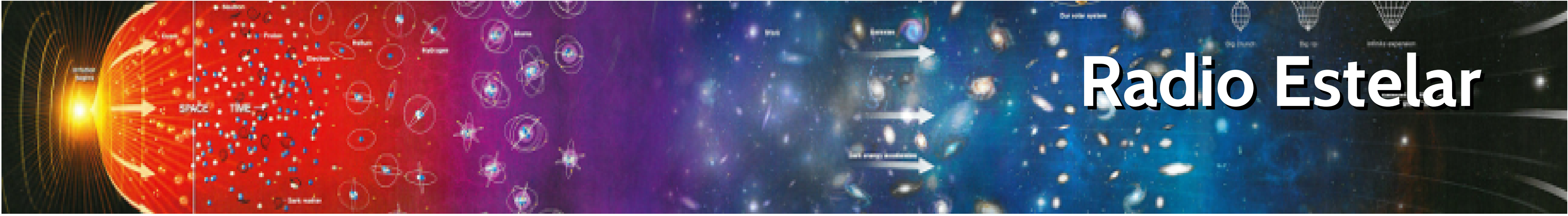
- **Si: (0.1 < Masa Estelar < 50) masas solares:**

  L es proporcional a la M^4

- Nota: En general, M^a , con **a** entre 3 y 4 (~ masa)

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





Radio Estelar

- Veamos…. $(T_B/T_S)^4$

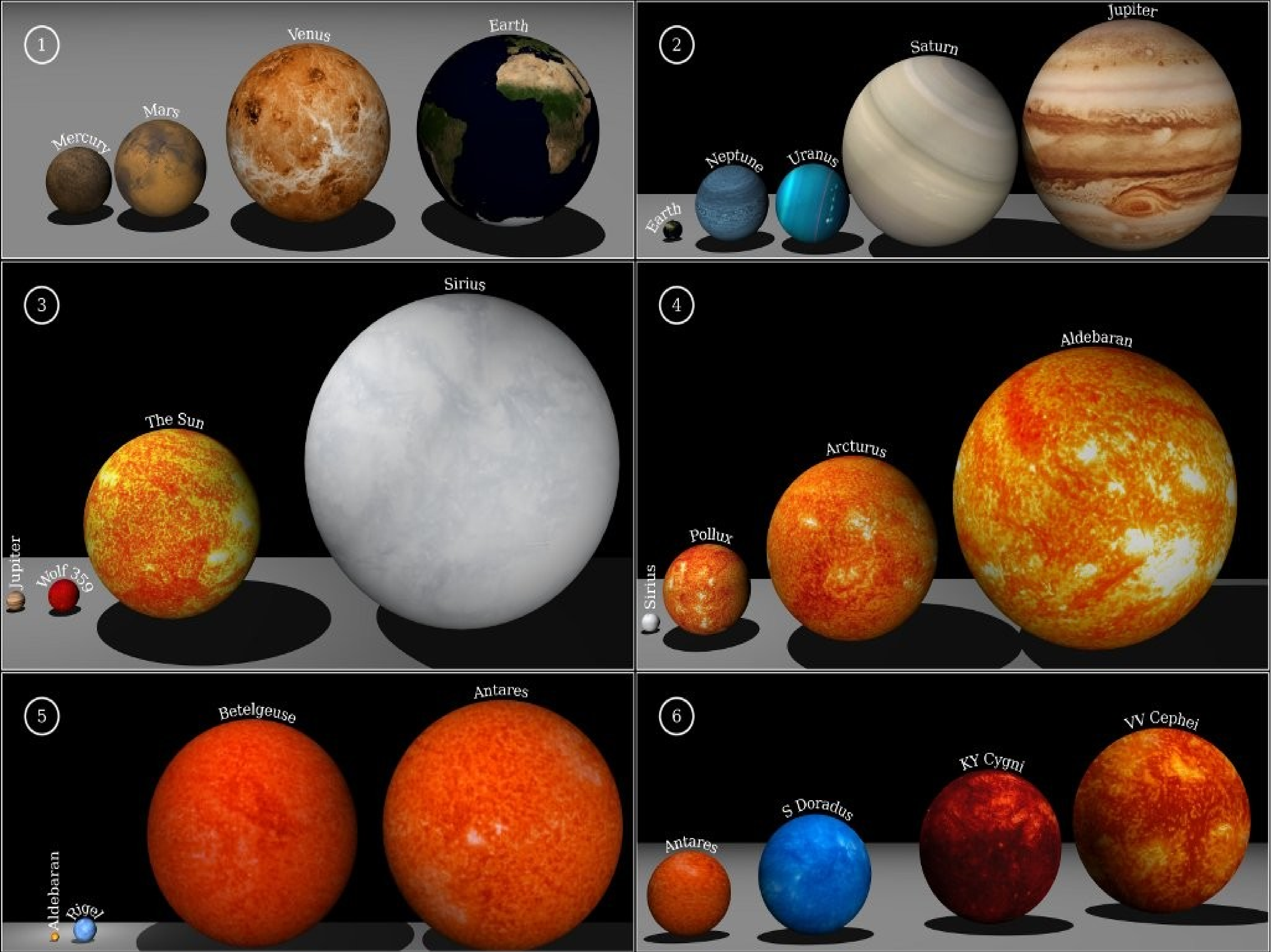
R_B = 1026 R_{Sol}

Betelgeuse es una supergigante roja

más luminoso que Betelguese

- Pero…

$$L_B / L_S = [(4\pi R_B^2)\ \sigma\ T_B^4]/[(4\pi R_S^2)\ \sigma\ T_S^4]$$
$$135000 = (R_B/R_S)^2\ (T_B/T_S)^4$$
$$135000 = (R_B/R_S)^2/7.8$$
$$1.053\mathrm{x}10^6 = (R_B/R_S)^2$$


1
Mercury
Mars
Venus
Earth
2
Earth
Neptune
Uranus
Saturn
Jupiter
3
Jupiter
Wolf 359
The Sun
Sirius
4
Sirius
Pollux
Arcturus
Aldebaran
5
Aldebaran
Rigel
Betelgeuse
Antares
6
Antares
S Doradus
KY Cygni
VV Cephei

Es cómodo medir las cosas en términos solares

- Masa Solar:

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

- Radio Solar:

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

- Luminosidad Solar:

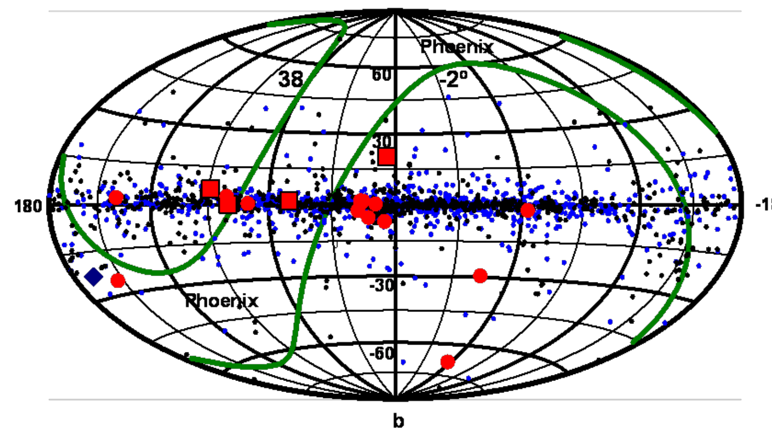
$$L_{Sol} = 3.83 \times 10^{26}\,\mathrm{W}$$

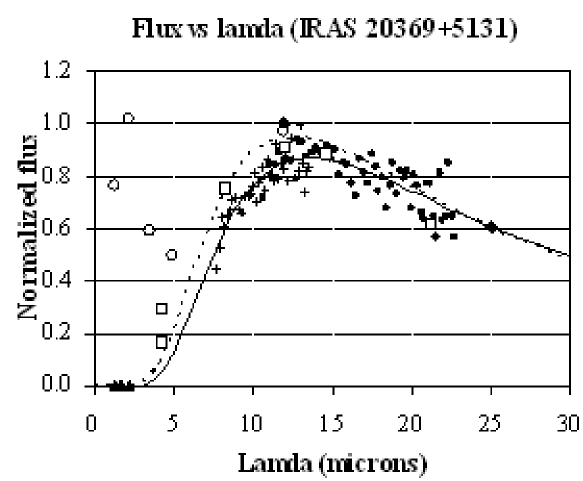
- Alto:

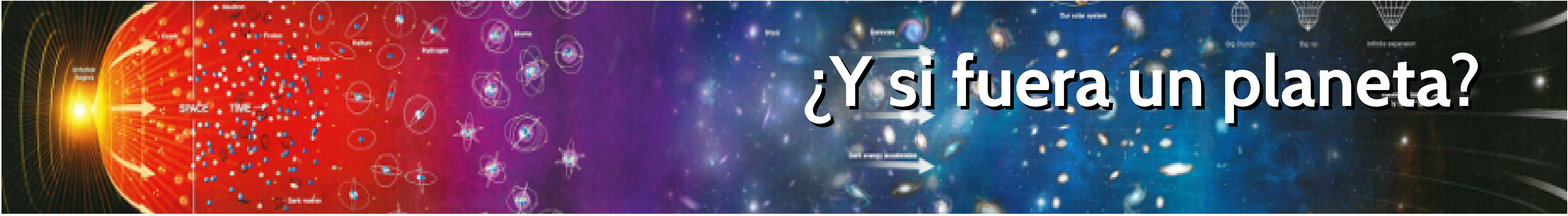
1 segundo de energía liberada en el Sol equivale a 800000 años de consumo humano (2013)

IRAS (InfraRed Astronomical Satellite)

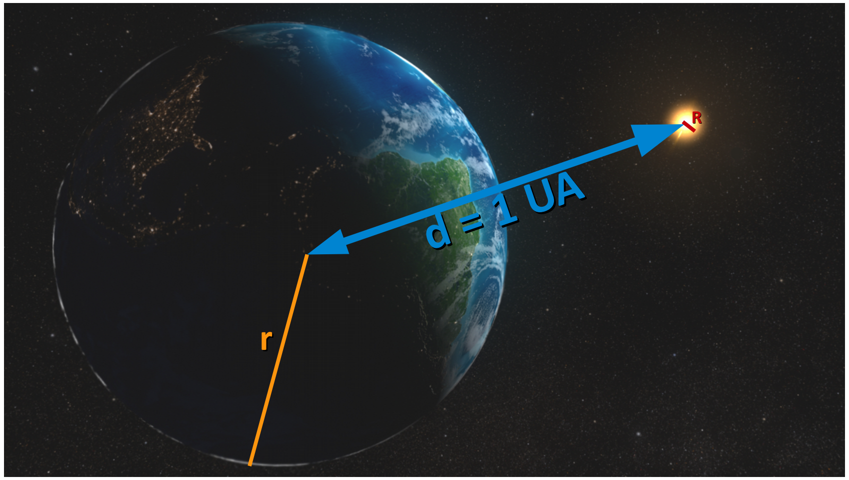
http://home.fnal.gov/~carrigan/infrared_astronomy/Fermilab_search.htm







¿Y si fuera un planeta?



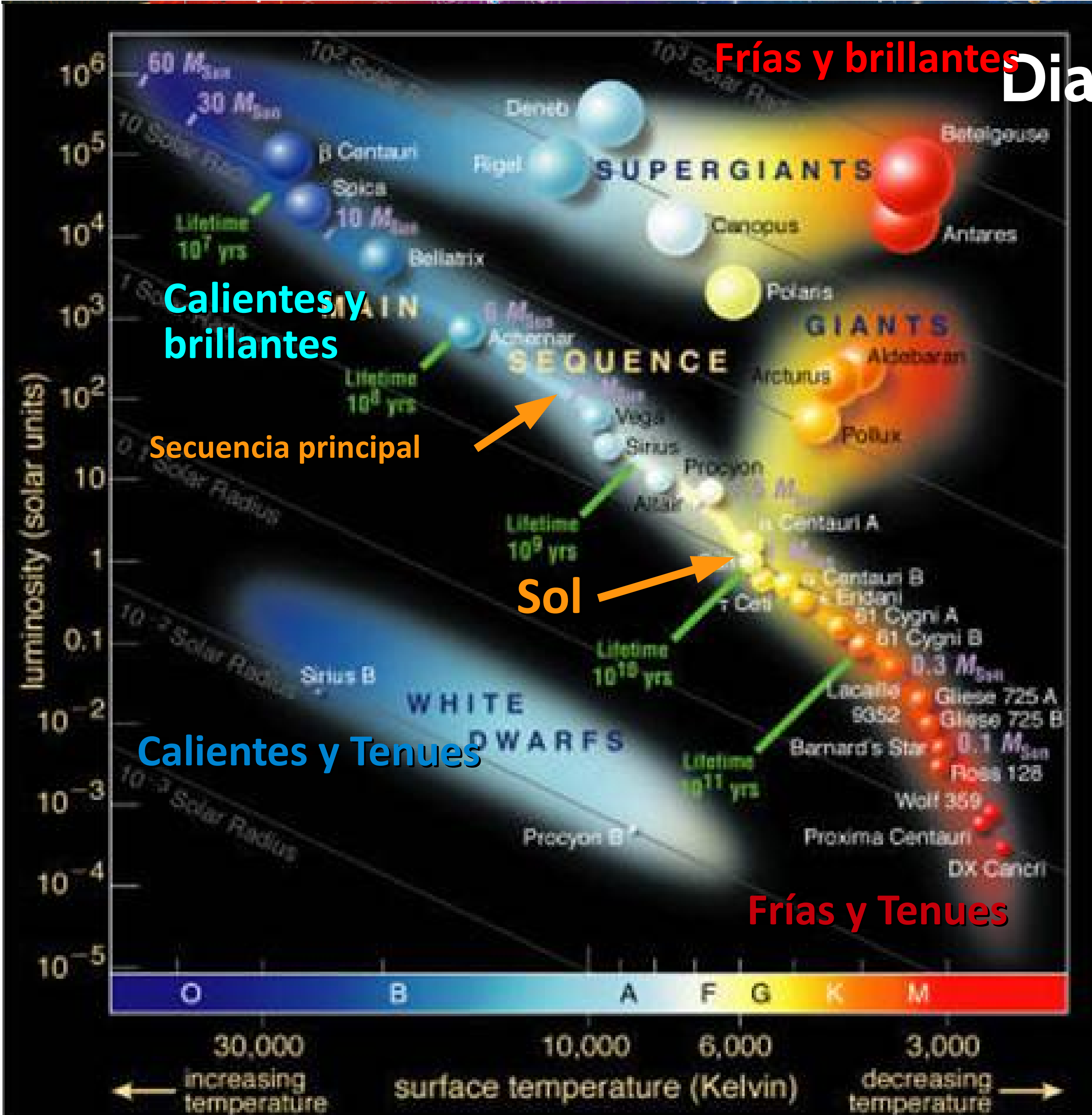
- ¿Que fracción de la energía captura un planeta de radio r?

$$T_{\oplus}=\sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{16\pi\sigma d^{2}}}$$

$$T_{\oplus}=\sqrt{\frac{R_{\odot}}{2d}}\,T_{\odot}$$

$$d=\frac{1}{2}\left(\frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}}\right)^{2}R_{\odot}$$

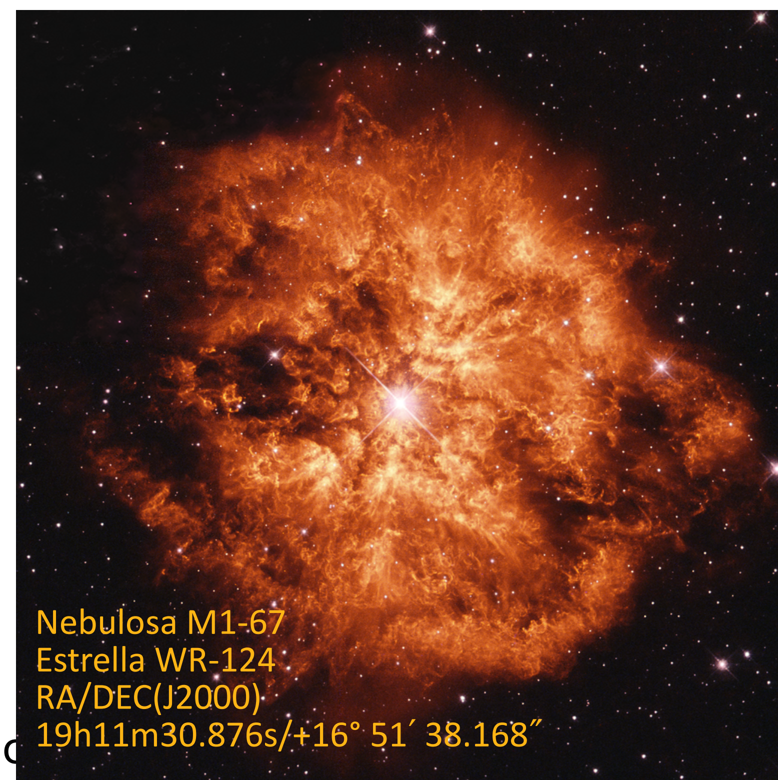
Diagrama H-R



$L \sim R^2 T^4$

Otros tipos de estrellas

- **W: Wolf-Rayet**
  - Estrellas masivas ($>20M_S$)
  - Excesivamente calientes



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

- **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/amoníaco y T<600K, y $10<M/M_{Júp}<90$

Estrellas supermasivas

NGC3372 – Nebulosa Carina (Carina)

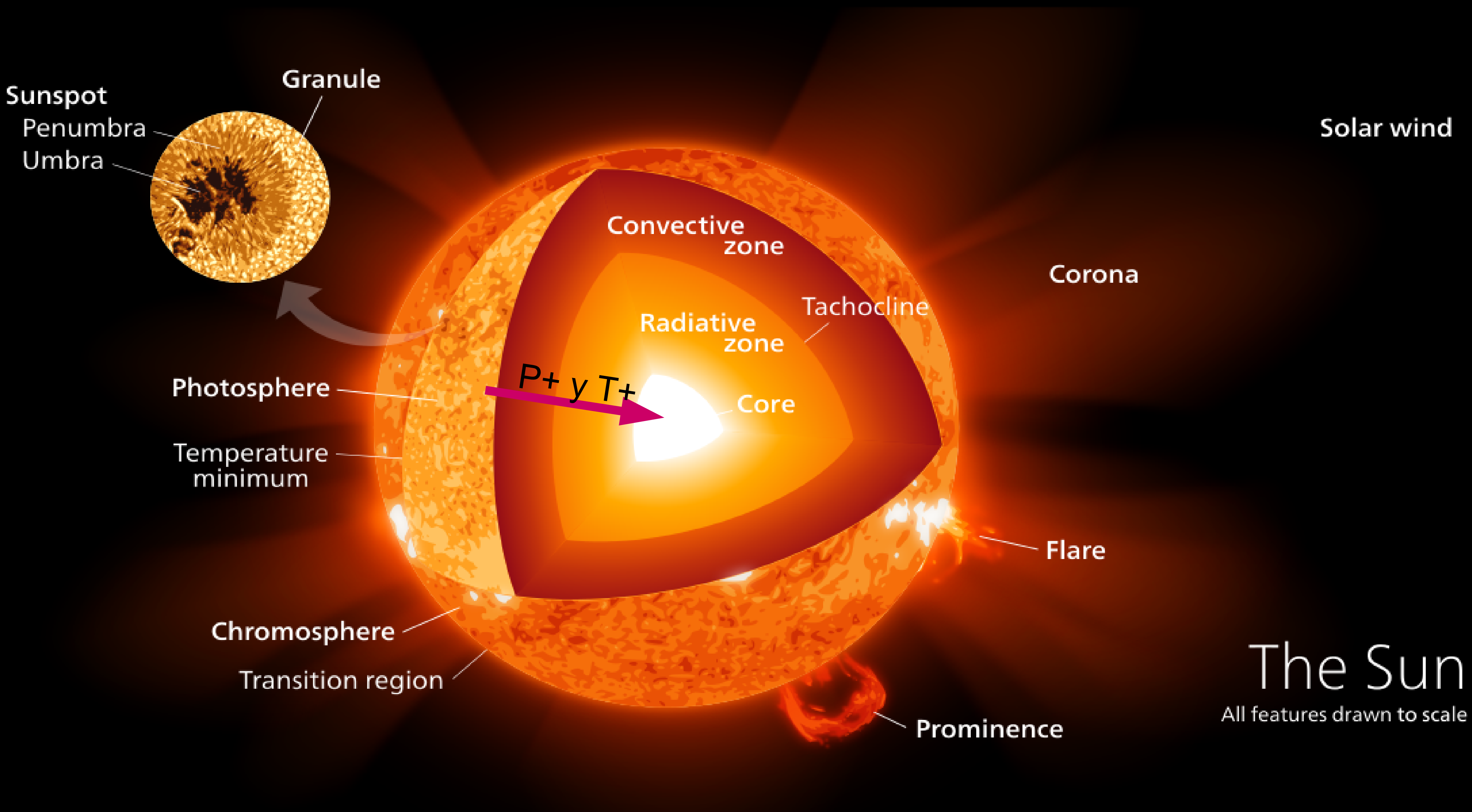
Estrellas supermasivas

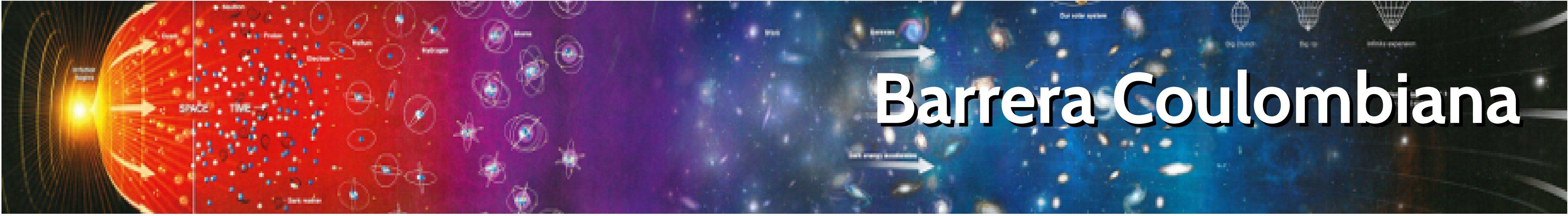
NGC3372 – Nebulosa Carina (Carina)

ηCarinae: Una binaria a punto caramelo

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

Estructura de una estrella típica (Sol)



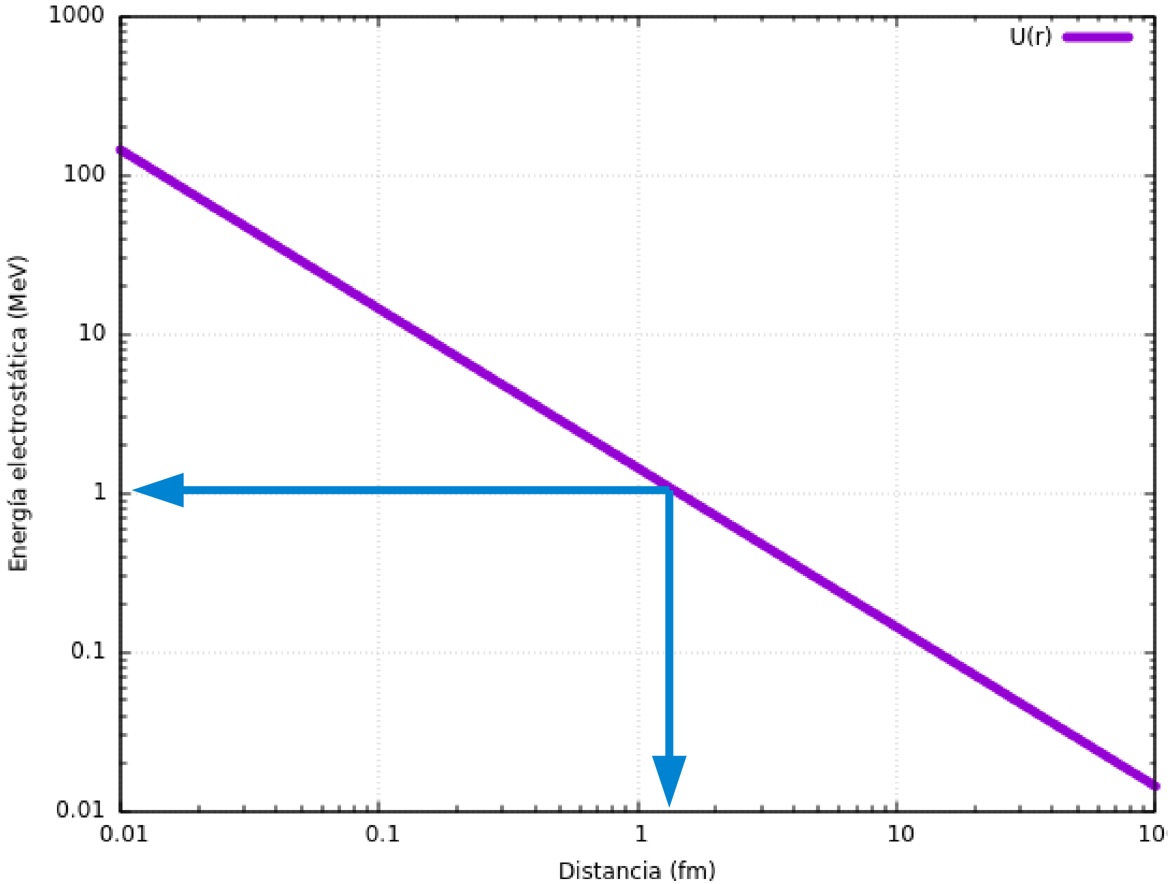


Barrera Coulombiana

- 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 ~ 1.2 fm
  $U_{pp}(r)$ ~ 1 MeV
- E ~ 3/2 k T →
  ¡¡¡ **T ~ 2x10[10] K !!!**



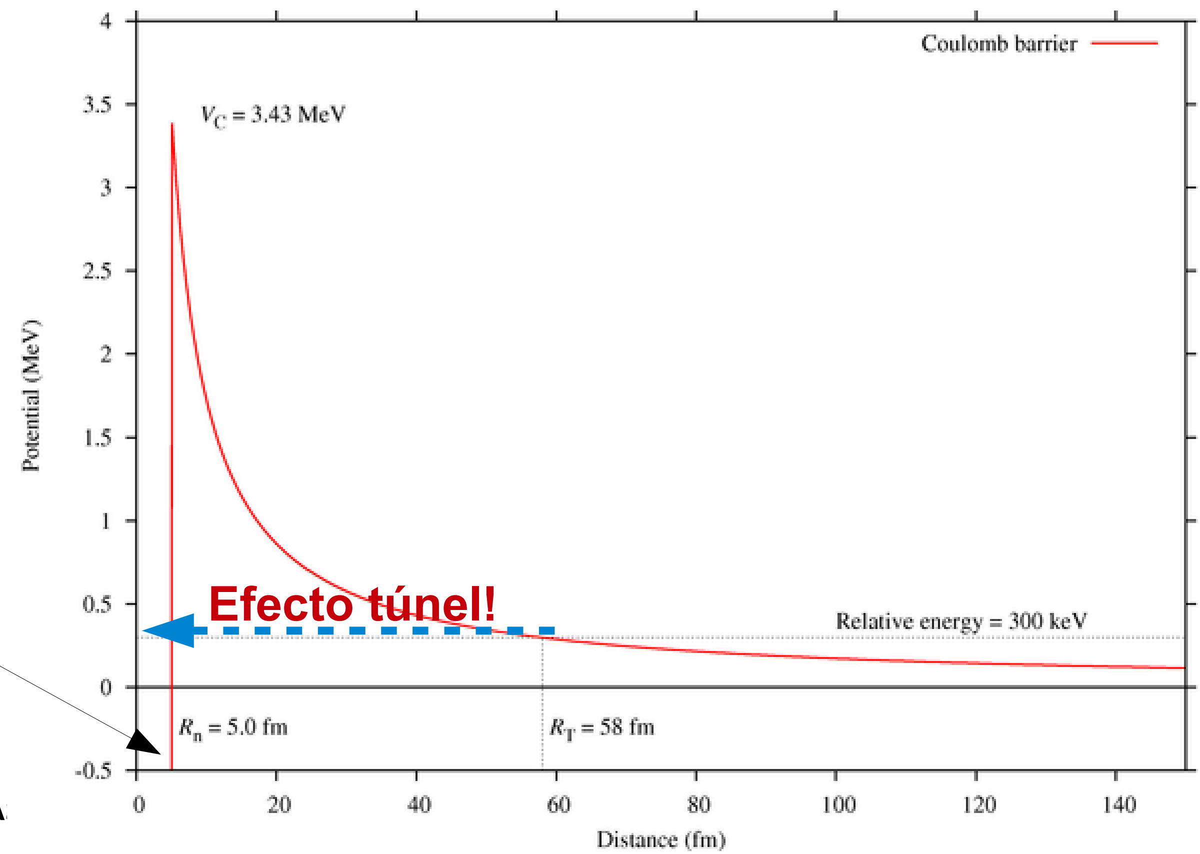
Sistemas compuestos y potencial nuclear

- En general, para dos núcleos ${}^{A}X_{Z}$ y ${}^{A}Y_{Z}$, entonces

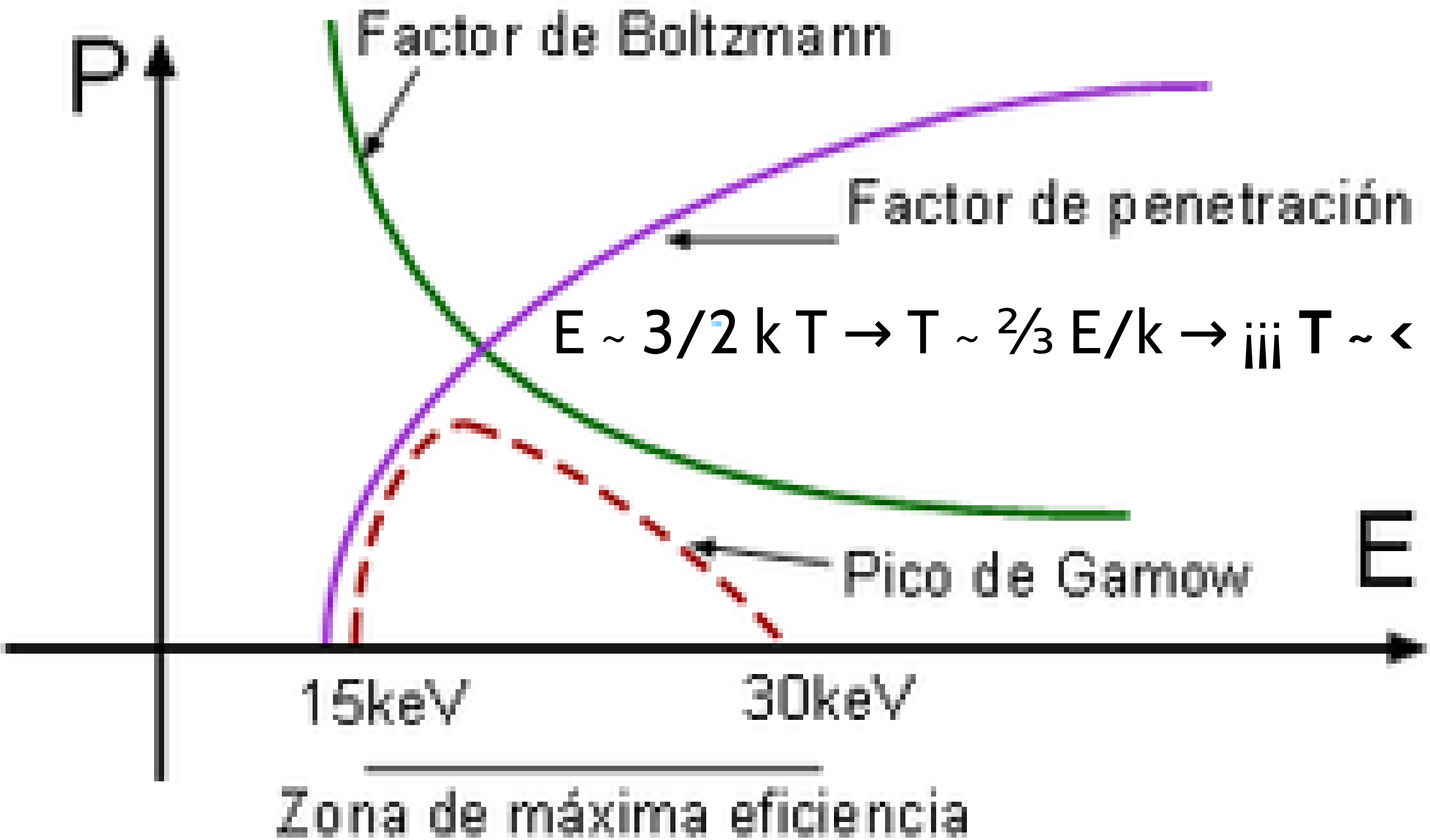
$$U_{XY}(r) = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)\left(\frac{Z_X Z_Y}{A_X^{1/3}+A_Y^{1/3}}\right)\frac{1}{r} \rightarrow U_{XY}(r) \simeq 1.44\left(\frac{Z_X Z_Y}{A_X^{1/3}+A_Y^{1/3}}\right)\frac{1}{r}\ \text{MeV}$$

- Barrera de Coulomb.
  Por ej., 12C + 4He:

A distancias cortas,
el potencial nuclear es atractivo!



Efecto túnel → Pico de Gamow (1928)

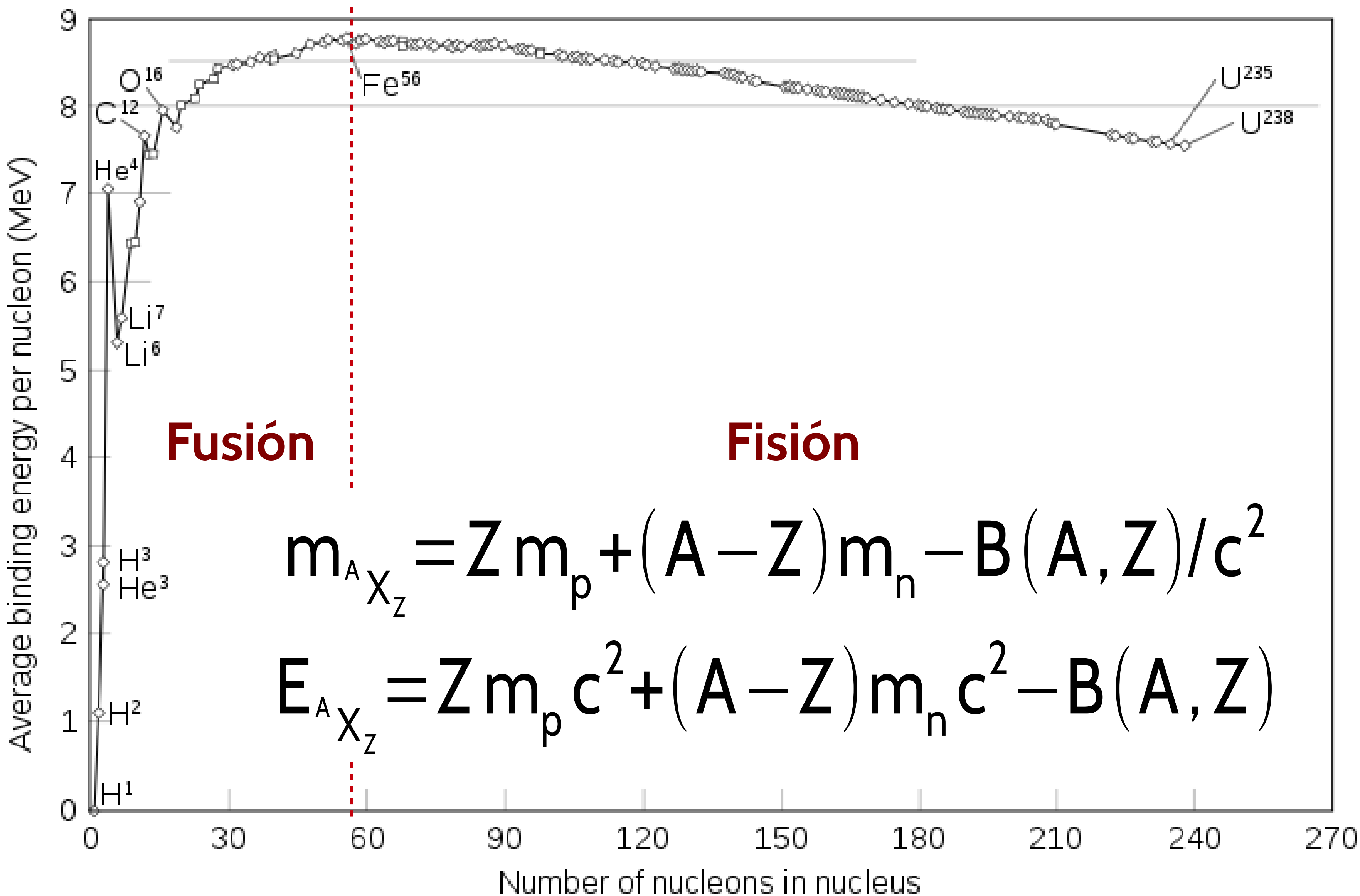


$E \sim 3/2\, k\, T \rightarrow T \sim \frac{2}{3} E/k \rightarrow$ ¡¡¡ $\mathbf{T \sim < 10^{8}\ K}$!!!

En estrellas como el Sol

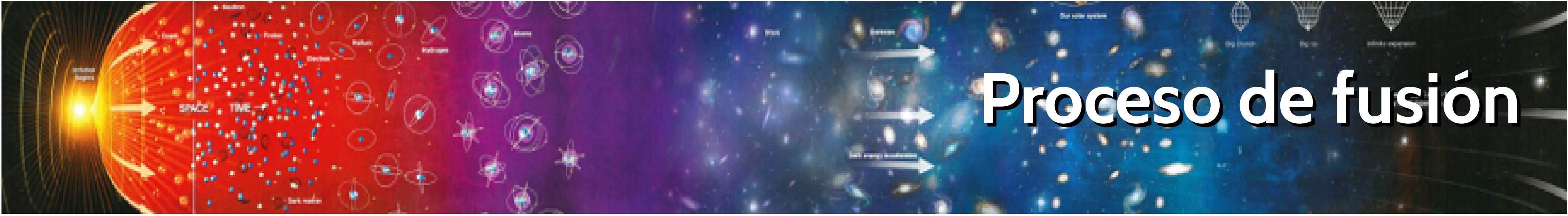
- La temperatura central es 10 MK < T < 20 MK
- El tiempo de reacción es ~ 10^9 años!!
- Hay tanto hidrógeno que el ritmo de reacción es sostenible (volveremos….)

Energías de ligaduras



$$m_{^A X_Z} = Z m_p + (A - Z) m_n - B(A,Z)/c^2$$

$$E_{^A X_Z} = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - B(A,Z)$$



Proceso de fusión

- Dos núcleos se fusionan liberando energía:

$$^{A_X}X_{Z_X} + {}^{A_Y}Y_{Z_Y} \rightarrow {}^{A_X+A_Y}T_{Z_X+Z_Y} + Q$$

- Por ejemplo:

$$^{3}He_{2} + {}^{4}He_{2} \rightarrow {}^{7}Be_{4} + Q$$

$$^{12}C_{6} + {}^{1}H_{1} \rightarrow {}^{13}N_{7} + Q$$

- Y entonces, la energía liberada será

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

Energía liberada en un proceso de fusión

$$ {}^{3}He_{2} + {}^{4}He_{2} \longrightarrow {}^{7}Be_{4} + Q $$

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

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

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

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

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

$$ \Rightarrow Q = Be(7,4) - B(3,2) - B(4,2) $$

Usando las tablas (ojo, la B/A en tabla) ⇒

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

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

En general

$$ \boxed{Q = B_{\text{producto}} - \Sigma B_{\text{reactivos}}} $$

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

Energía liberada en un proceso de fusión

- Entonces:

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

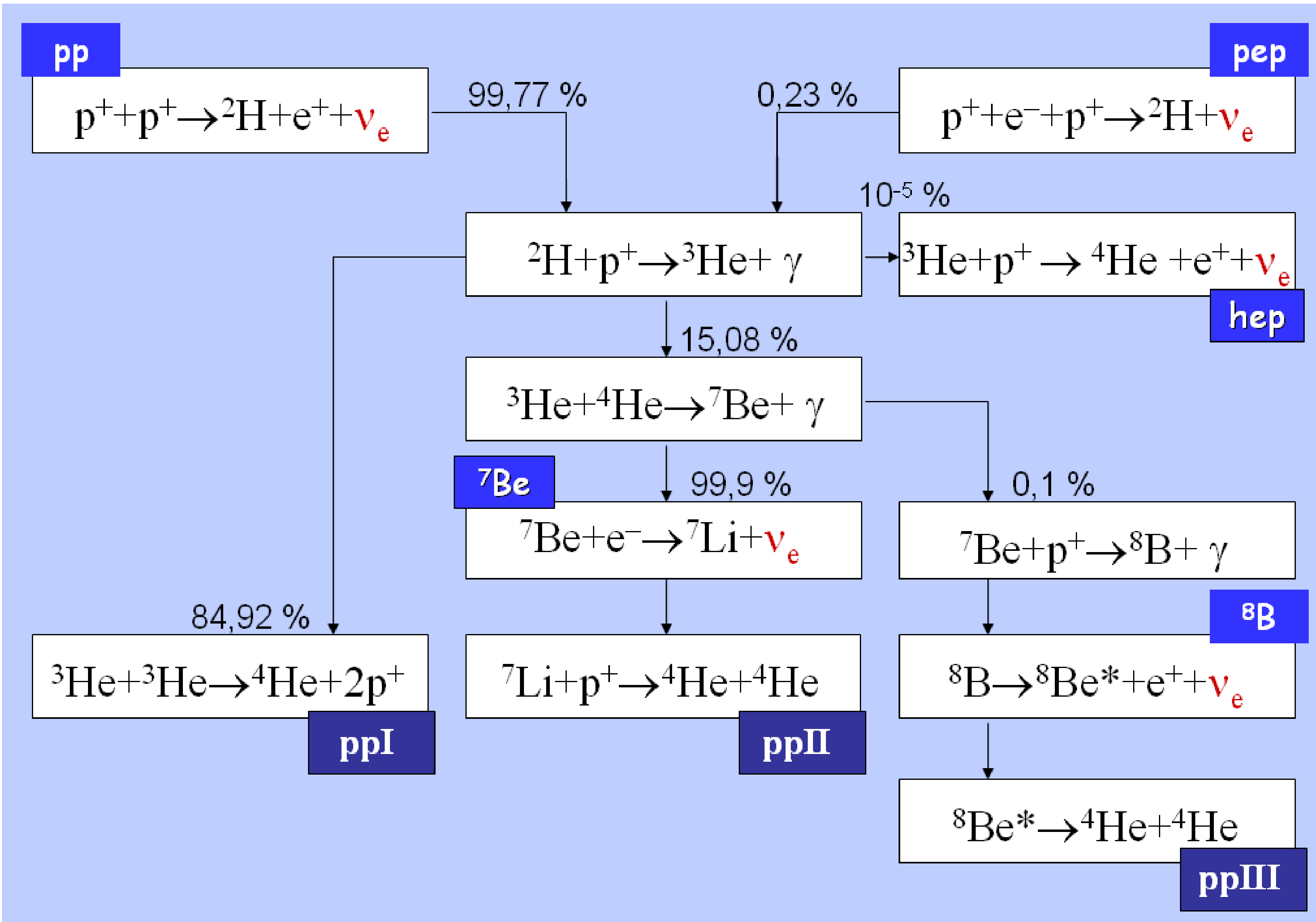
- Los valores de B(A,Z) pueden obtenerse de tablas
- Ver por ejemplo:

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

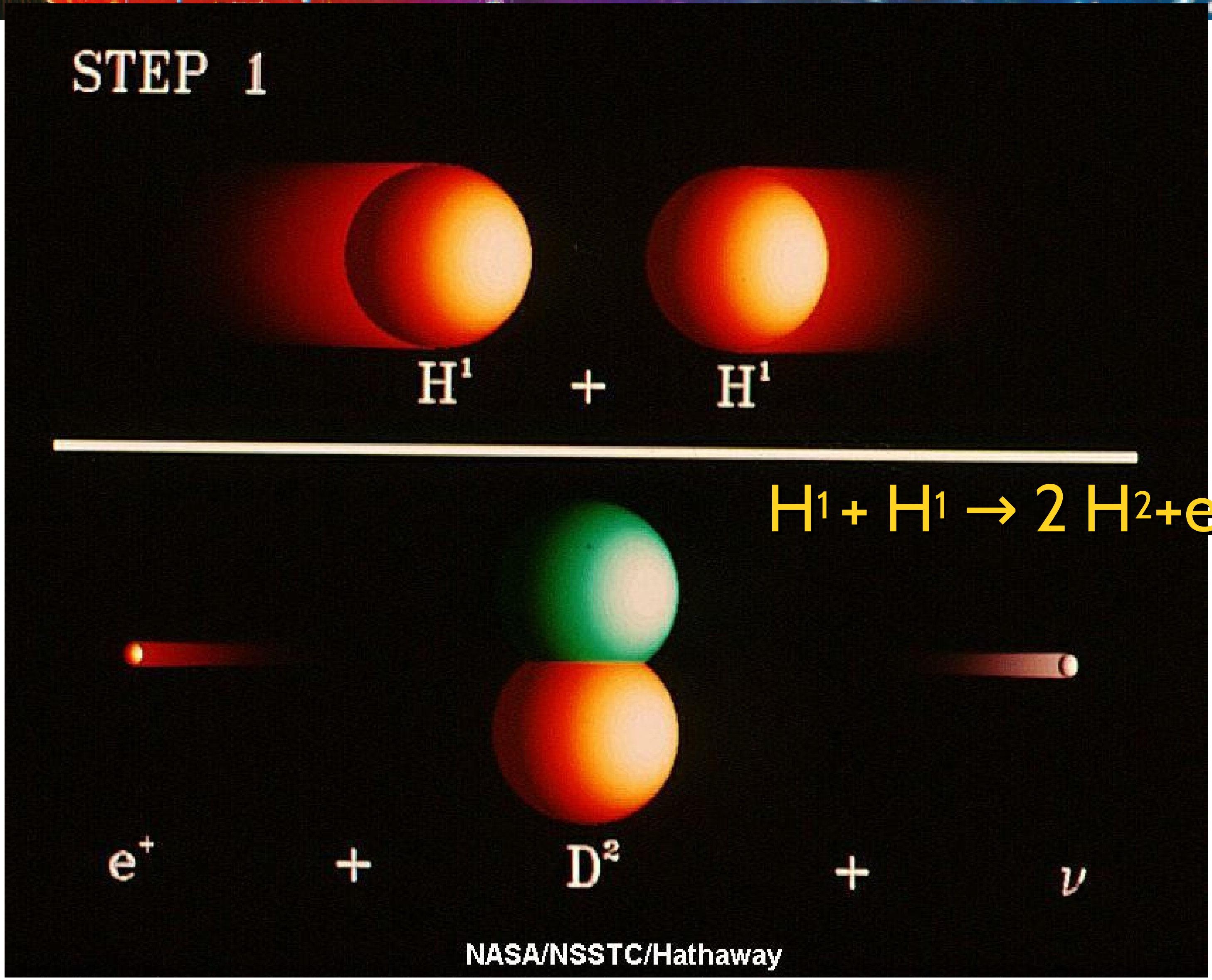
  también en Google play!:

  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*)

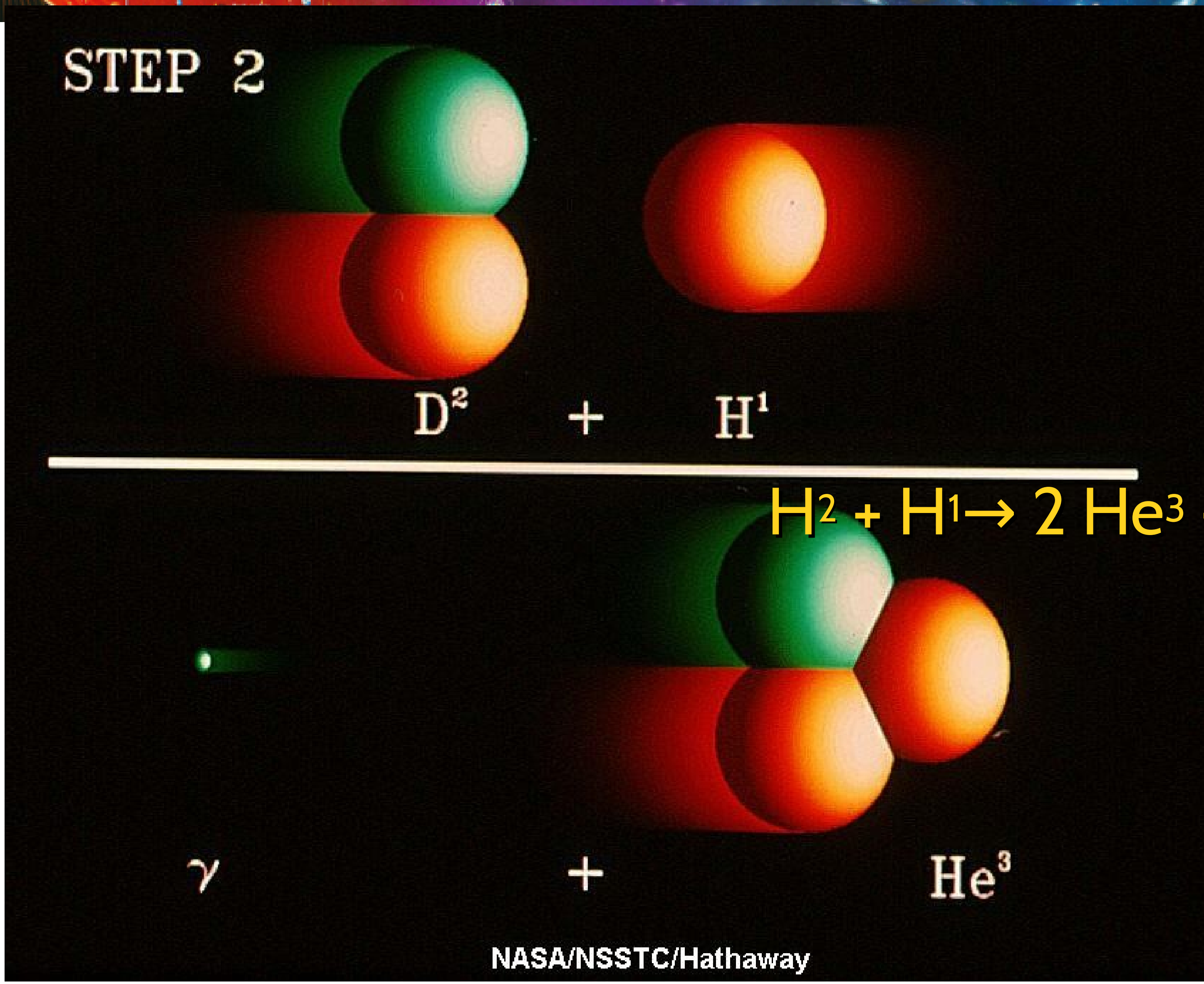


Fusión: Paso 1

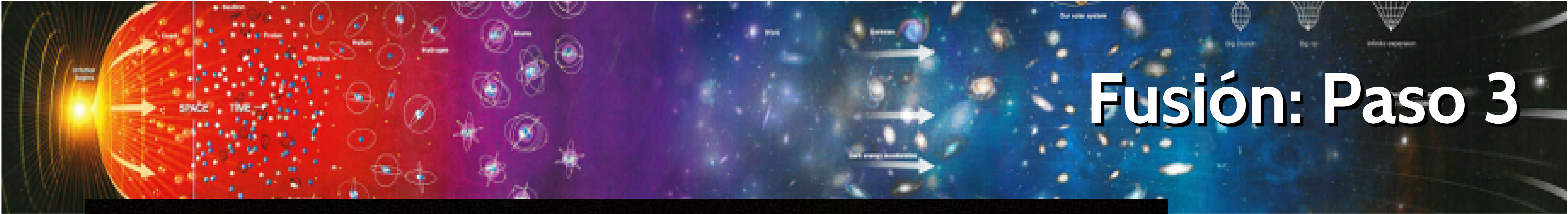


$H^1 + H^1 \rightarrow 2\ H^2 + e^+ + \nu +$ Energía

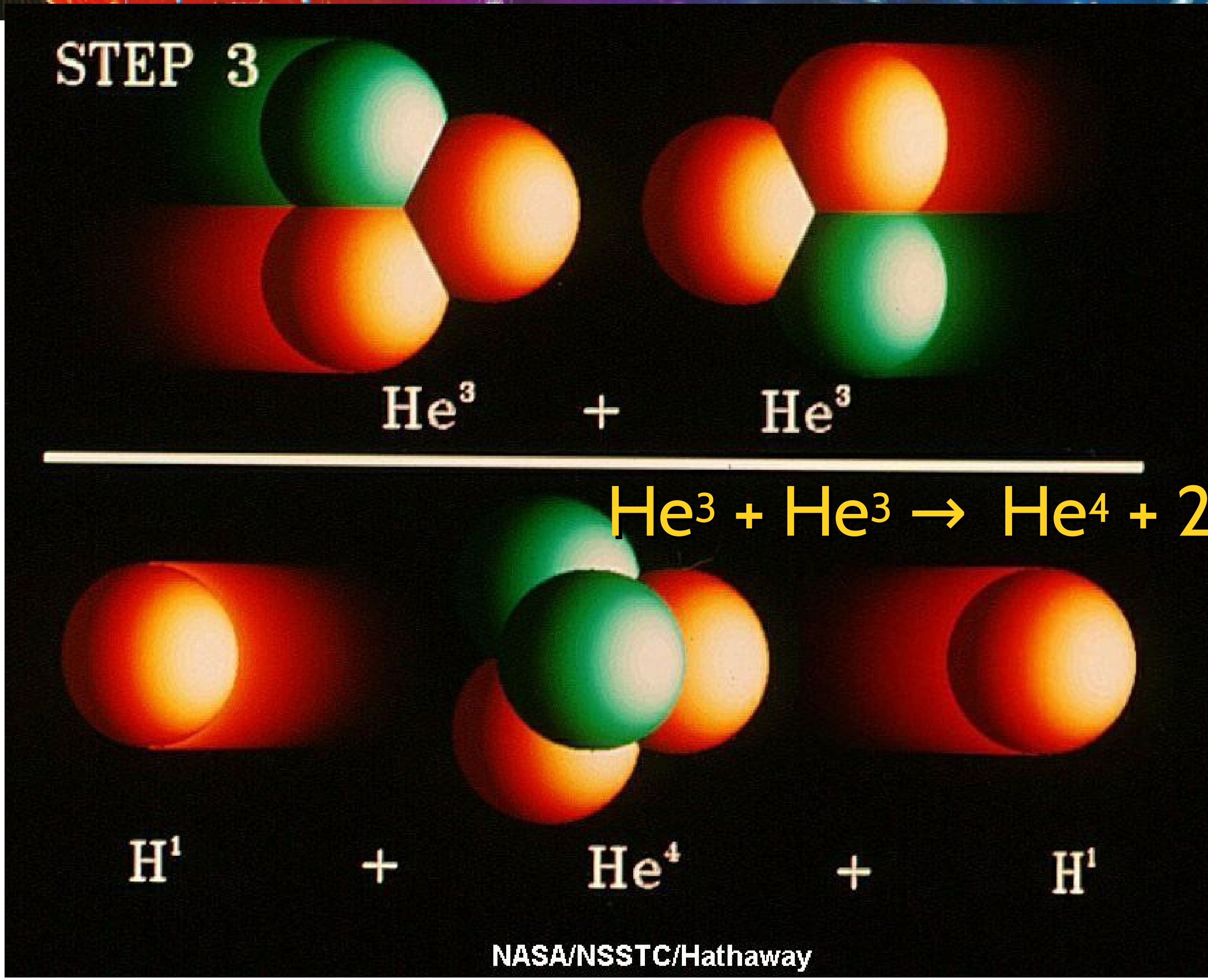
Fusión: Paso 2



$H^2 + H^1 \rightarrow 2\ He^3 + \gamma$ + Energía



Fusión: Paso 3



$He^{3} + He^{3} \rightarrow He^{4} + 2\,H^{1}$ + Energía

Fusión: Producción neta

$4\,H^1 \rightarrow He^4 + 2\,e^+ + 2\,\nu_e$ + Energía

Masa inicial: 1.003×10^{-26} kg

Masa final: 0.991×10^{-26} kg

$$E=mc^2$$

~ 26,7 MeV por reacción

La conservación de energía implica

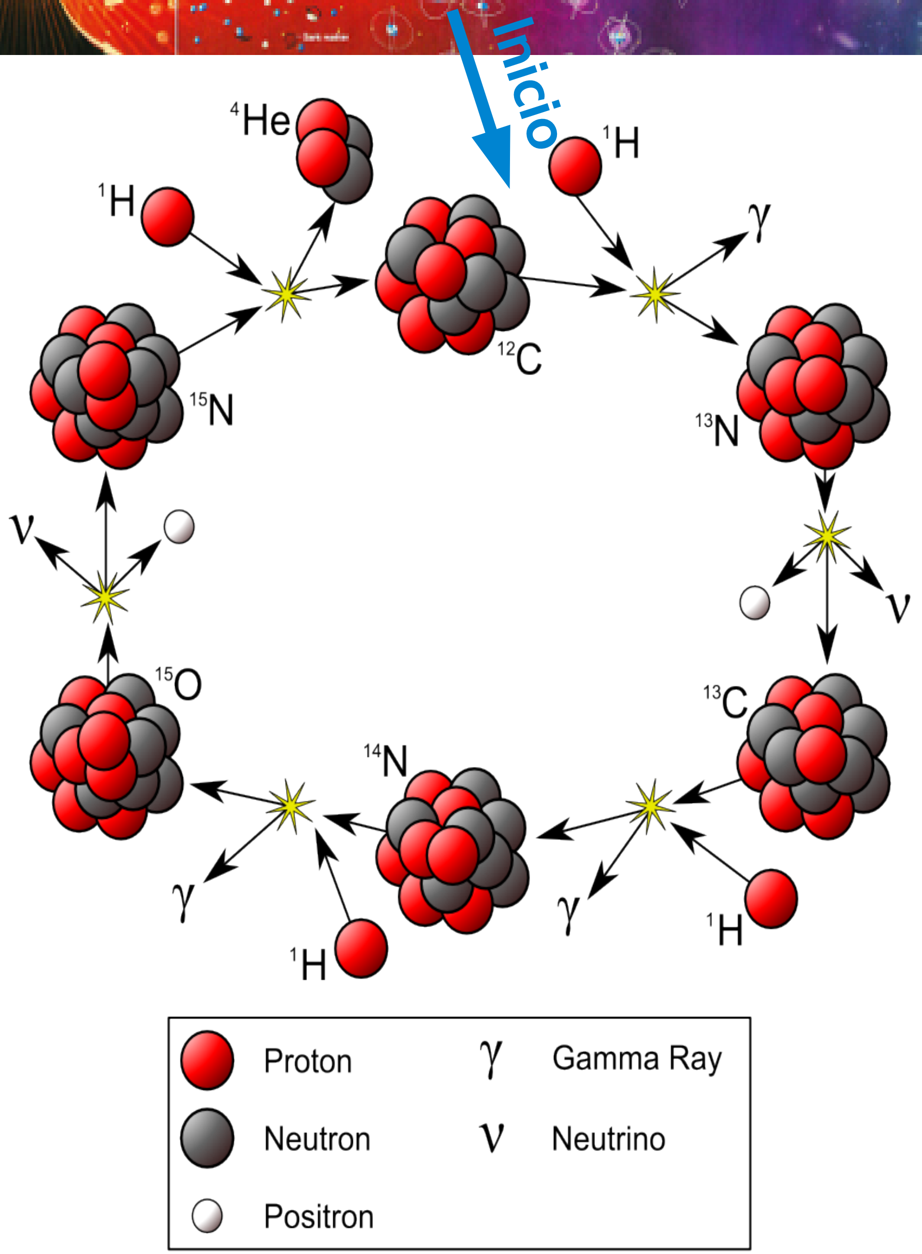
- Para el Sol:

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

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

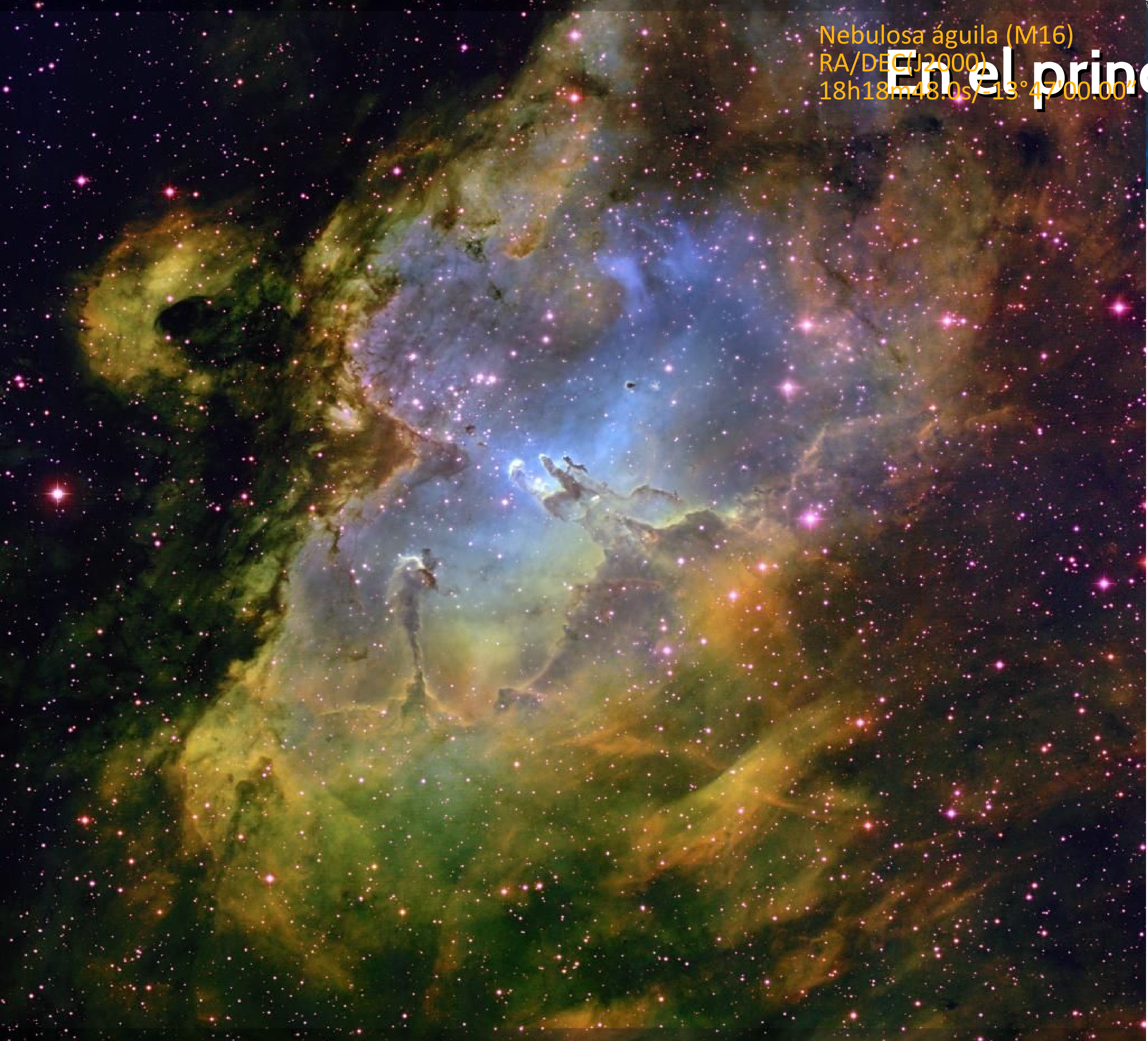
Conversión de masa en energía:
4.000.000 toneladas/seg

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



- Ciclo CNO (Carbono, Nitrógeno, Oxígeno)
- Usa el CNO como "catalizador"
- La reacción neta convierte 4 p → He + neutrinos + Q, al igual que la cadena pp
- Libera la misma cantidad de energía neta por reacción (26.73 MeV)

En el principio...



Pilares de la creación

En el principio...

- Nubes de gas gigantes
- $6x10^6$ M_S y R~15 pc
- Colapso gravitacional
- Aumenta temperatura
- T es pequeña pero R es muy grande

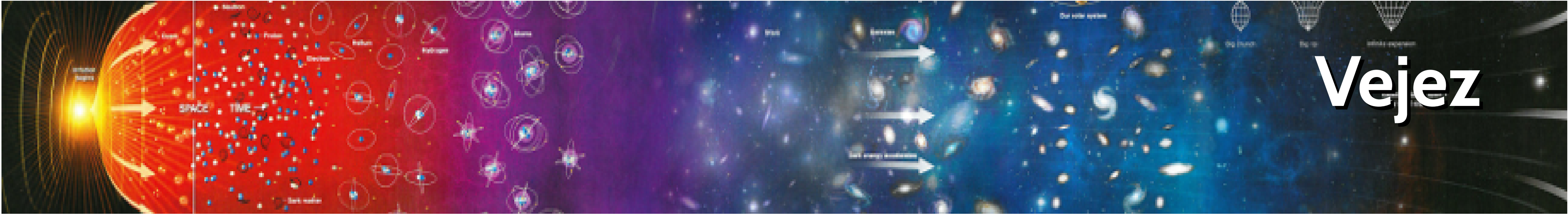
  ¡L es grande!
- → Gigantes Rojas

Pre-Secuencia

- La contracción se frena
- Continúa radiando
- Tc ~ 10^7 K → Fusión!
- Aumenta T por el exceso de energía
- Emisión de jets de materia

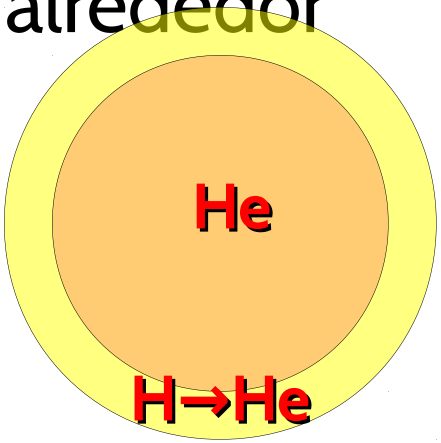
Secuencia Principal

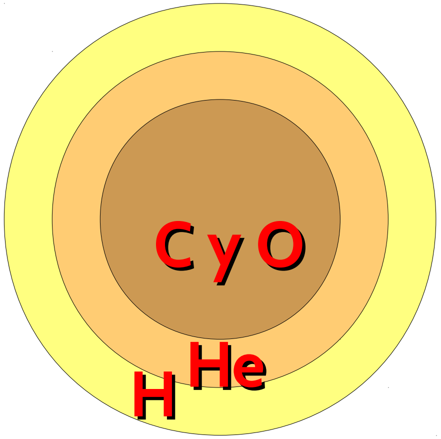
- Conversión H → He es muy eficiente
- 10^{10} años para $M = 1\ M_{Sol}$
  - La energía radiada, $L \sim R^2 T^4$ proviene del interior
  - Velocidad de reacciones en el centro: $\sim T_c^4$
  - $R^3 \sim M\ T_c / P$ (← Viene de PV=nRT)
- Si $T_c \rightarrow 2\ T_c \Rightarrow R \rightarrow 8\ R$
- Si $R \rightarrow 8R \Rightarrow L \rightarrow 64\ L$
- ¡Mayor energía radiada!
- Moraleja: "Vive rápido y morirás jóven"



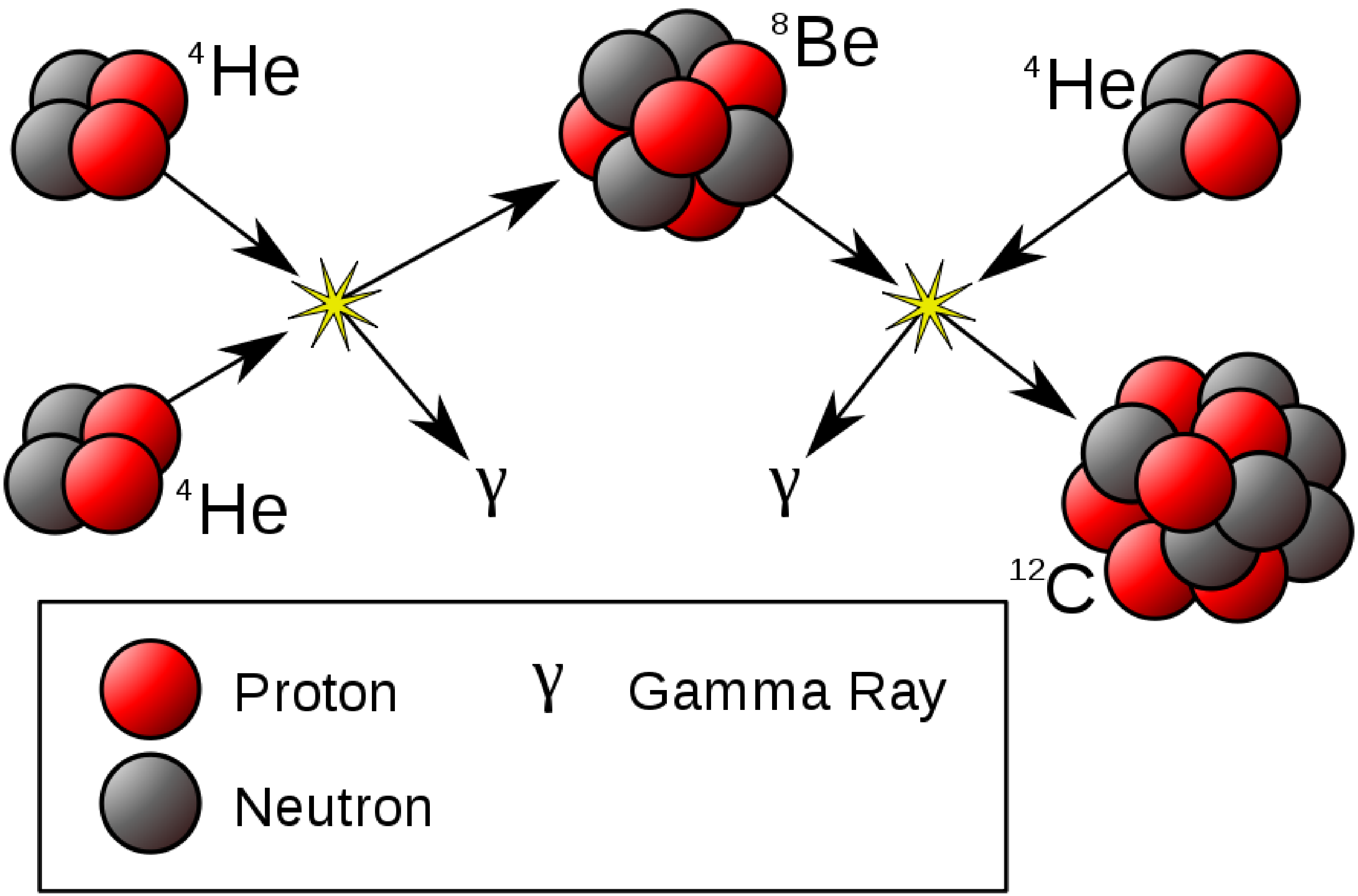
Vejez

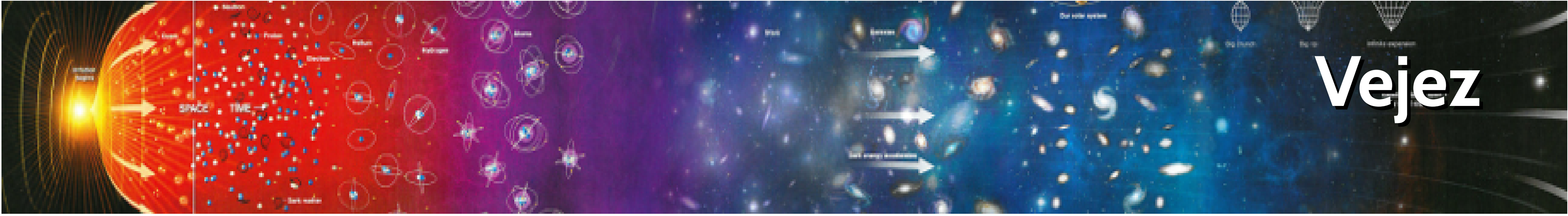
- Se acabó el H en el núcleo, ¿y ahora?
- Conversión H → He, sólo en en una corona alrededor del centro
- No alcanza la energía → Contracción
- Aumenta T_c → Mayor producción de E
- Si $T_c = 10^8$ K, He → C ("Flash de Helio")
- R_{Sol} → 220 veces!!!
- Pero 220 (7×10^5) km ~ *1.5×10^8 km*





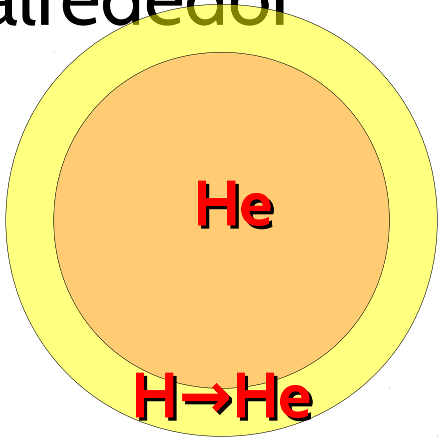
A mayor temperatura, es posible fusionar núcleos más pesados → Proceso Triple Alfa

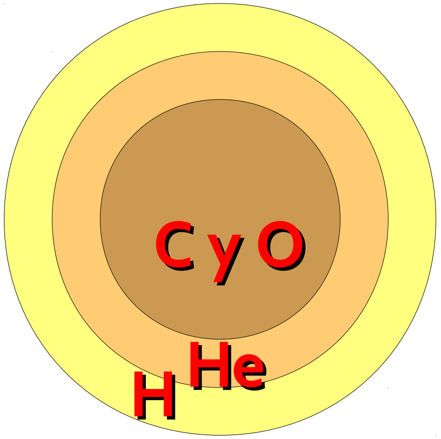




Vejez

- Se acabó el H en el núcleo, ¿y ahora?
- Conversión H → He, sólo en en una corona alrededor del centro
- No alcanza la energía → Contracción
- Aumenta T_c → Mayor producción de E
- Si $T_c = 10^8$ K, He → C ("Flash de Helio")
- R_{Sol} → 220 veces!!!
- Pero 220 (7×10^5) km ~ *1.5 x 10⁸ km*
- Núcleo cebolla: H → He → C → O → Si → Fe



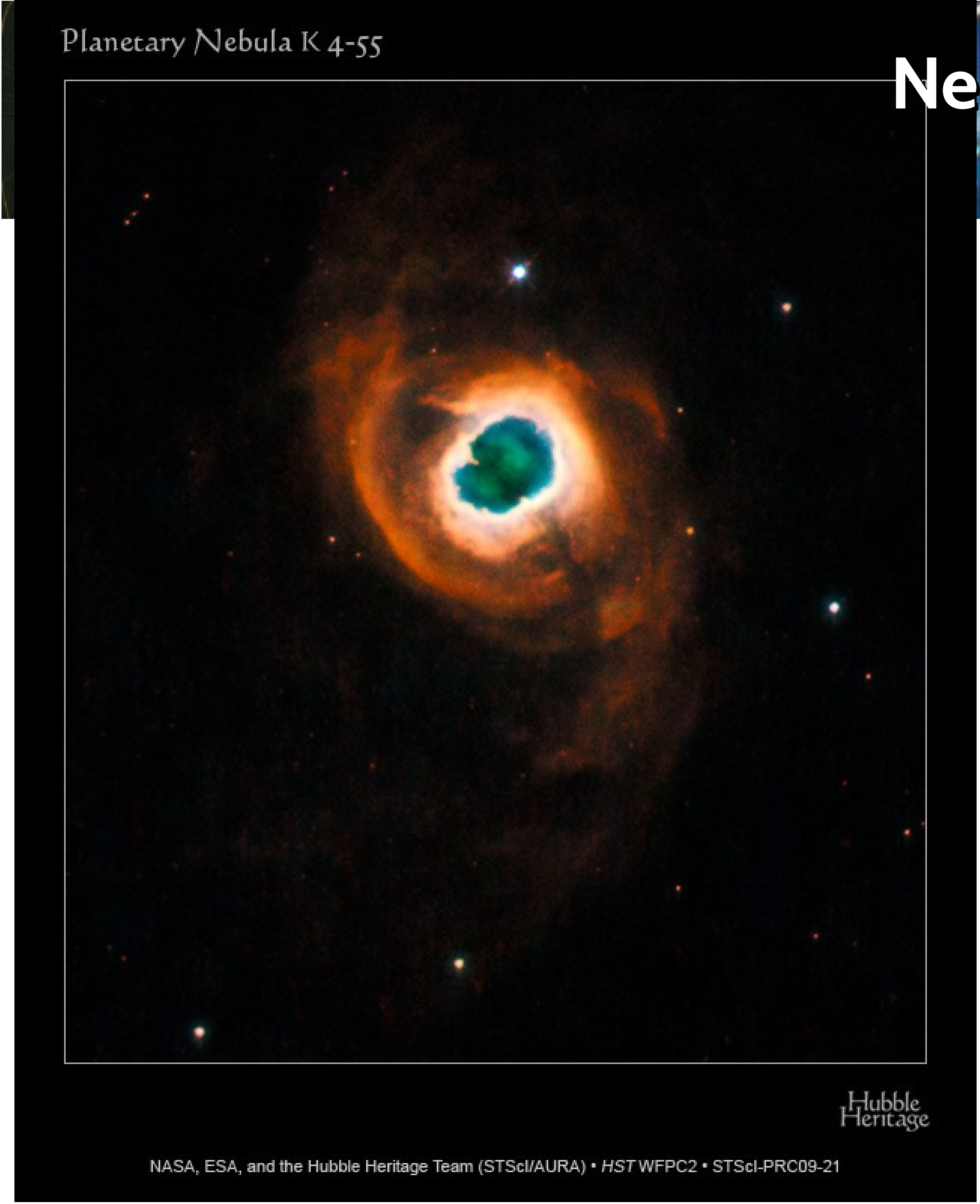


Y despúes → más masa → más temperatura → sigo subiendo la escalera nuclear (procesos alfa)

$$
\begin{array}{llll}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma & E = 7.16\ \mathrm{MeV} \\
{}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + \gamma & E = 4.73\ \mathrm{MeV} \\
{}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \gamma & E = 9.32\ \mathrm{MeV} \\
{}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + \gamma & E = 9.98\ \mathrm{MeV} \\
{}^{28}_{14}\mathrm{Si} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \gamma & E = 6.95\ \mathrm{MeV} \\
{}^{32}_{16}\mathrm{S} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{36}_{18}\mathrm{Ar} + \gamma & E = 6.64\ \mathrm{MeV} \\
{}^{36}_{18}\mathrm{Ar} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + \gamma & E = 7.04\ \mathrm{MeV} \\
{}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{44}_{22}\mathrm{Ti} + \gamma & E = 5.13\ \mathrm{MeV} \\
{}^{44}_{22}\mathrm{Ti} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{48}_{24}\mathrm{Cr} + \gamma & E = 7.70\ \mathrm{MeV} \\
{}^{48}_{24}\mathrm{Cr} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{52}_{26}\mathrm{Fe} + \gamma & E = 7.94\ \mathrm{MeV} \\
{}^{52}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} & \longrightarrow & {}^{56}_{28}\mathrm{Ni} + \gamma & E = 8.00\ \mathrm{MeV}
\end{array}
$$

Tres caminos Tres

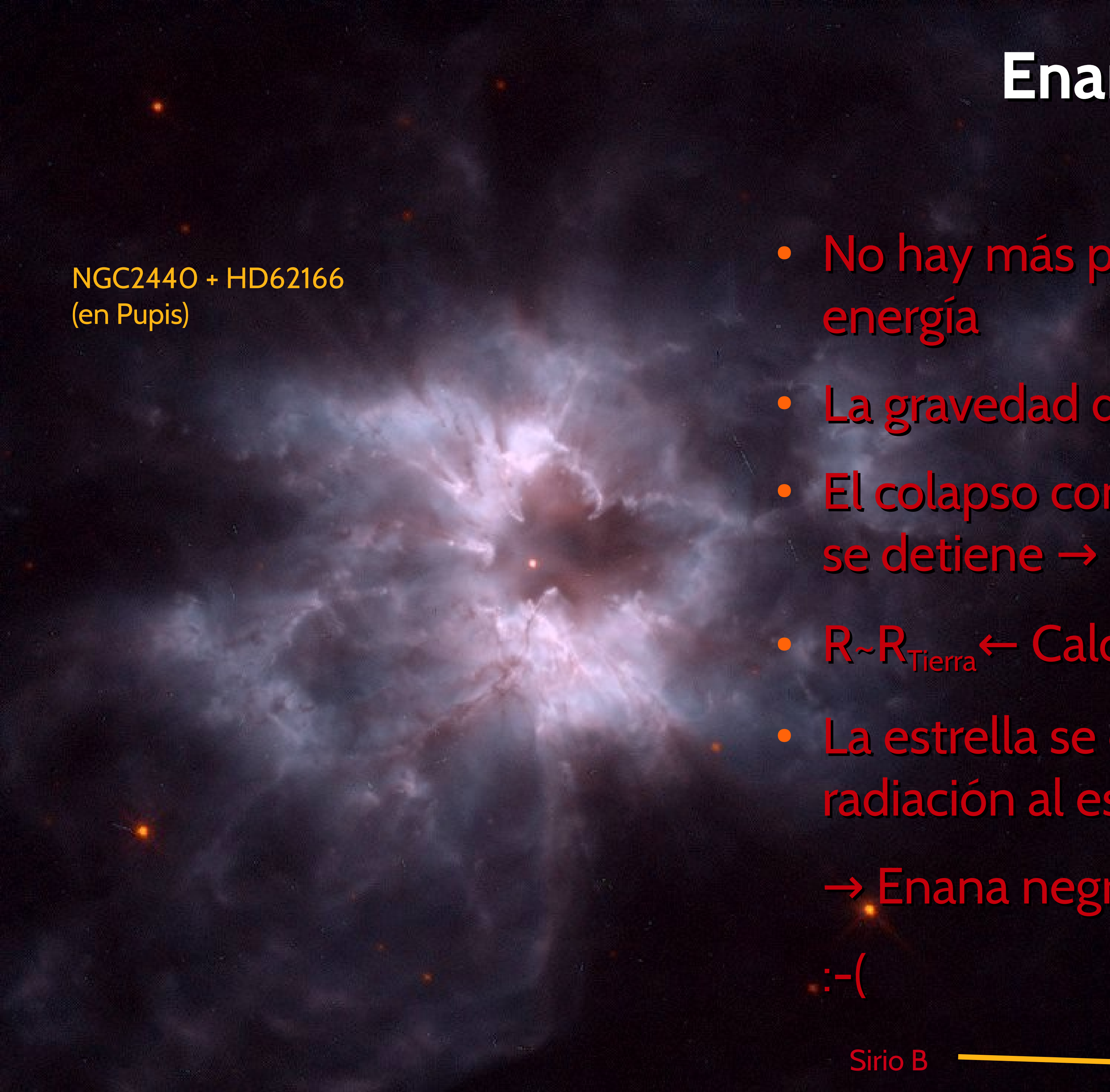
- La masa estelar en este punto (la masa final) determina el destino final
  - $M_f < 1.44\ M_S$ → **Enana blanca**
  - $1.44\ M_S < M_f < 3\ M_S$ → **Estrella de neutrones**
  - $M_f > 3\ M_S$ → **Agujero negro**



Nebulosa planetaria

- Las capas exteriores son expulsadas por el intenso viento estelar
- La estrella continúa consumiendo el combustible en el interior
- ~10^8 años

Enana blanca

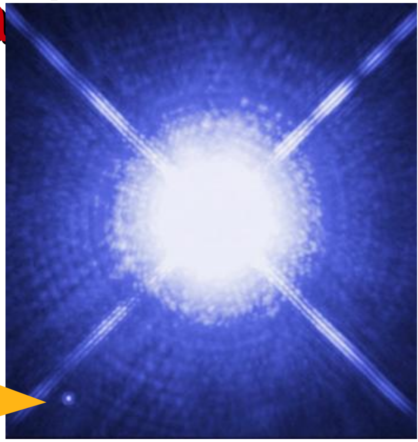


NGC2440 + HD62166
(en Pupis)

- No hay más producción de energía
- La gravedad domina
- El colapso comienza pero se detiene → Pauli!
- $R \sim R_{Tierra} \leftarrow$ Calcular ρ y v_e
- La estrella se enfría por radiación al espa

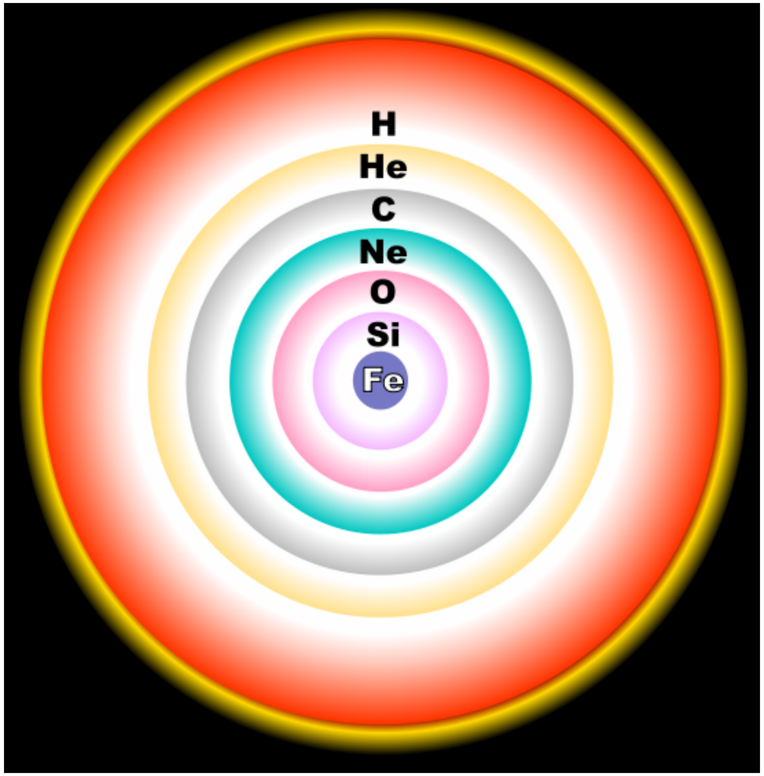
→ Enana negra

:-(



Sirio B

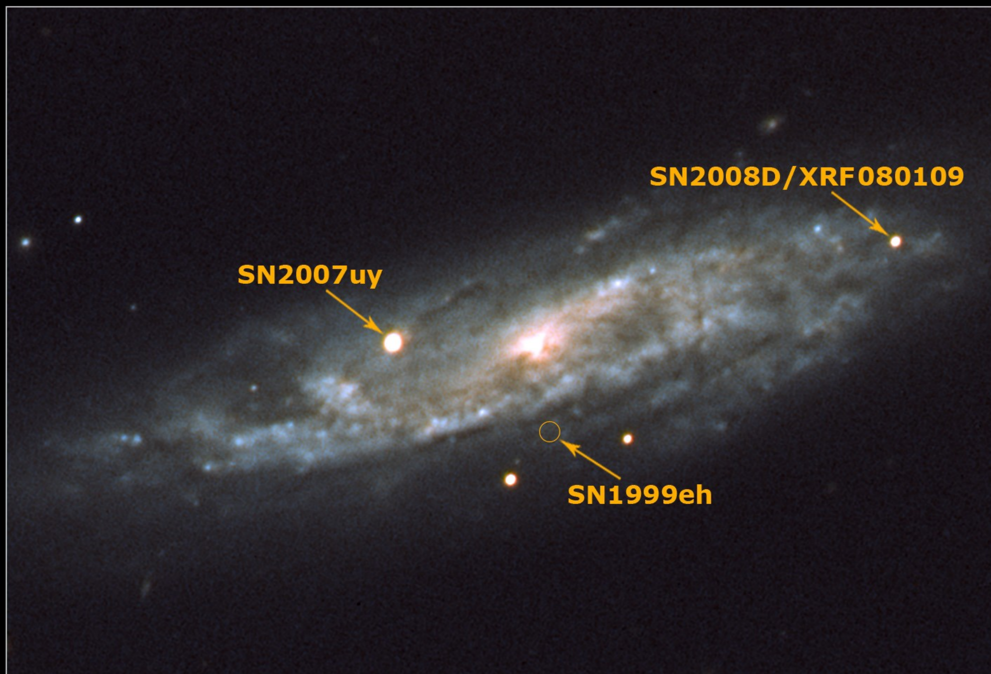
Si la masa es mayor...



- El proceso en el núcleo continúa gracias a la compresión
- He→C/O, C→Ne, Ne→O,O→Si, Si→Fe
- Pero Fe es el más estable: no gano energía uniendo Fe
- Sin fusión, desaparece la presión por radiación

¡El núcleo colapsa!

Supernovas

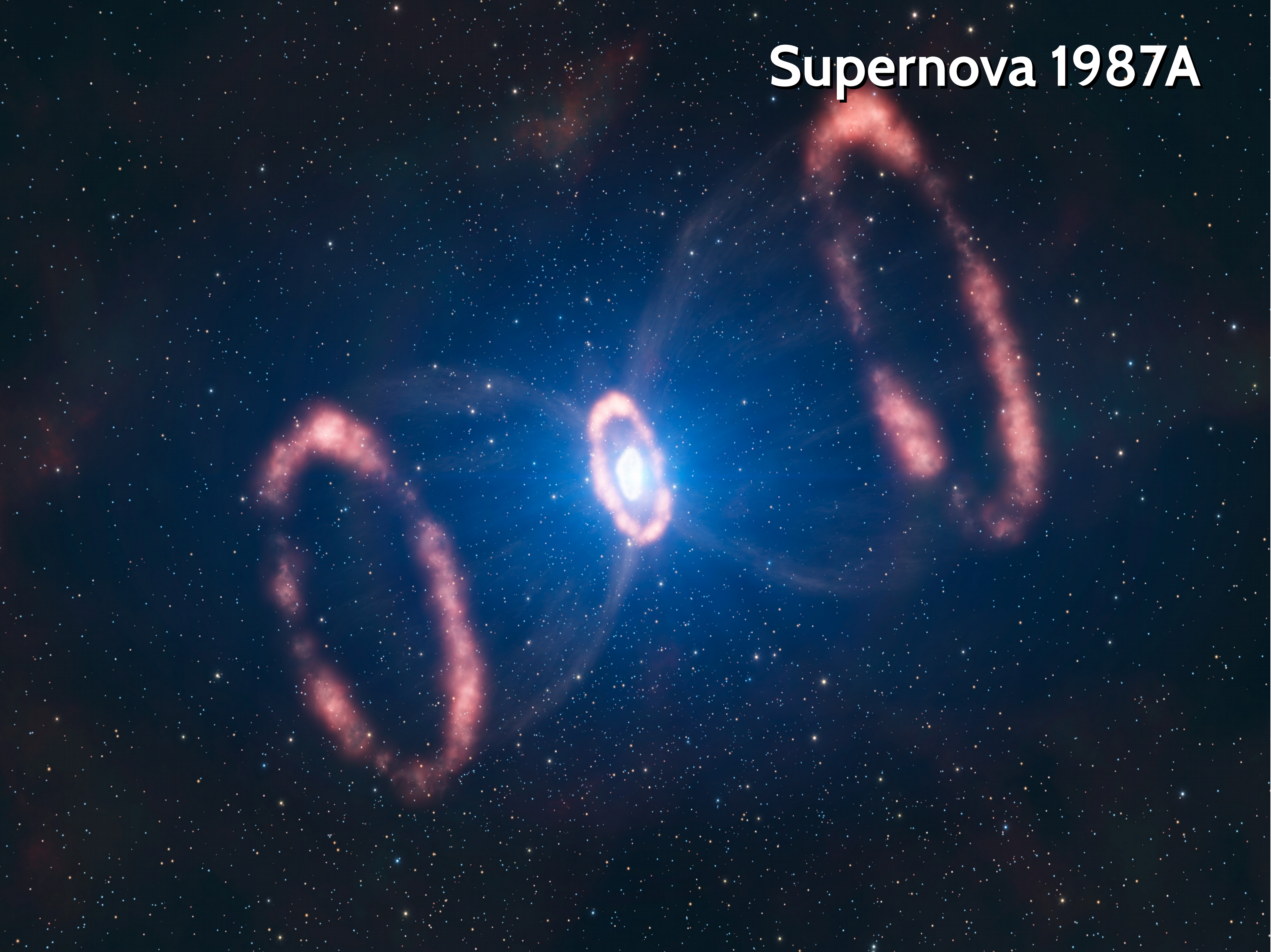


NGC 2770
Supernova factory

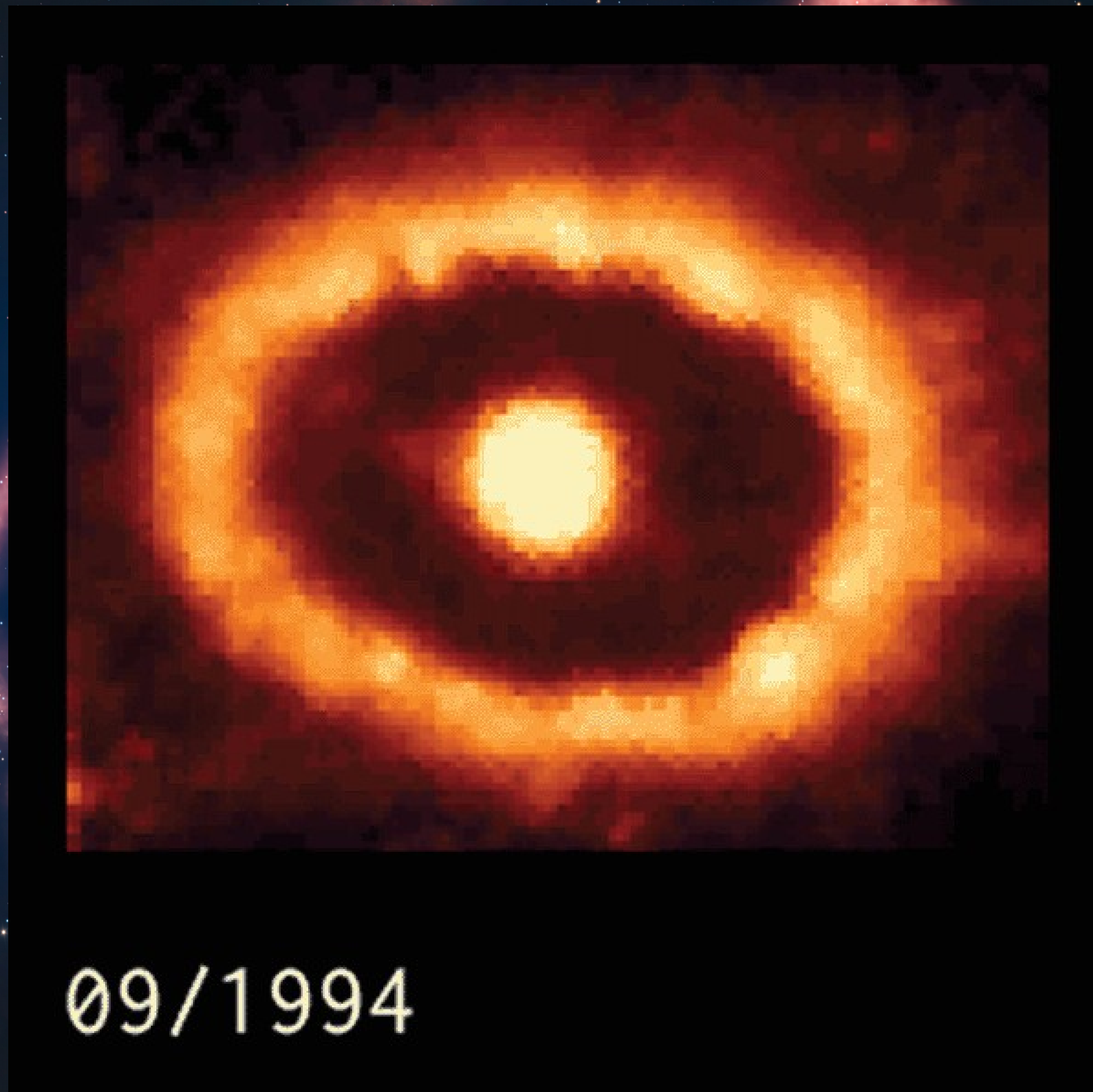
- Dos tipos de SN: I y II
- Estás son las tipo II
- En el núcleo:

  $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$

- Estrella de neutrones
- $M \sim 2\ M_{Sol}$, $R \sim 20$ km
- ¡Calcular ρ y v_e!
- Pulsars (LGM)
- M grandes→ Agujeros Negros


Supernova 1987A

Supernova 1987A (u03-c04-sn1987ashock.gif)



Remanente de Supernovas

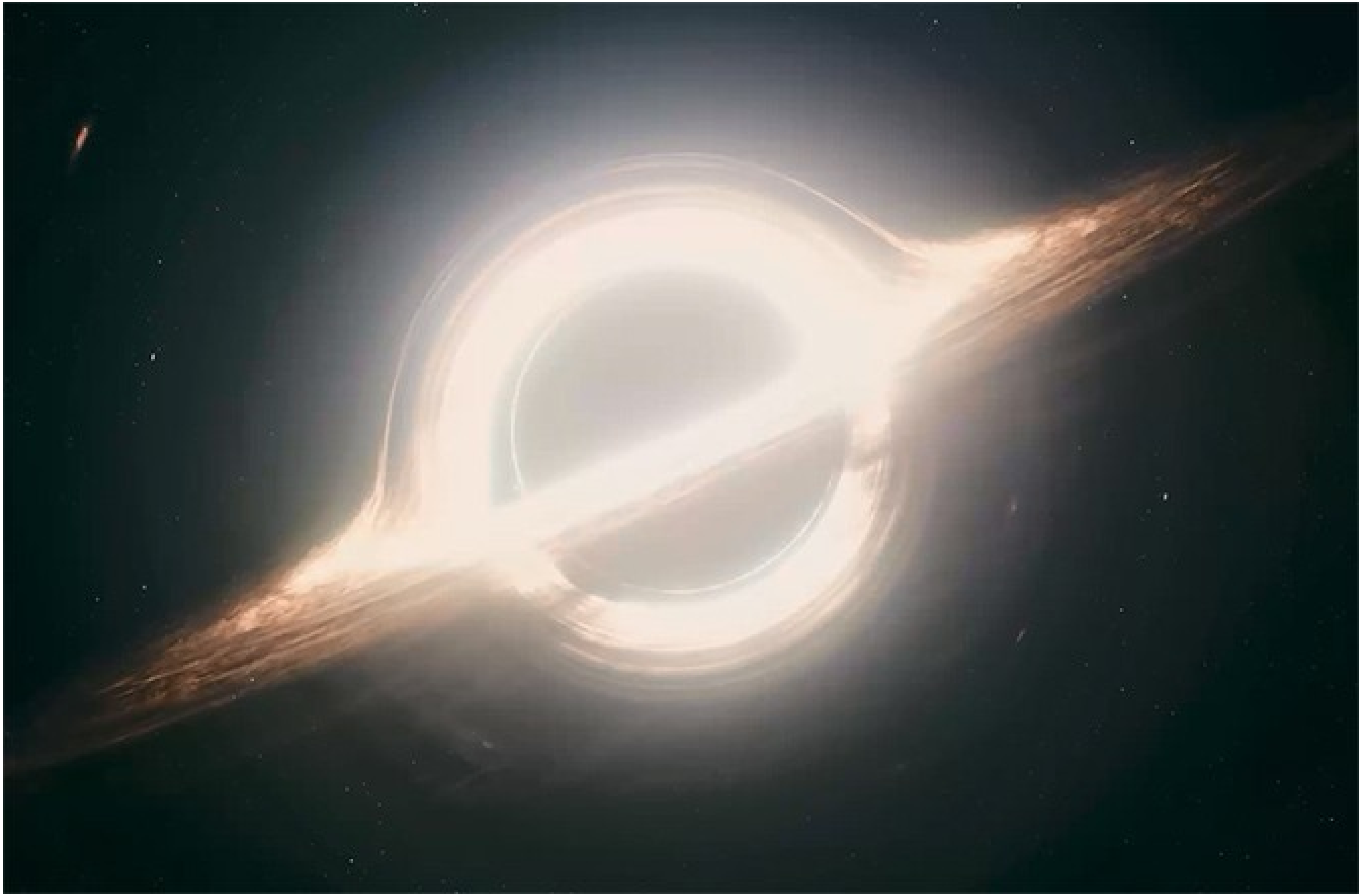
NGC2264 – Nebulosa Cono (Monoceros)

Agujeros negros

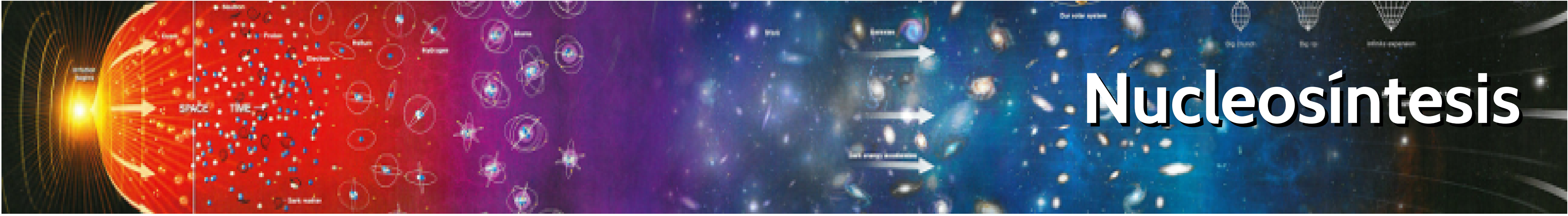
- Región del espacio tiempo donde nada, ni siquiera la luz, puede escapar
- Se lo observa por su interacción con materia
- Binaria de contacto Cygnus X1
- Horizonte de eventos
  - Radio de Schwarzschild

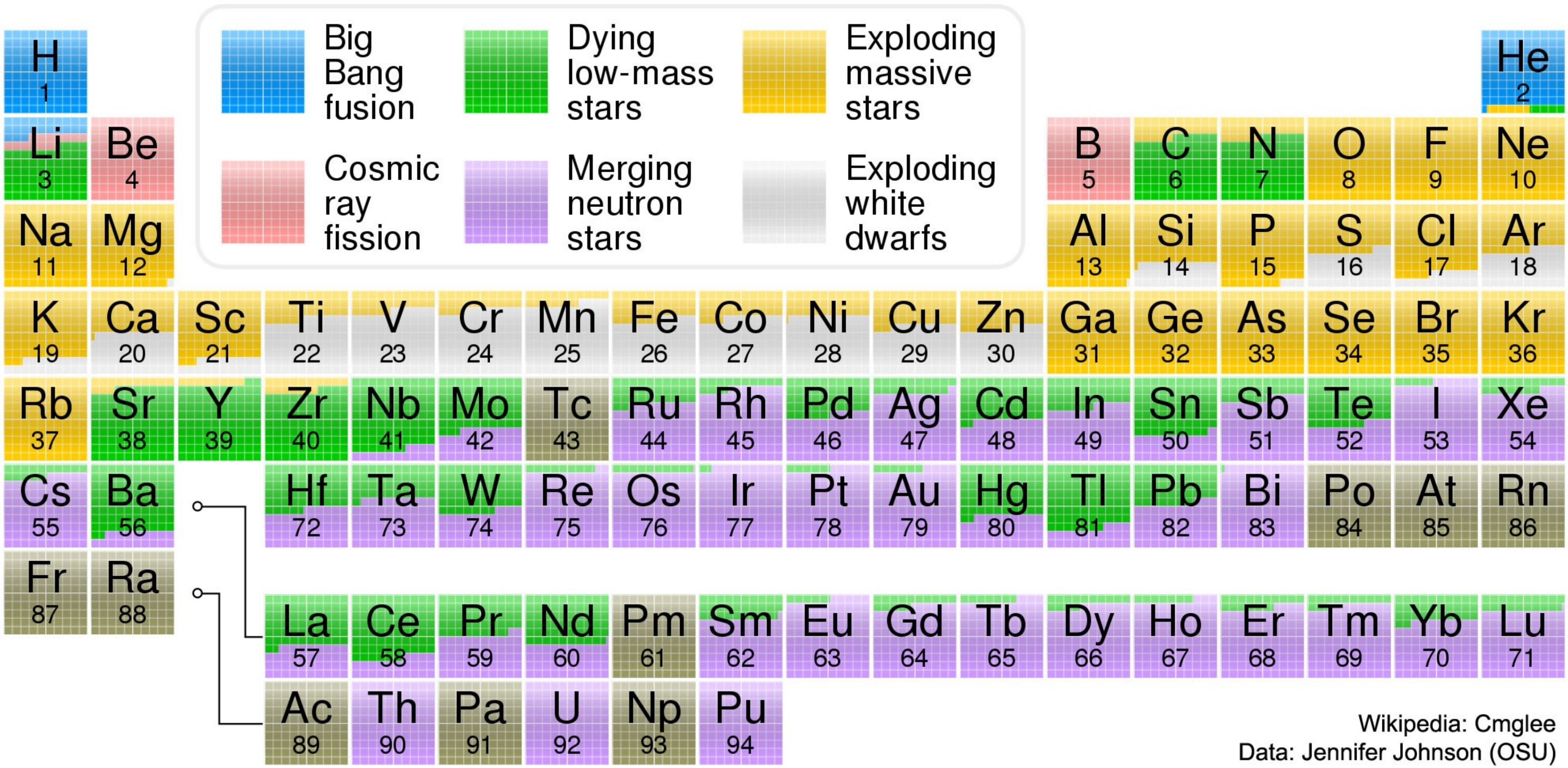
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Gargantúa (Interstellar)



Nucleosíntesis





Wikipedia: Cmglee
Data: Jennifer Johnson (OSU)