



Universidad Nacional de Río Negro

Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2018

- **Unidad** 02 – Astrofísica: cálido y frío
- **Clase** UO2 C06
- **Fecha** 24 Oct 2018
- **Cont** Estrellas – 3
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://asoreyh.github.io/unrn-ipac/>
- **Youtube** <https://goo.gl/UZJzLk>





Temas de monografía para trabajo final algunas ideas, lista no excluyente

- Evolución estelar
- Objetos compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros)
- Ensayo sobre posibilidades de vida en Europa (luna de Júpiter)
- El GalaxyZoo: principales resultados
- Otras Tierras: exoplanetas similares a la Tierra
- Spirit, Opportunity y Curiosity: explorando la superficie de Marte
- La sonda Cassini-Huygens: Saturno y Titán
- El Big Bang
- Nucleosíntesis
- ...



Temas de monografía para trabajo final algunas ideas, lista no excluyente

- Evolución estelar
- Objetos compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones,

METODOLOGÍA CHARLA DE CIERRE

- Charla de 30 minutos, público objetivo: sus compañeros de IPAC 2018
- Presentación virtual por hangout el **Miércoles 21/NOV/2018 19:00**
- Fecha de límite de selección de tema: **Miércoles 31/OCT/2018 19:00**
- Es condición de promoción la presentación de esta charla

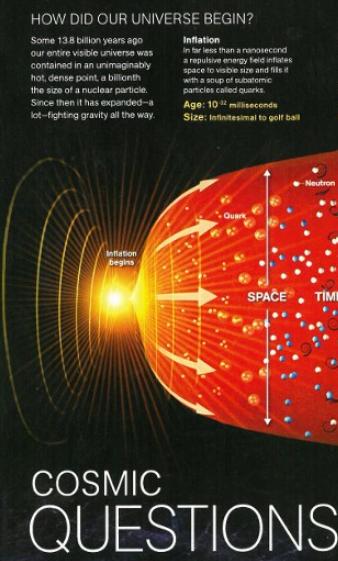
...



Programación encuentros faltantes

- 11, U02C06V, 24/10/2018: Estrellas, final ← HOY
- 12, U03C01V, 25/10/2018: Exoplanetas y astrobiología
- 13, U03C02V, 31/10/2018: Relatividad General, 1ra parte
- 14, U03C03P, 07/11/2018: La estructura a gran escala del Universo
- 15, U04C01P, 08/11/2018: El big bang y cosmología inflacionaria
- 16, U04C02V, 14/11/2018: Relatividad General, 2da parte
- 17, U04C03V, 21/11/2018: Evolución térmica y **Charla de cierre**

Contenidos: un viaje en el tiempo



In the 20th century the universe became a story—a scientific one. It had always been seen as static and eternal. Then astronomers observed other galaxies flying away from ours, and Einstein's general relativity theory implied space itself was expanding—which meant the universe had once been denser. What had seemed eternal now had a beginning and an end. But what beginning? What end? Those questions are still open.

WHAT IS OUR UNIVERSE MADE OF?

Stars, dust, and gas—the stuff we can discern—make up less than 5 percent of the universe. Their gravity can't account for how galaxies hold together. Scientists figure about 24 percent of the universe is a mysterious dark matter—perhaps exotic particles formed right after inflation. The rest is dark energy, an unknown energy field or property of space that counters gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.



WHAT IS THE SHAPE OF OUR UNIVERSE?

Einstein discovered that a star's gravity curves space around it. But is the whole universe curved? Might space close up on itself like a sphere or curve the other way, opening out like a saddle? By studying cosmic background radiation, scientists have found that the universe is poised between the two: just dense enough with just enough gravity to be almost perfectly flat, at least the part we can see. What lies beyond we can't know.

Early building blocks
The universe expands, cools
Quarks clump into protons and neutrons, creating the building blocks of atomic nuclei.
Perhaps dark matter forms.
Age: 10^{-3} milliseconds
Size: Infinitesimal to golf ball

First nuclei
As the universe continues to cool, the lightest nuclei, of hydrogen and helium, arise. A thick fog of particles blocks all light.
.01 milliseconds
Size: 1-billionth present size

First atoms, first light
As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from their infalling orbits arises. This light is as far back as our instruments can see.
.01 to 200 seconds
.0009 present size

The "dark ages"
For 300 million years this continues, with no light. Clumps of dark matter begin to form galaxies and stars. Galaxies glow brightest.
380,000 to 300 million years
.0009 to 0.1 present size

Gravity wins: first stars
Dense gas clouds collapse under their own gravity and form galaxies and stars. Nuclei fusion lights up the stars.
300 million years
0.1 present size

Antigravity wins
After being slowed for billions of years, cosmic expansion accelerates again. The culprit: dark energy. Its nature: unclear.
10 billion years
.77 present size

Today
The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming.
13.8 billion years
Present size

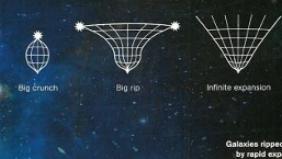
Unidad 2 Astrofísica Cálido y frío

DO WE LIVE IN A MULTIVERSE?

What came before the big bang? Maybe other big bangs. The uncertainty principle holds that even the vacuum of space has density fluctuations. Inflation theory says our universe exploded from such a fluctuation—a random event that, odds are, had happened many times before. Our cosmos may be one in a sea of others just like ours—or nothing like ours. These other cosmos will very likely remain forever inaccessible to observation; their possibilities limited only by our imagination.

HOW WILL IT END?

Which will win in the end, gravity or antigravity? Is the density of matter enough for gravity to halt or even reverse cosmic expansion, leading to a big crunch? It seems unlikely—especially given the power of dark energy, a kind of antigravity. Perhaps the acceleration in expansion caused by dark energy will trigger a big rip that shreds everything, from galaxies to atoms. If not, the universe may expand for hundreds of billions of years, long after all stars have died.



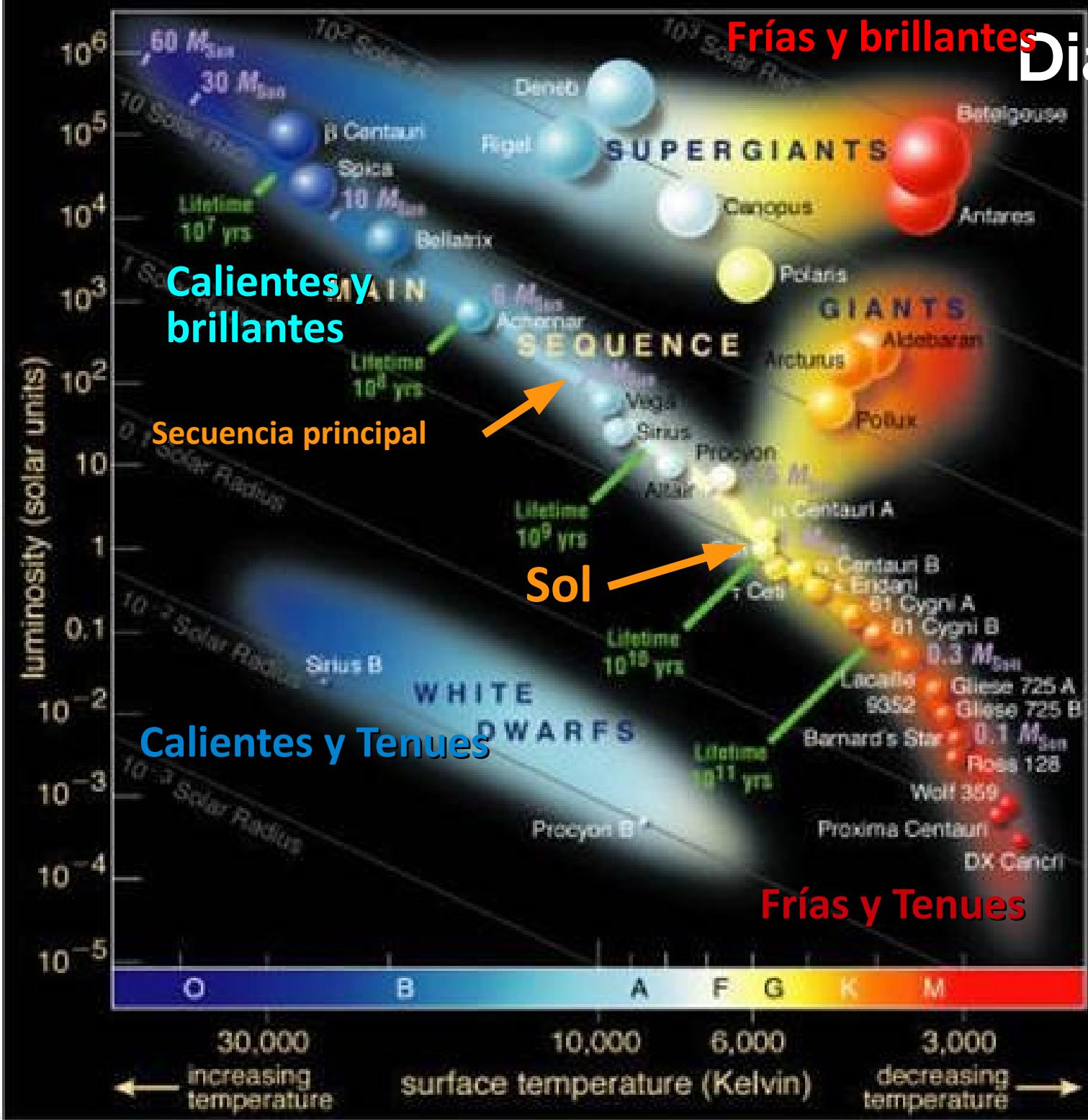
Unidad 1 Partículas 1 *todo es relativo*



By through the universe on
our digital edition

LONDON PHOTOS: ANDREW TAYLOR; GENEVA: PHILIPPE DESMAZES/GETTY IMAGES; ART: MONTAGNA DESIGN; SOURCES: CHARLES BENNETT, JOHN HESTER, ANDREW LINSLEY, ANDREW LINSLEY, UNIVERSITY OF CHICAGO; COURTESY OF CERN; NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY

Diagrama H-R



T₄

R₂

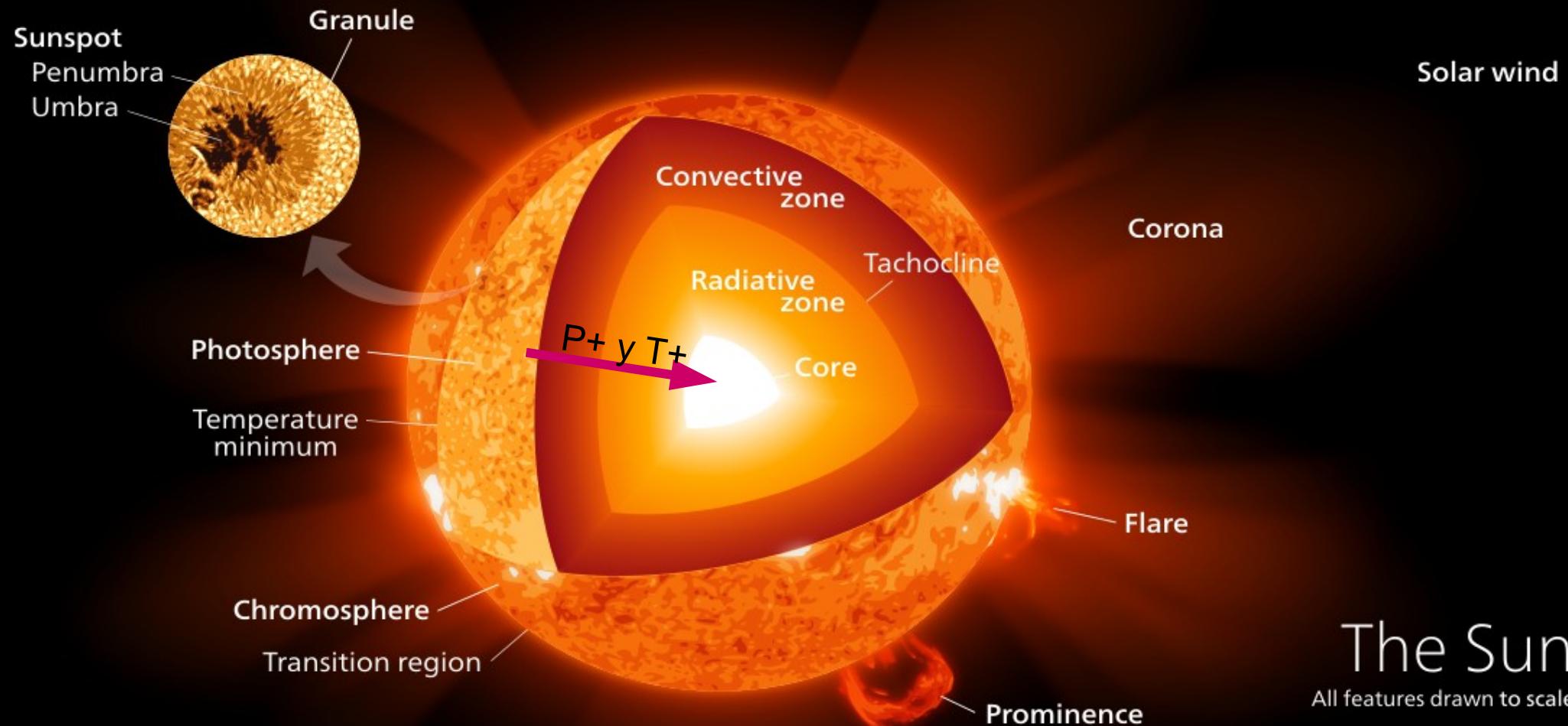
L

η Carinae: Una binaria a punto caramelo



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

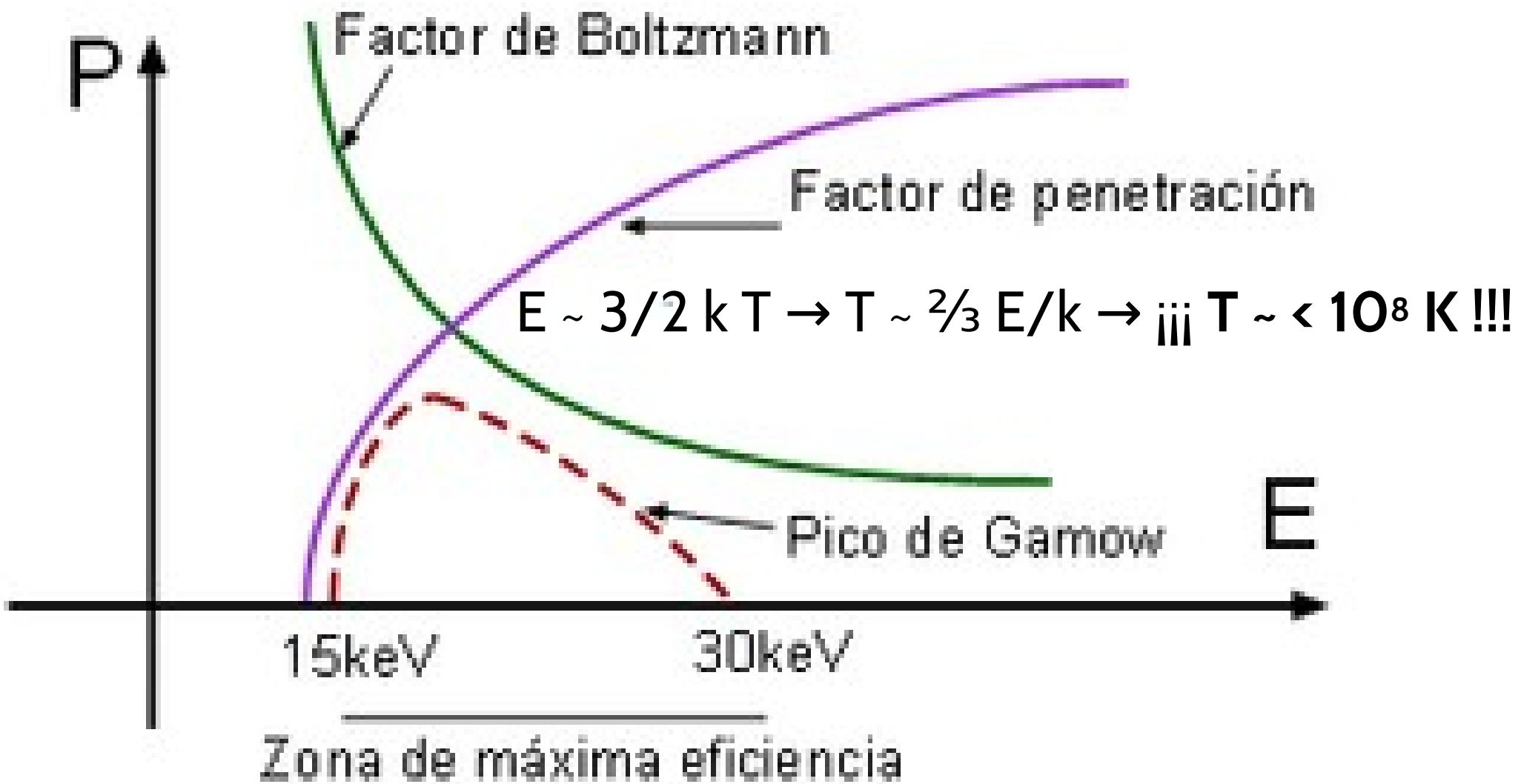
Estructura de una estrella típica (Sol)



The Sun

All features drawn to scale

Efecto túnel → Pico de Gamow (1928)





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



Fusión: Producción neta



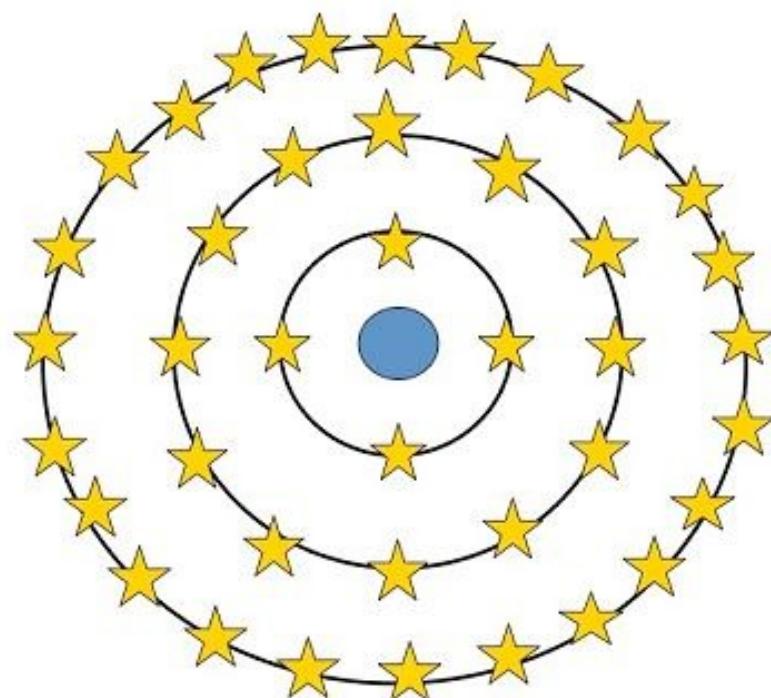
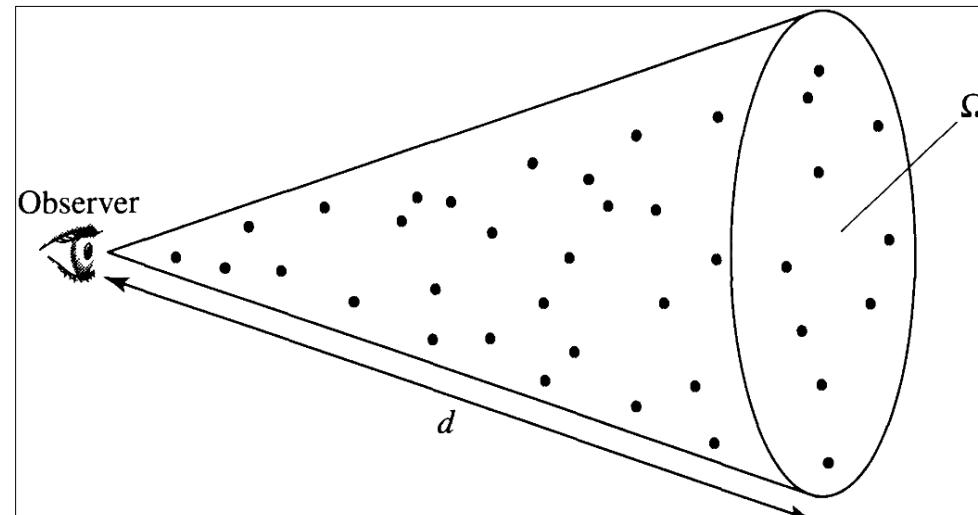
Masa inicial: $1.003 \times 10^{-26} \text{ kg}$

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

$$E=mc^2$$

~ 26,7 MeV por reacción

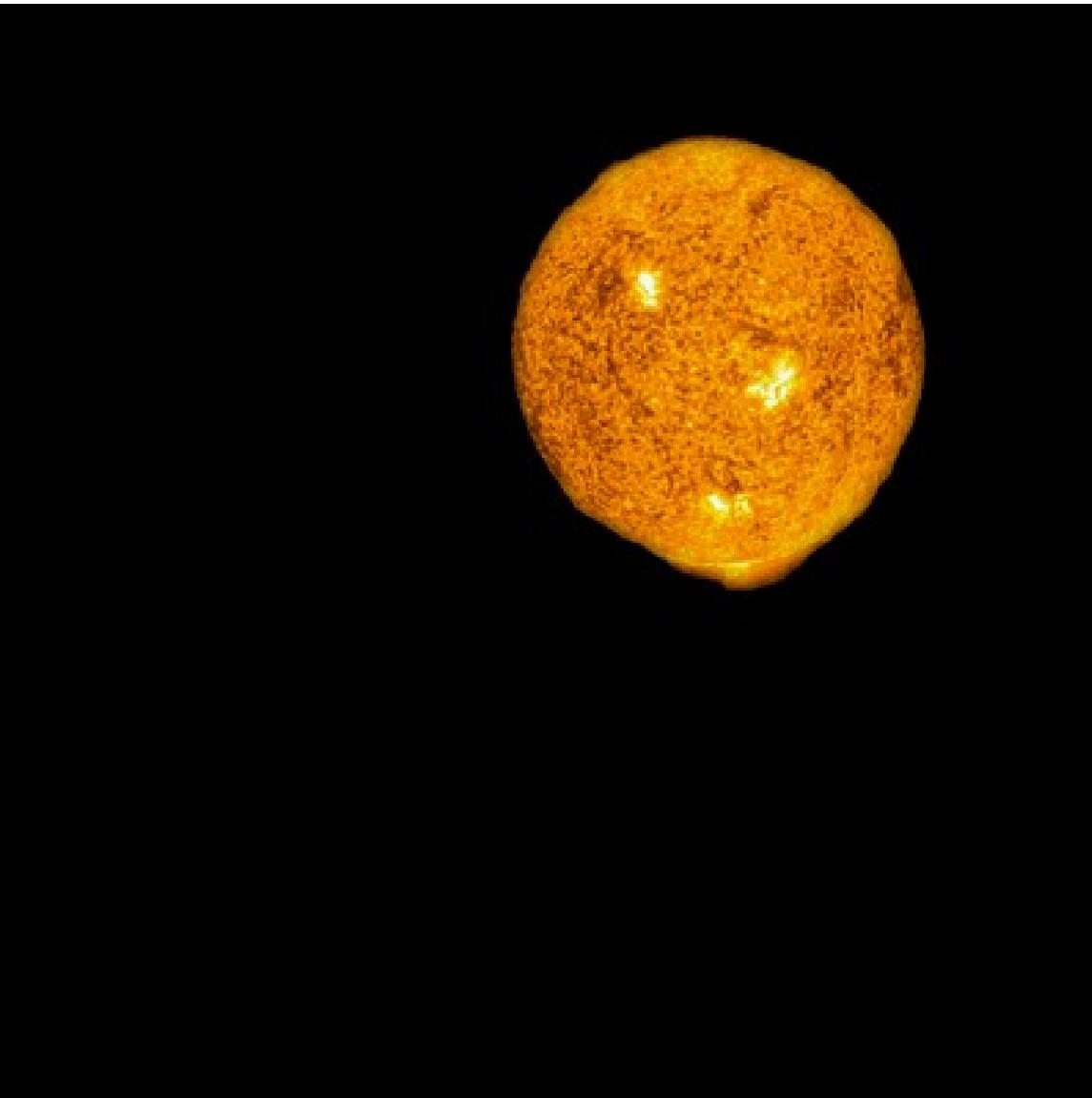
La paradoja de Olbers



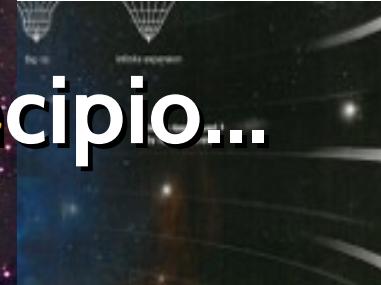
- Supongamos que hay infinitas estrellas...
- El número de estrellas en la superficie de un cono crece como d^2 .
- Pero el flujo disminuye como d^2 .
- Ergo, el flujo de energía de la superficie del cono es constante
- El cielo completo brillaría como las estrellas $\rightarrow T=5700 \text{ K}$



Paradoja de Olbers



- No hay infinitas estrellas
- Hay absorción en el espacio

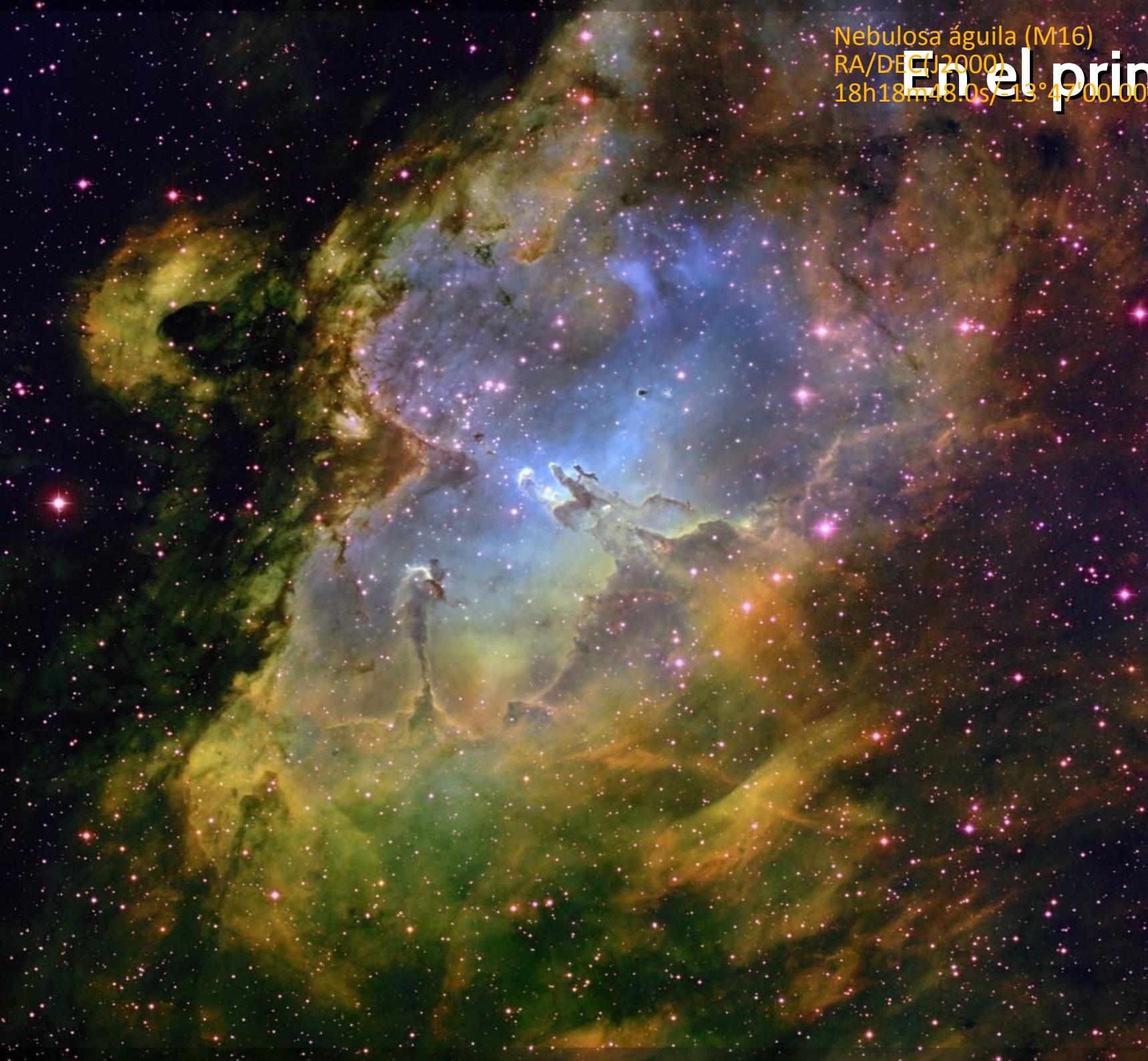


Nebulosa águila (M16)

RA/DEC(J2000)

18h18m48.0s / 18°47'00.00"

En el principio...



En el principio...

- Nubes de gas gigantes
- $6 \times 10^6 M_{\odot}$ y $R \sim 15$ pc
- Colapso gravitacional
- Aumenta temperatura
- T es pequeña pero R es muy grande
 ¡L es grande!
- → Gigantes Rojas

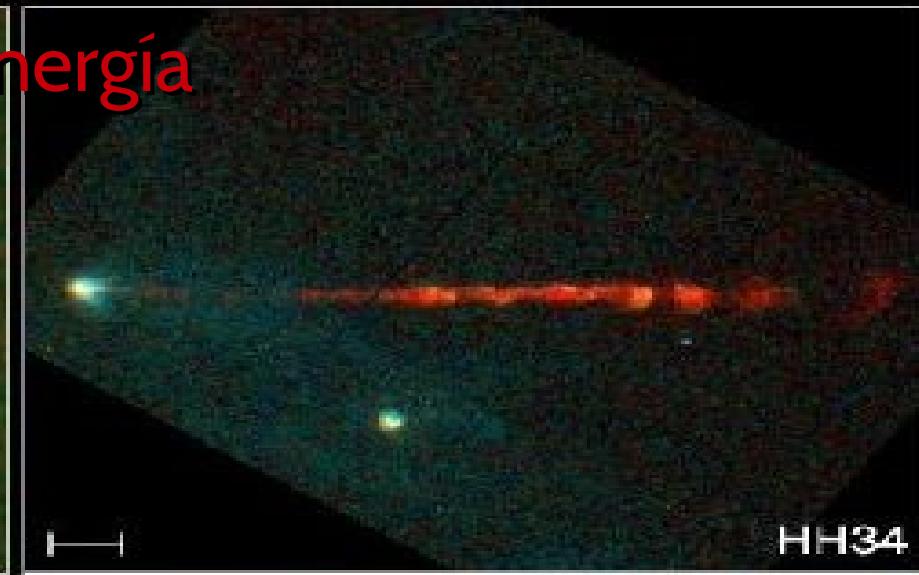


Formación estelar

- La contracción se frena
- Continúa radiando
- $T_c \sim 10^7 \text{ K} \rightarrow \text{Fusión!}$

Pre-Secuencia

- Aumenta T por el exceso de energía
- Emisión de jets de materia



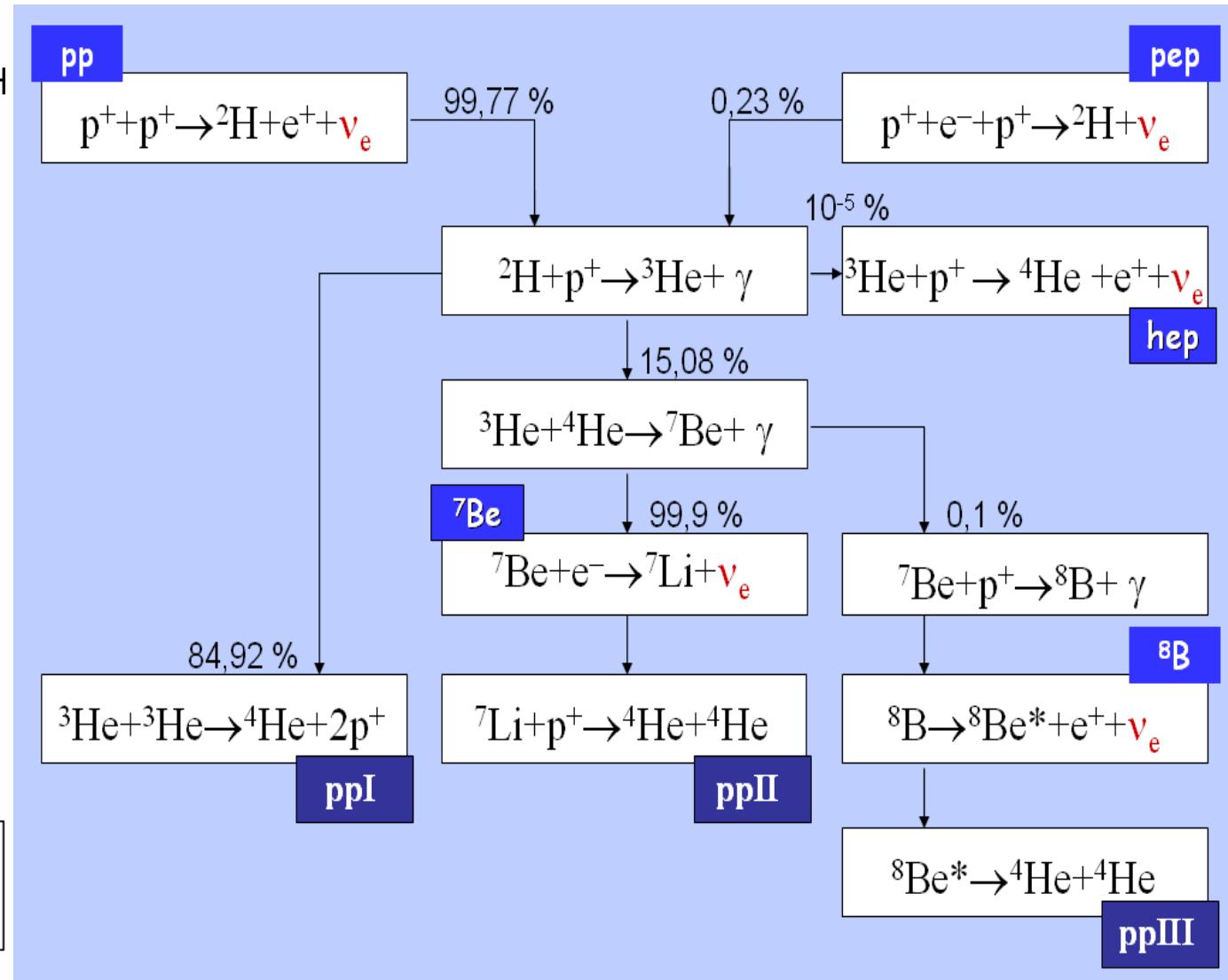
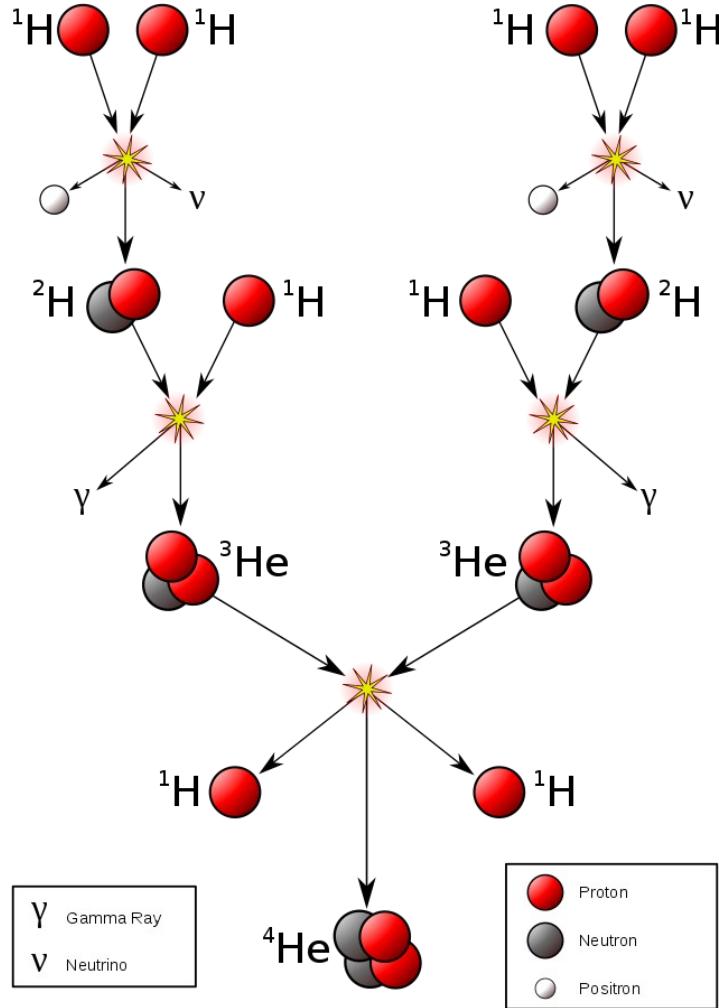
Jets from Young Stars

HST · WFPC2

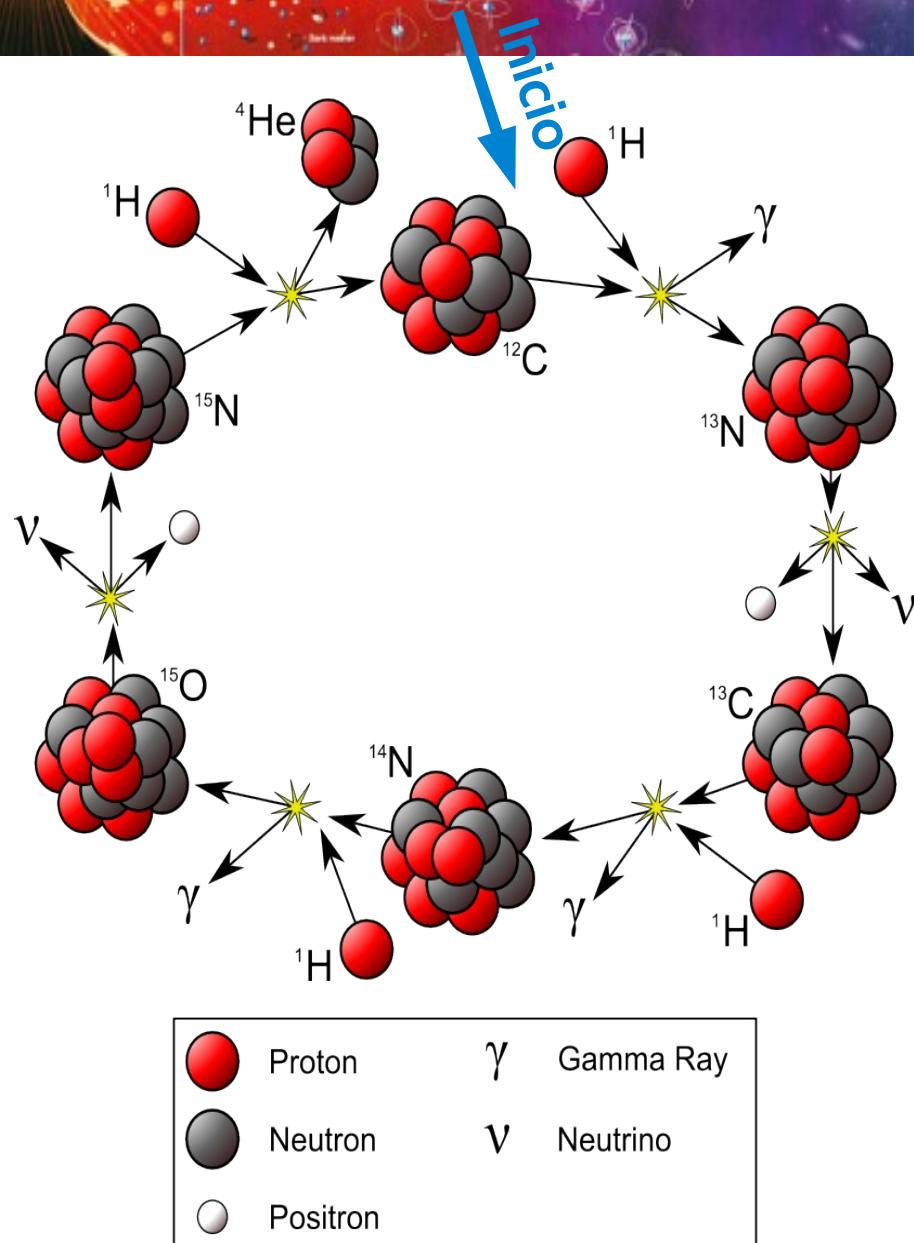
PRC95-24a · ST Scl OPO · June 6, 1995

C. Burrows (ST Scl), J. Hester (AZ State U.), J. Morse (ST Scl), NASA

La cadena protón protón (*pp chain*)



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)

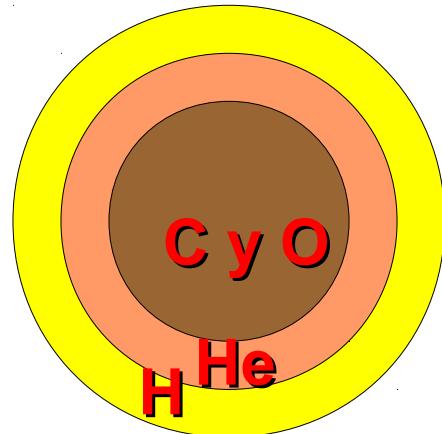
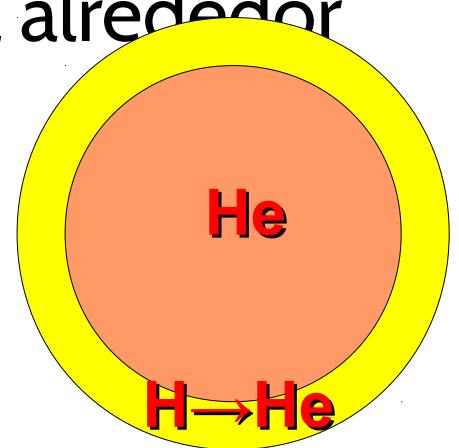
Secuencia Principal



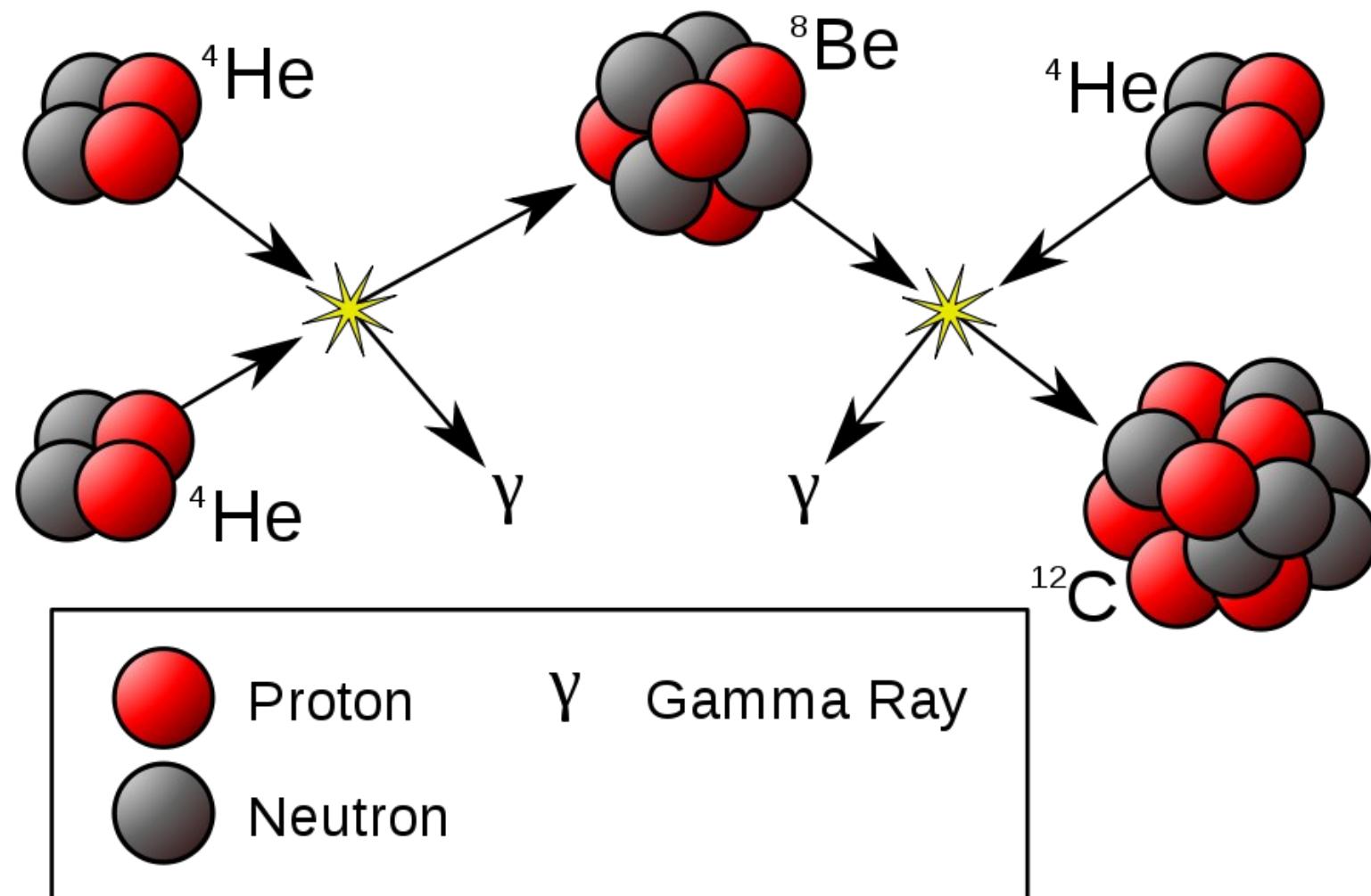
- Conversión $H \rightarrow He$ es muy eficiente
- 10^{10} años para $M = 1 M_{\text{Sol}}$
 - La energía radiada, $L \sim R^2 T^4$ proviene del interior
 - Velocidad de reacciones en el centro: $\sim T_c^4$
 - $R^3 \sim M T_c / P$ (\leftarrow Viene de $PV=nRT$)
- Si $T_c \rightarrow 2 T_c \Rightarrow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



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

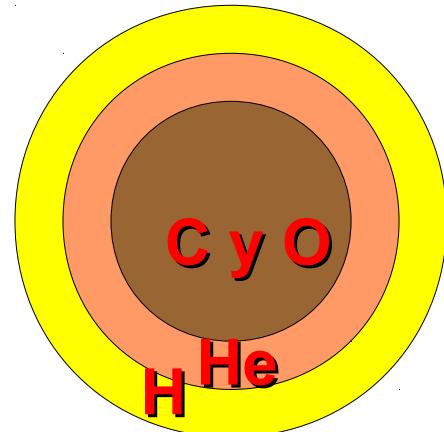
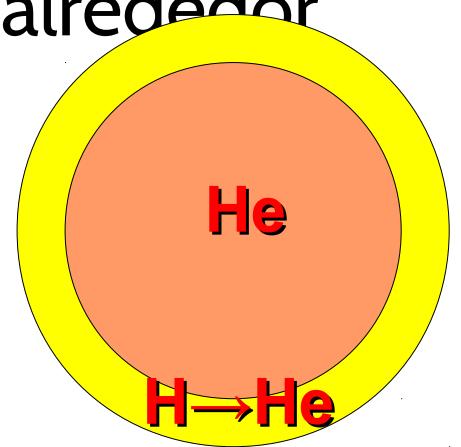


A mayor temperatura, es posible fusionar núcleos más pesados → Proceso Triple Alfa

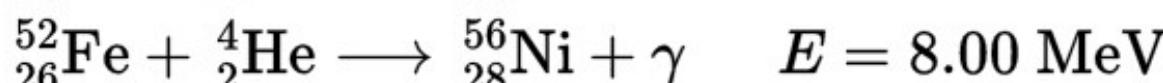
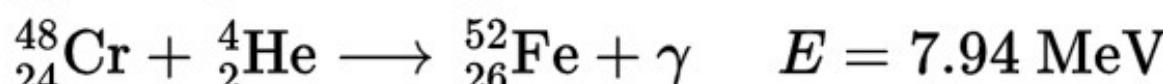
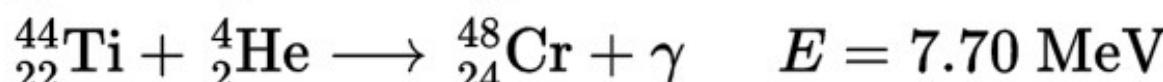
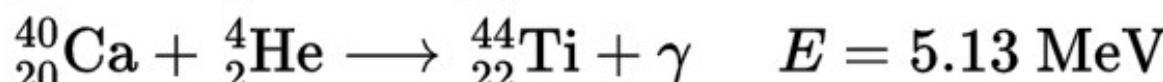
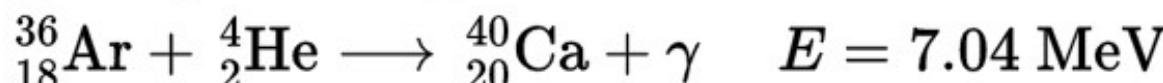
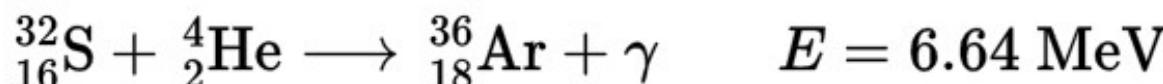
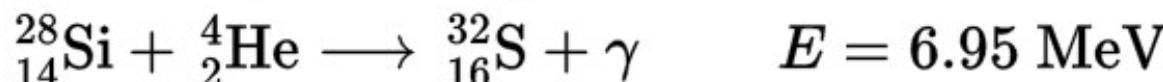
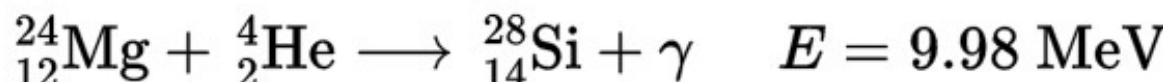
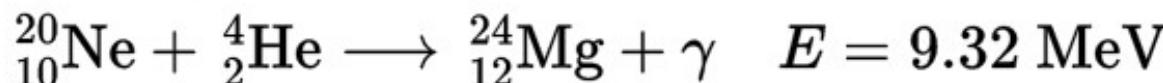
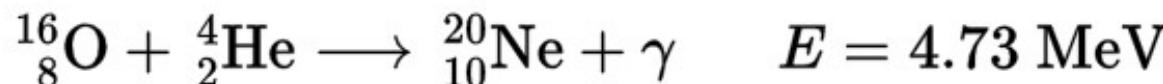
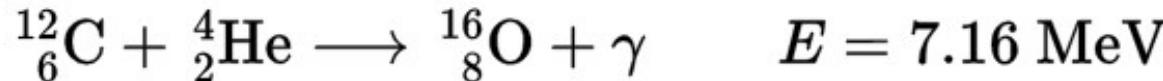




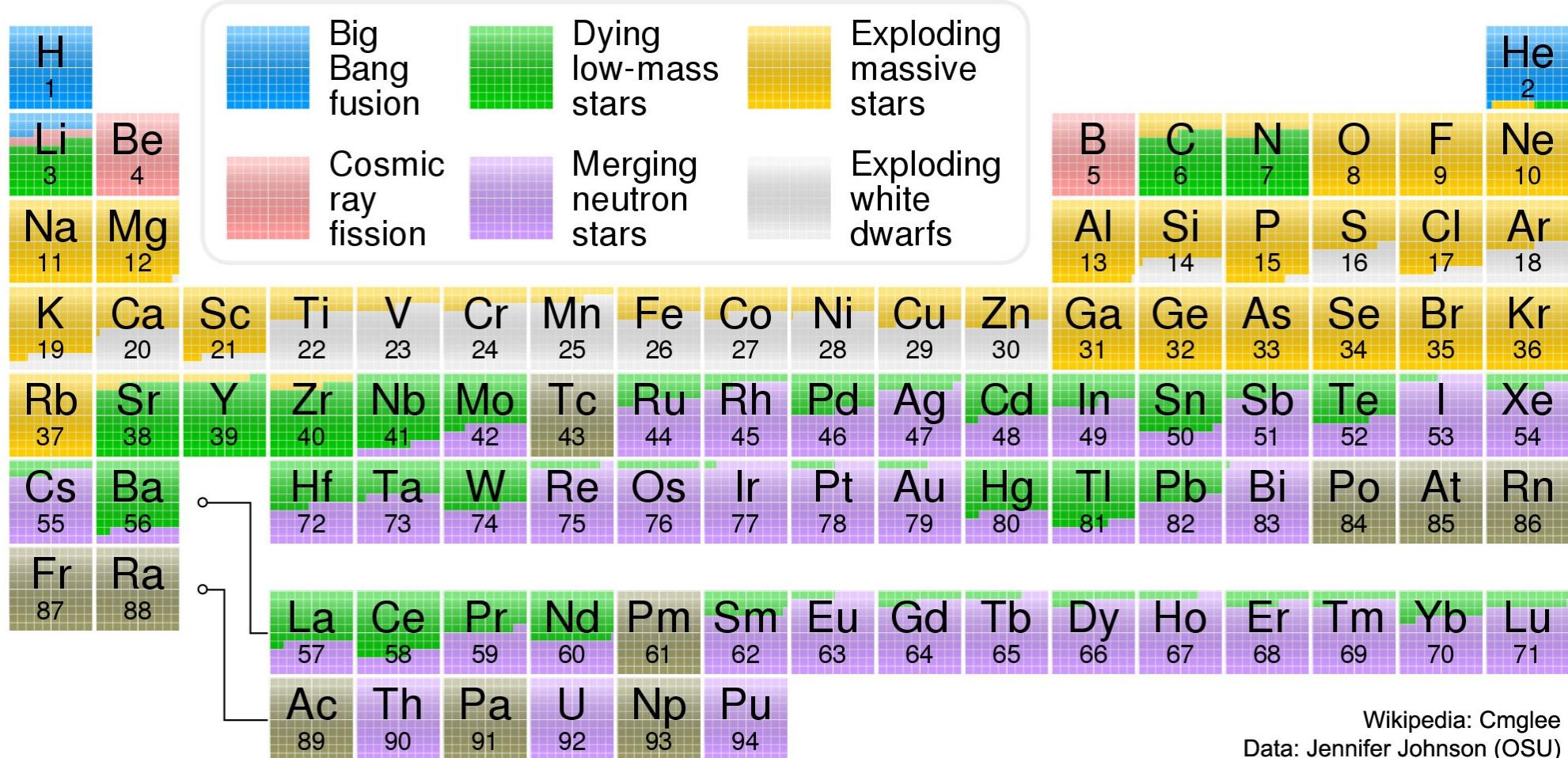
- Se acabó el H en el núcleo, ¿y ahora?
- Conversión $H \rightarrow He$, sólo en una corona alrededor del centro
- No alcanza la energía → Contracción
- Aumenta $T_c \rightarrow$ Mayor producción de E
- Si $T_c = 10^8$ K, $He \rightarrow C$ (“Flash de Helio”)
- $R_{\text{Sol}} \rightarrow 220$ veces!!!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



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



Nucleosíntesis





Tres caminos Tres

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



Nebulosa planetaria

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

Hubble
Heritage

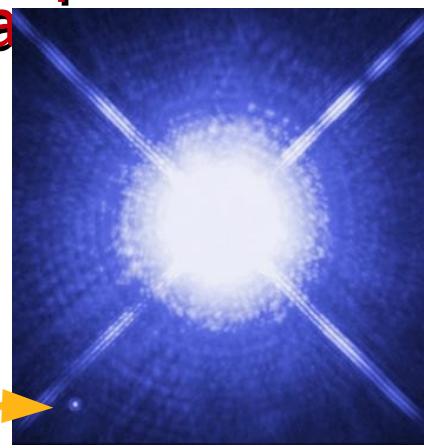
NGC2440 + HD62166
(en Pupis)

Enana blanca

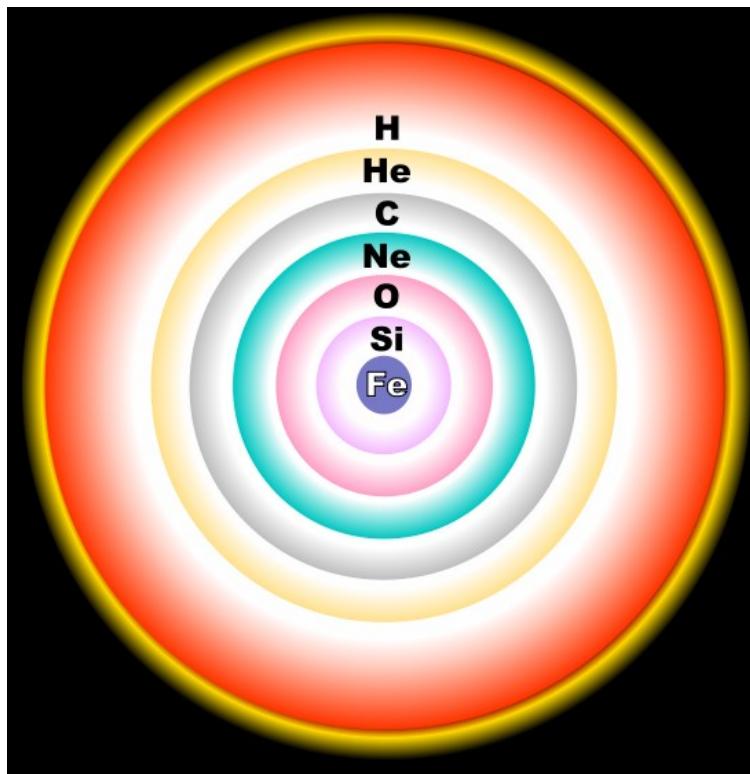
- No hay más **producción de energía**
- La gravedad **domina**
- El colapso comienza pero se detiene → **Pauli!**
- $R \sim R_{Tierra} \leftarrow$ Calcular p y v_e
- La estrella se **enfria por radiación al espacio**
→ Enana negra

:(

Sirio B



Si la masa es mayor...

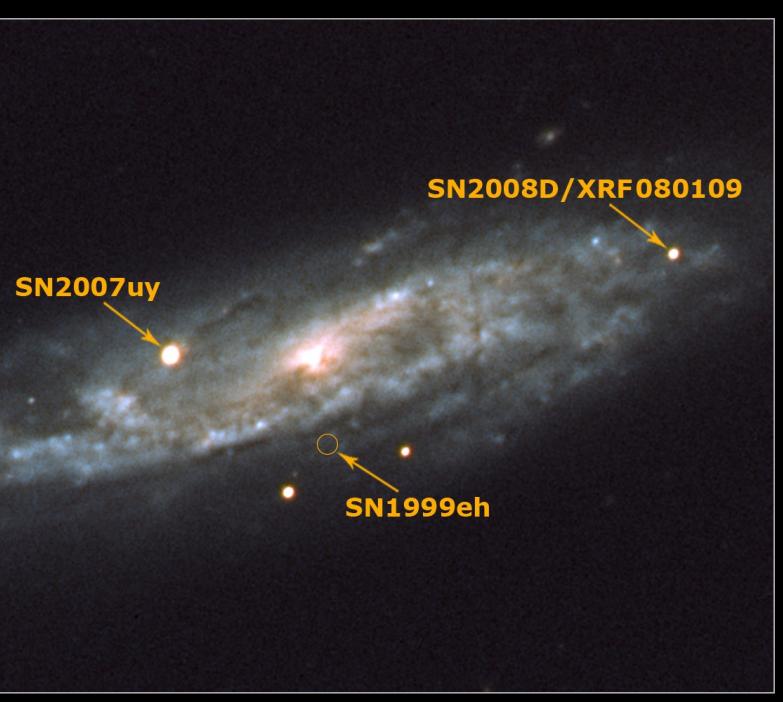


- El proceso en el núcleo continúa gracias a la compresión
- $\text{He} \rightarrow \text{C}/\text{O}$, $\text{C} \rightarrow \text{Ne}$, $\text{Ne} \rightarrow \text{O}, \text{O} \rightarrow \text{Si}$, $\text{Si} \rightarrow \text{Fe}$
- Pero Fe es el más estable: no gano energía uniendo Fe
- Sin fusión,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

¡El núcleo colapsa!
Asorey IPAC 2018 U02C06 11/16

Supernovas

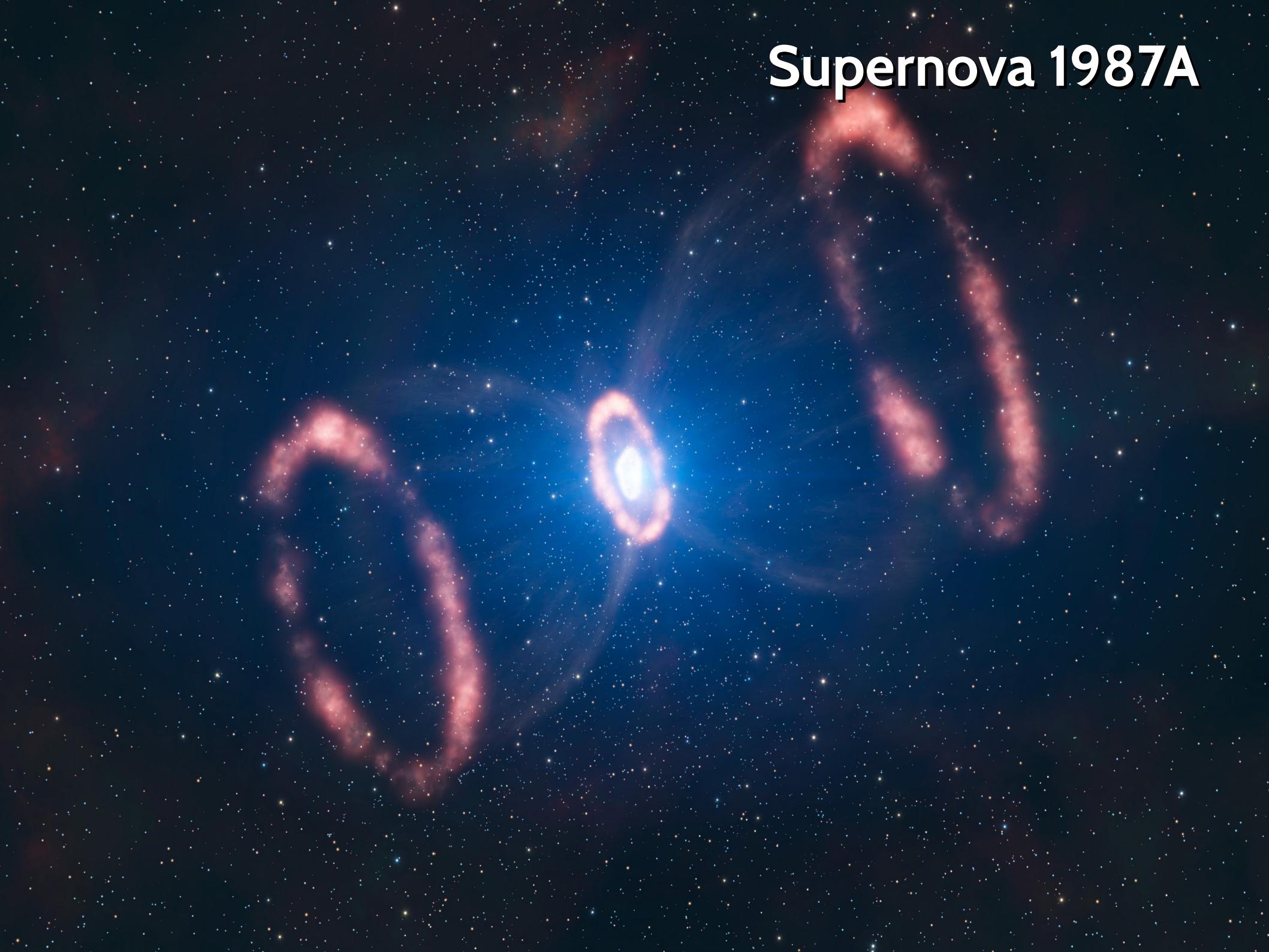
NGC 2770
Supernova factory



© Anglo-Australian Observatory

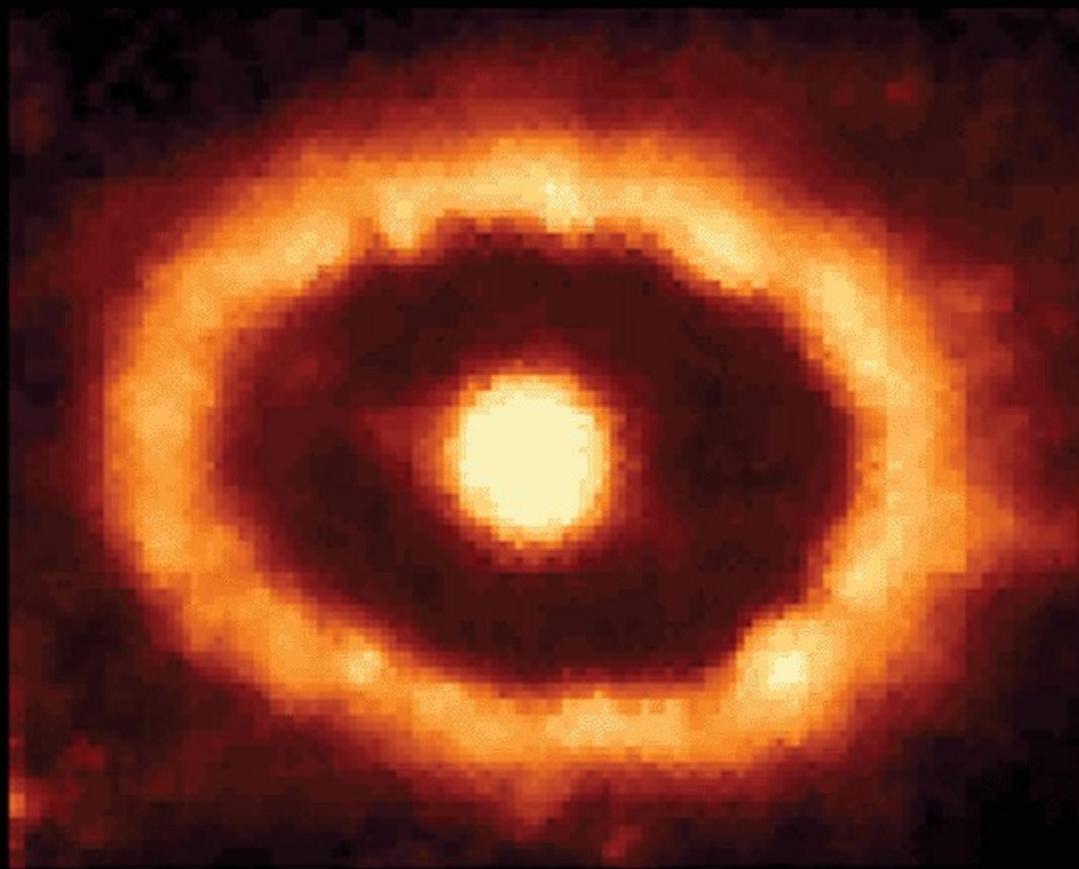
- Dos tipos de SN: I y II
- Estás son las tipo II
- En el núcleo:
$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$$
- Estrella de neutrones
- $M \sim 2 M_{\text{Sol}}$, $R \sim 20 \text{ km}$
- ¡Calcular ρ y v_e !
- Pulsars (LGM)
- **M grandes → Agujeros Negros**

Supernova 1987A



Supernova 1987A

(u03-c04-sn1987ashock.gif)



09/1994

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

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

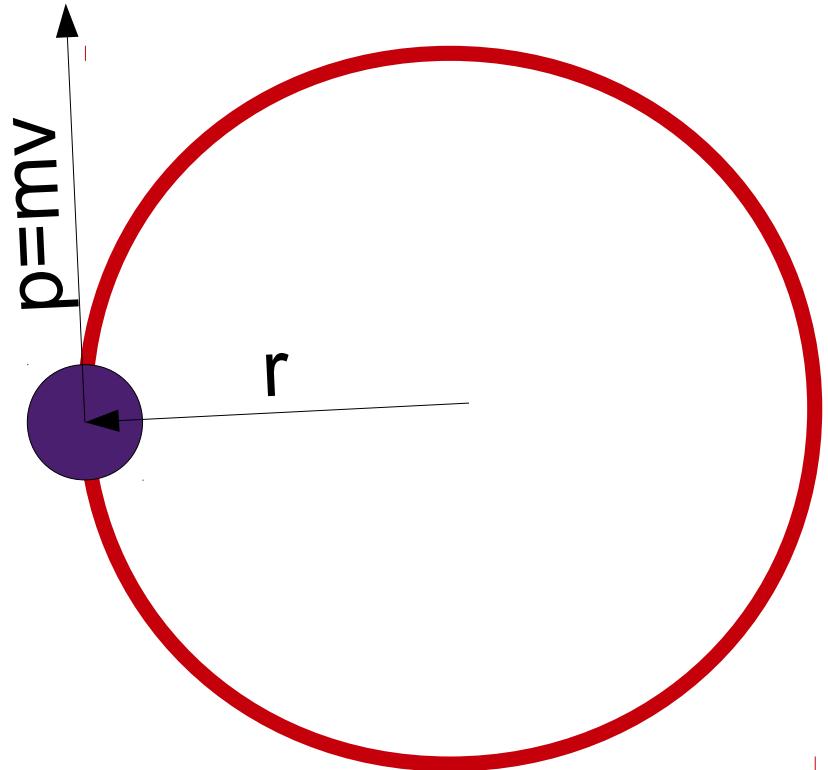
Gargantúa (Interstellar)



Cantidad de movimiento angular

- Si el objeto está girando con velocidad v y radio r:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$
$$|L| = m|r||v|\sin\theta$$



- La cantidad de movimiento angular es una magnitud **(pseudo) vectorial conservada** (cuando actúa una fuerza central) y aditiva

$$\vec{L}_i = \vec{L}_f$$

$$\vec{L} = \sum_{j=1}^n \vec{r}_j \times \vec{p}_j = \sum_{j=1}^n \vec{L}_j$$



Patinaje sobre hielo



“Boleando”, Molina Campos



“BOLEANDO”
Tempera sobre papel, 35 x 53 cm, 1957

Movimiento circular uniforme: boleadora

- Mov. Circular Uniforme:

$$|\vec{r}| = \text{cte}, |\vec{v}| = \text{cte}, \vec{r} \perp \vec{v} \\ \Rightarrow \vec{L} = m(\vec{r} \times \vec{v}) = \text{cte}$$

- Pero la velocidad cambia!

$$\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2$$

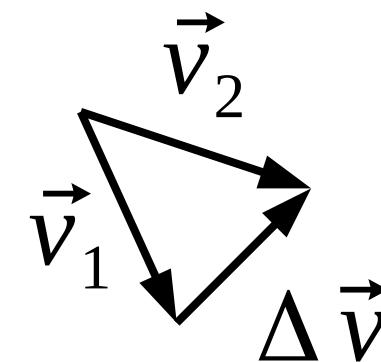
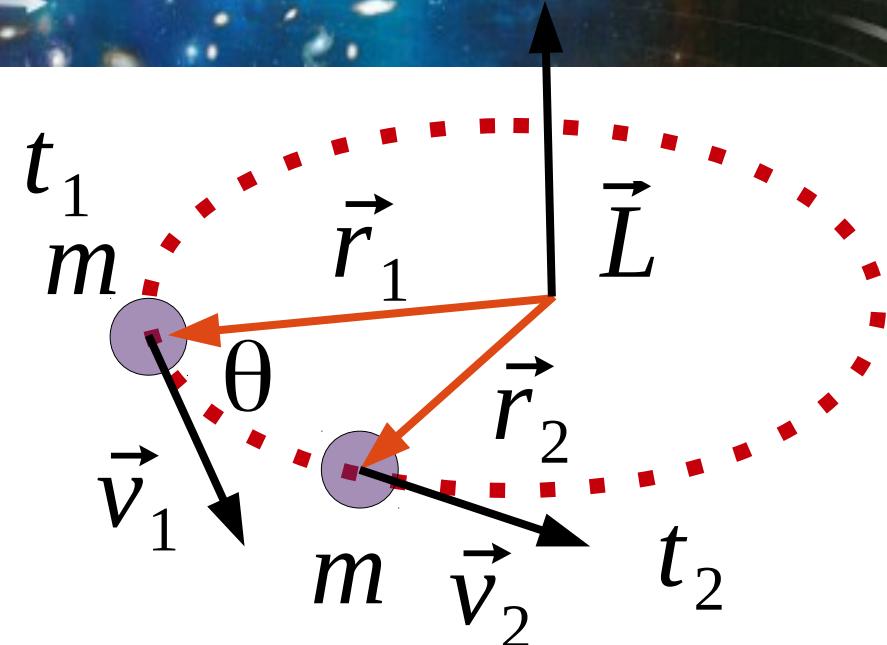
- Aceleración:

$$\vec{a}_c = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$$

- Si $\Delta t \rightarrow 0$

$$\vec{a}_c \propto -\hat{r}$$

Aceleración centrípeta



Aceleración centrípeta

- Aceleración centrípeta: evidencia el cambio en la dirección de la velocidad en un movimiento circular uniforme
- Tiene dirección radial y sentido hacia el centro:

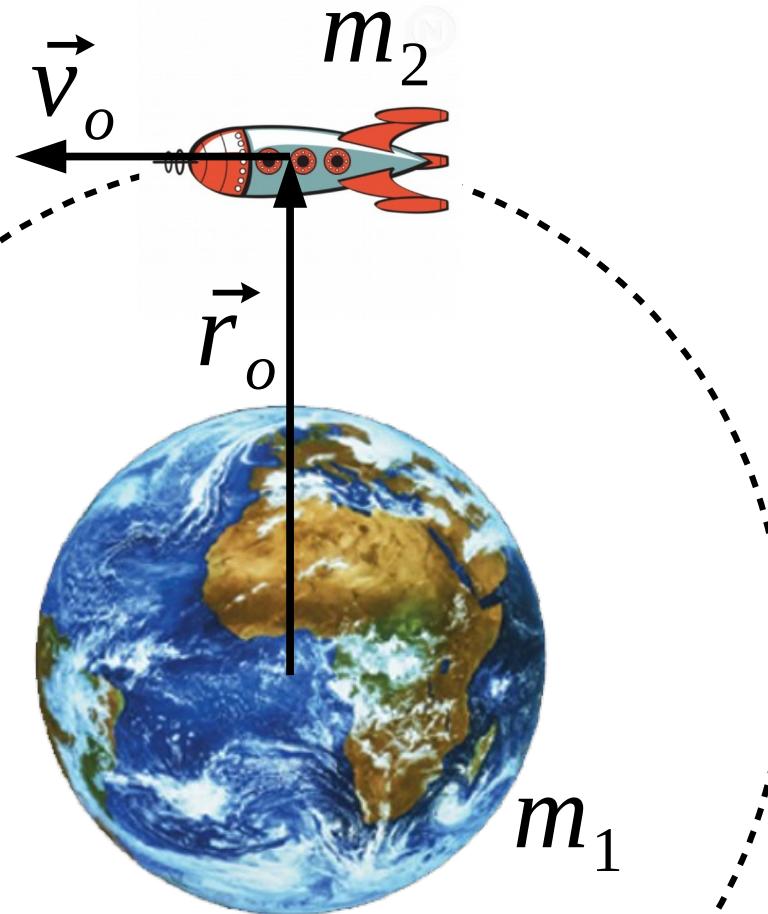
$$\vec{a}_c = -\frac{|\vec{v}|^2}{|\vec{r}|} \hat{r} \Rightarrow a_c = \frac{v^2}{r}$$

- En las boleadoras, ¿cuál fuerza es la fuerza centrípeta?

$$\vec{T} = m \vec{a}_c \quad \text{Tensión}$$

- ¿Podría ser, en algún sistema, la gravedad?

Pensemos el siguiente sistema



- Balance de fuerzas
 - Centrípeta = Gravedad

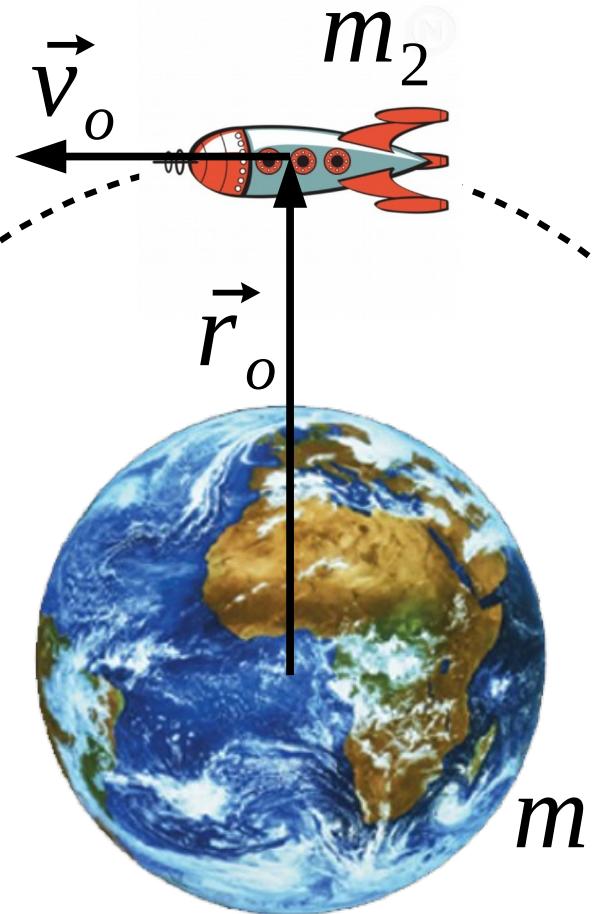
$$\vec{F}_c = \vec{F}_g$$
$$\frac{m_2 v_o^2}{r_o} = \frac{G m_1 m_2}{r_o^2}$$

$$v_o = \sqrt{\frac{G m_1}{r_o}}$$

Velocidad orbital

¡¡No depende de m_2 !!

Duración de la órbita



- Órbita circular

$$v_o = \frac{2\pi r_o}{t_o}$$

$$\Rightarrow v_o = \sqrt{\frac{G m_1}{r_o}} = \frac{2\pi r_o}{t_o}$$

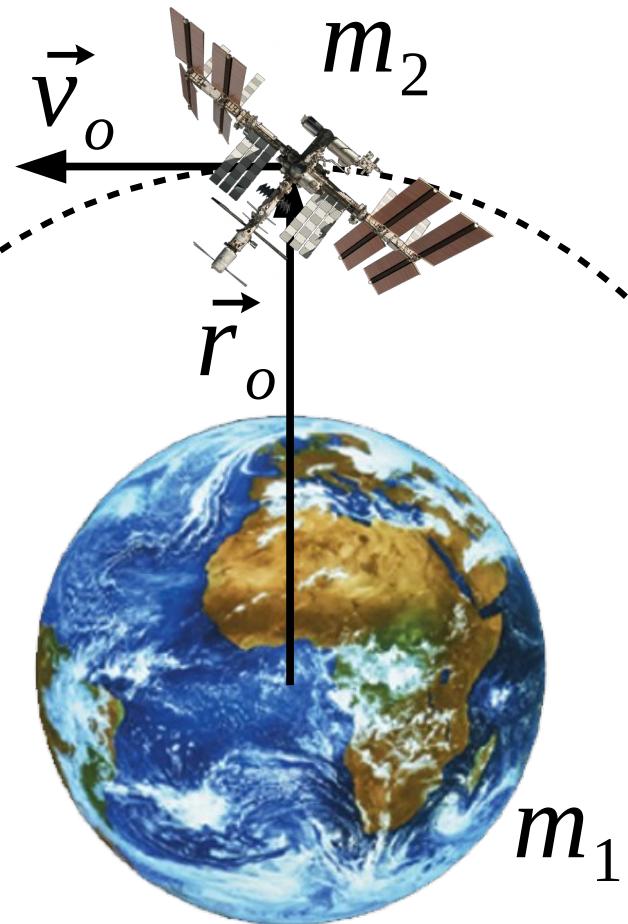
$$\frac{G m_1}{r_o} = \left(\frac{2\pi r_o}{t_o} \right)^2$$

$$\frac{t_o^2}{r_o^3} = \left(\frac{4\pi^2}{G m_1} \right)$$

¡Atención!
 t^2 prop. r^3

$$t_o^2 = \left(\frac{4\pi^2}{G m_1} \right) r_o^3 \Rightarrow t_o = \sqrt{\frac{4\pi^2}{G m_1} r_o^3}$$

Velocidad orbital estación espacial



- Altura orbital: 413 km

$$r_o = R_+ + h = 6784 \text{ km}$$

$$\Rightarrow v_o = \sqrt{\frac{G m_1}{r_o}} = 7661 \text{ m/s} \simeq 0.7 v_e$$

$$\Rightarrow t_o = \sqrt{\frac{4\pi^2}{G m_1}} r_o^3 = 5570 \text{ s}$$

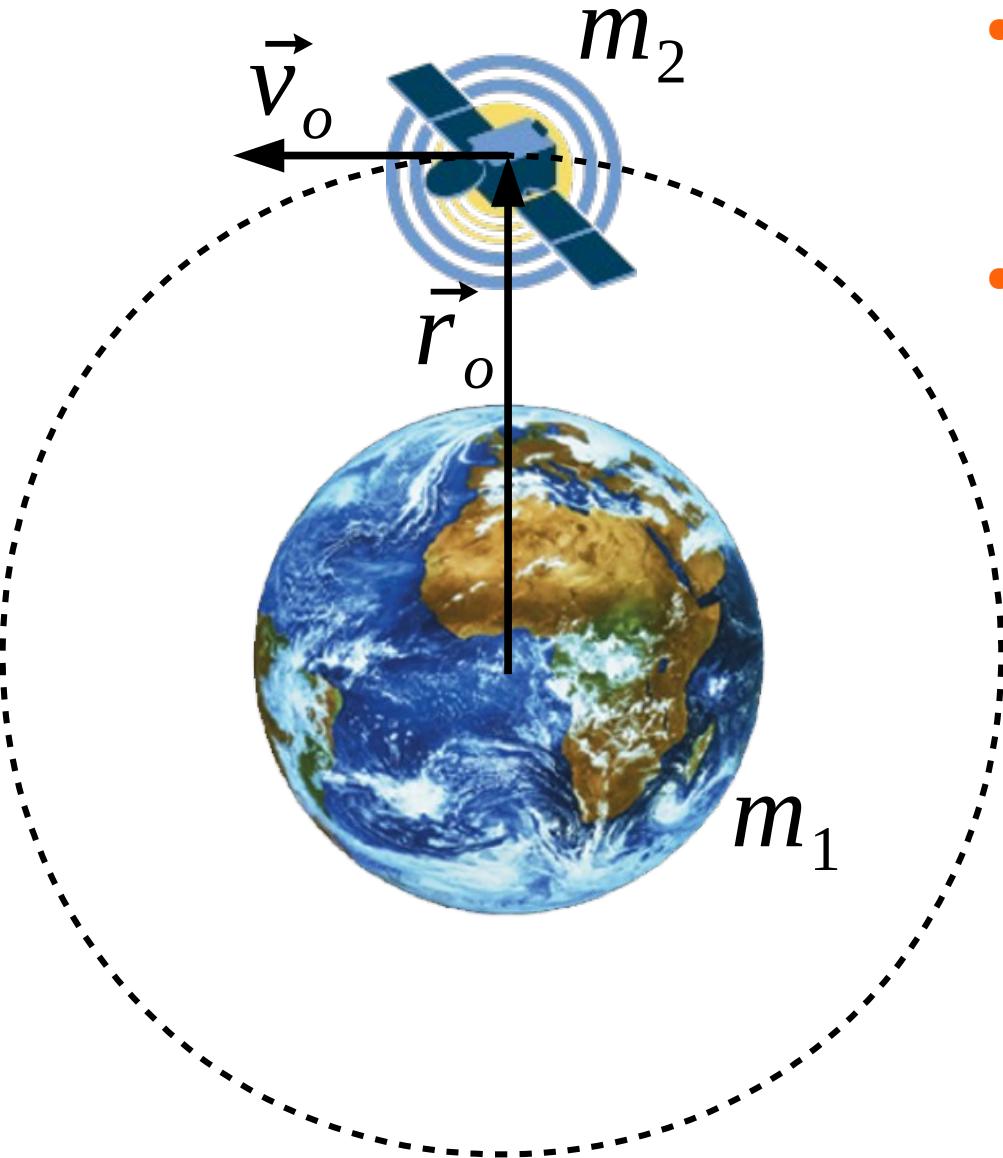
$$t_o = 92 \text{ min } 50 \text{ s}$$

- En la estación espacial hay
~ 15 amaneceres diarios

ARSAT-I: Satélite geoestacionario argentino



ARSAT-I: Satélite geoestacionario argentino



- Geoestacionario
 - completa una órbita en 24h
- Calcule:
 - Velocidad orbital
 - Radio y altura orbital
 - Energía orbital:
- $E_o = E_g + E_k$
- Trabajo equivalente del cohete que lo puso en órbita