EVOLUCIÓN ESTELAR.
Un paseo por la vida de una estrella

Gregorio José Molina Cuberos

Índice

- Antes de nacer
  - Medio interestelar
  - Nebulosas
  - Nubes gigantes moleculares
- Objetos estelares jóvenes
  - Protoestrellas
  - Objetos HH y T-Tauri
- Evolución de estrellas
  - Pequeñas (< 0.8 masa del sol)
  - Medianas (entre 0.8 y 8 masa del sol)
  - Grandes (> 8 masa del sol)

Medio interestelar

NGC 3370 (Hubble).

Similar a nuestra galaxia.

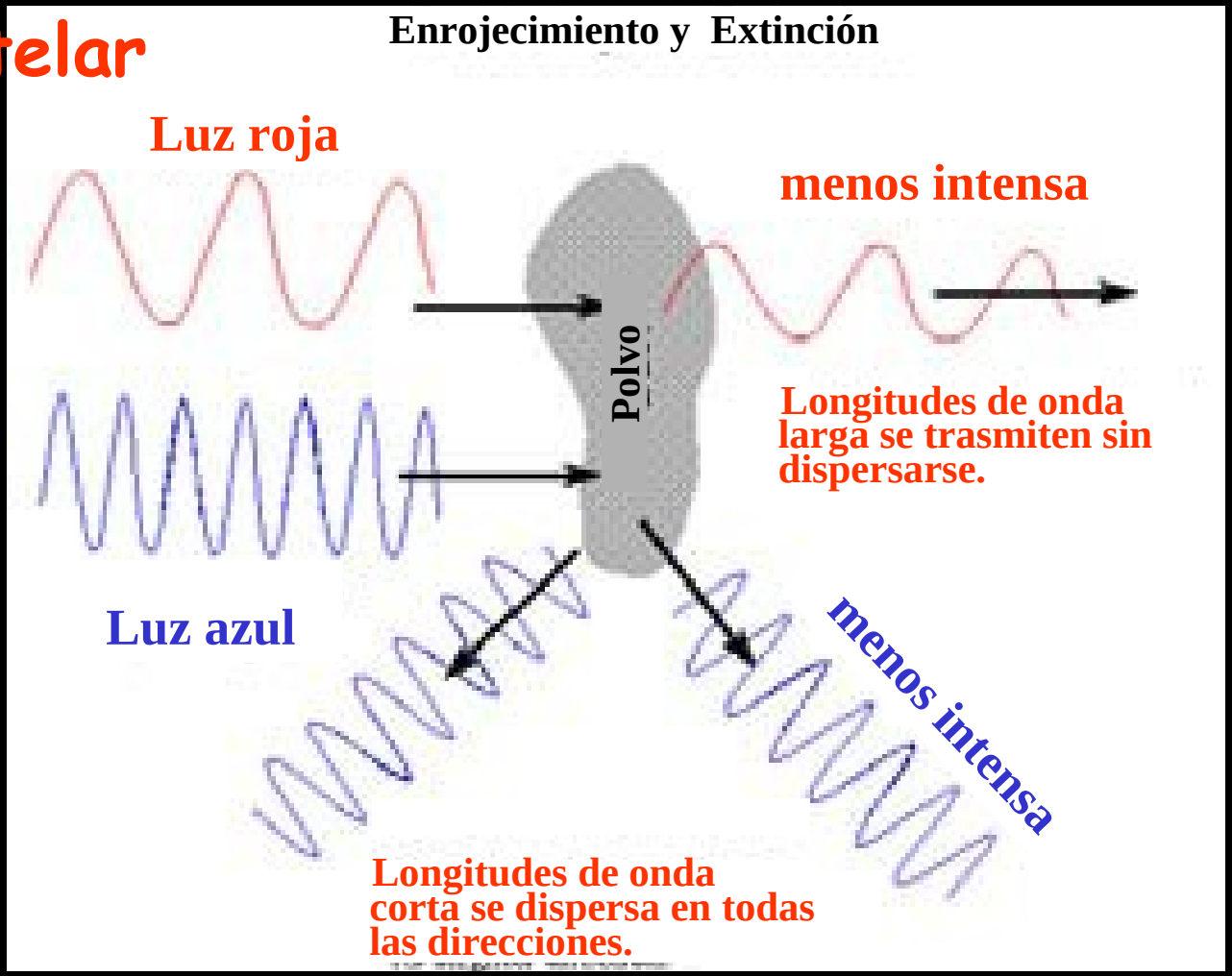
Una galaxia se compone de:

- Estrellas
- Nubes de gas y polvo
- Medio interestelar

Medio interestelar, está formado por gas y polvo. Propiedades del gas:

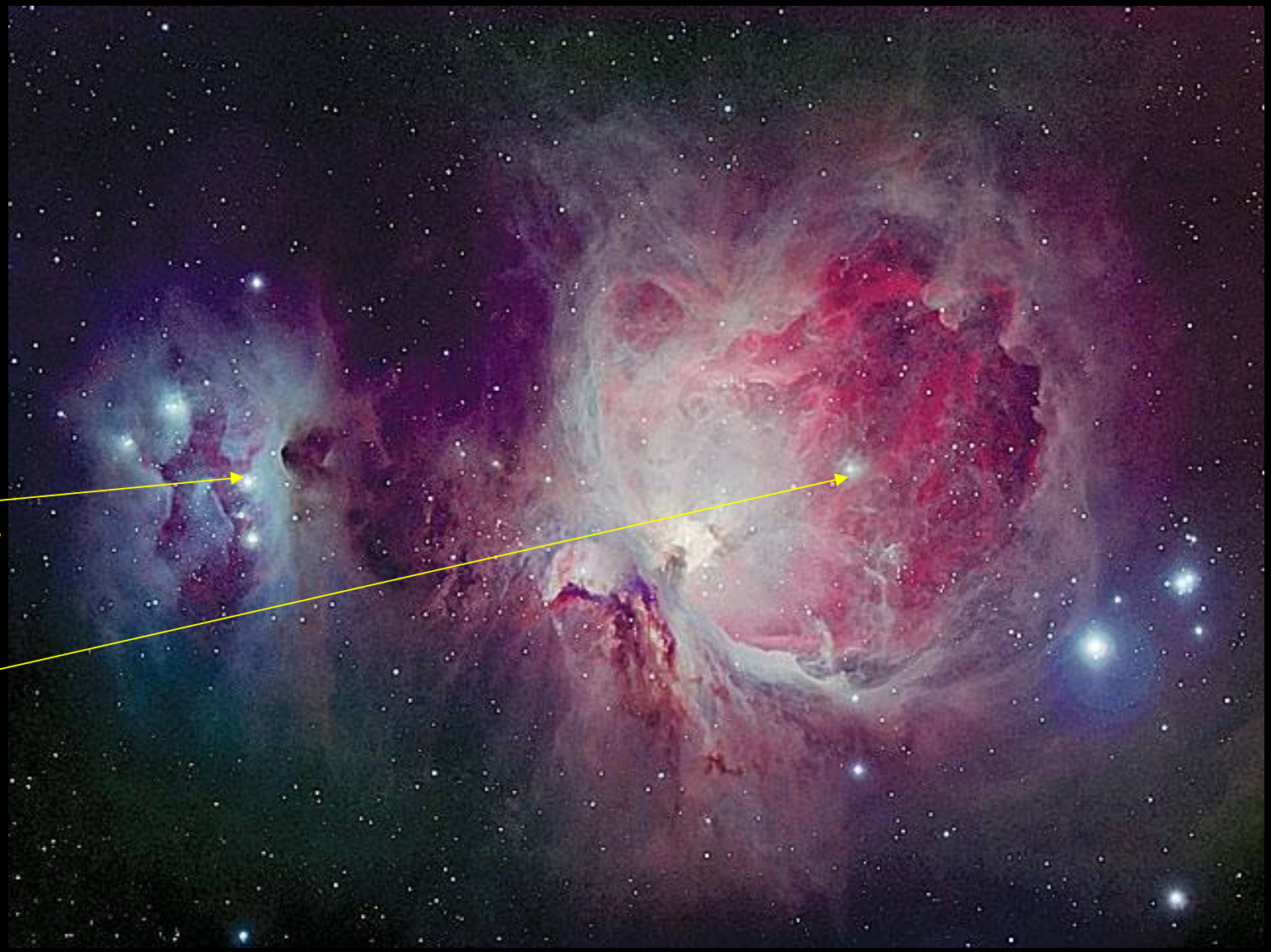
- Densidad pequeña (1 átomo/cc) pero el 20%-30% de la masa total
- Compuesto por H y He (primordial, Big Bang) y elementos pesados (explosiones nova)
- Inmerso en radiación, campos magnéticos, rayos cósmicos ($T \sim 10^6$ K)

El polvo interestelar y la luz



- Las partículas de polvo interestelar son extremadamente pequeñas (la milésima parte del milímetro) formadas por H, C, O, Mg, Si, Fe en forma de silicatos, grafito, hielo, metales y compuestos orgánicos
- Los granos de polvo dispersan la luz azul =>la luz que llegue a la Tierra se ha enrojecido, lo que se conoce como **enrojecimiento interestelar**
- Las partículas de polvo absorben luz incidente, calentándose y emitiendo luz infrarroja, en este proceso la luz de las estrellas se atenúa. Esto es la llamada **extinción interestelar**

Nebulosas



Nebulosa de emisión **M42** en Orión.

- Las Nebulosas son aglomeraciones densas de gas y polvo interestelar.
- Tipos de nebulosas: **emisión, reflexión y absorción.**
- Una nebulosa de **emisión** está formada por gas (H, 10 at/cc), produce luz debido a la energía creada por una o varias estrellas luminosas que excitan el H de la nube.

Nebulosas (2)

Nebulosa de Reflexión **Cabeza de Bruja** en Orión

- Formada por frío **polvo interestelar** que refleja y difumina la luz de estrellas cercanas. De color azul debido a la **dispersión** (el cielo es azul)
- También se observa una **nebulosa de absorción**

Nebulosas (3)

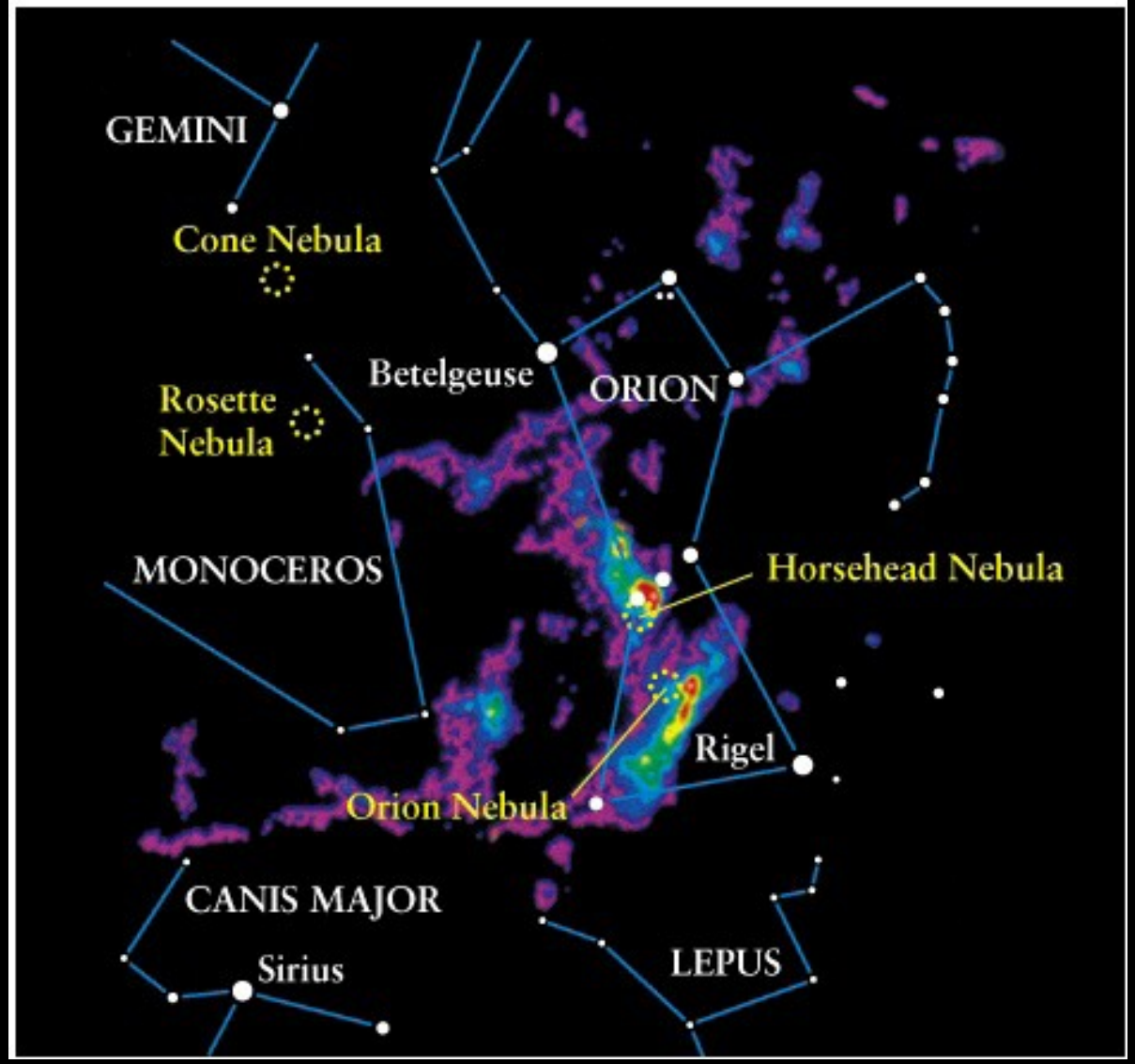
Nebulosa **cabeza de caballo**

- Una nebulosa de **absorción o negra**, está formada por polvo similar a las de reflexión. No deja pasar la luz de una fuente que está tras suyo.
- La nebulosa Cabeza de Caballo se observa como una sombra en la nebulosa de emisión (roja) que está detrás suyo

Nebulosa (4)

- Nebulosa emisión con una nebulosidad de reflexión alrededor de dos estrellas jóvenes y de absorción en forma filamentosa
- Nebulosas de emisión y reflexión están asociadas a regiones de formación estelar (con estrellas calientes y jóvenes)
- NO son regiones de formación estelar (demasiado templadas y difusas)

Nubes Moleculares



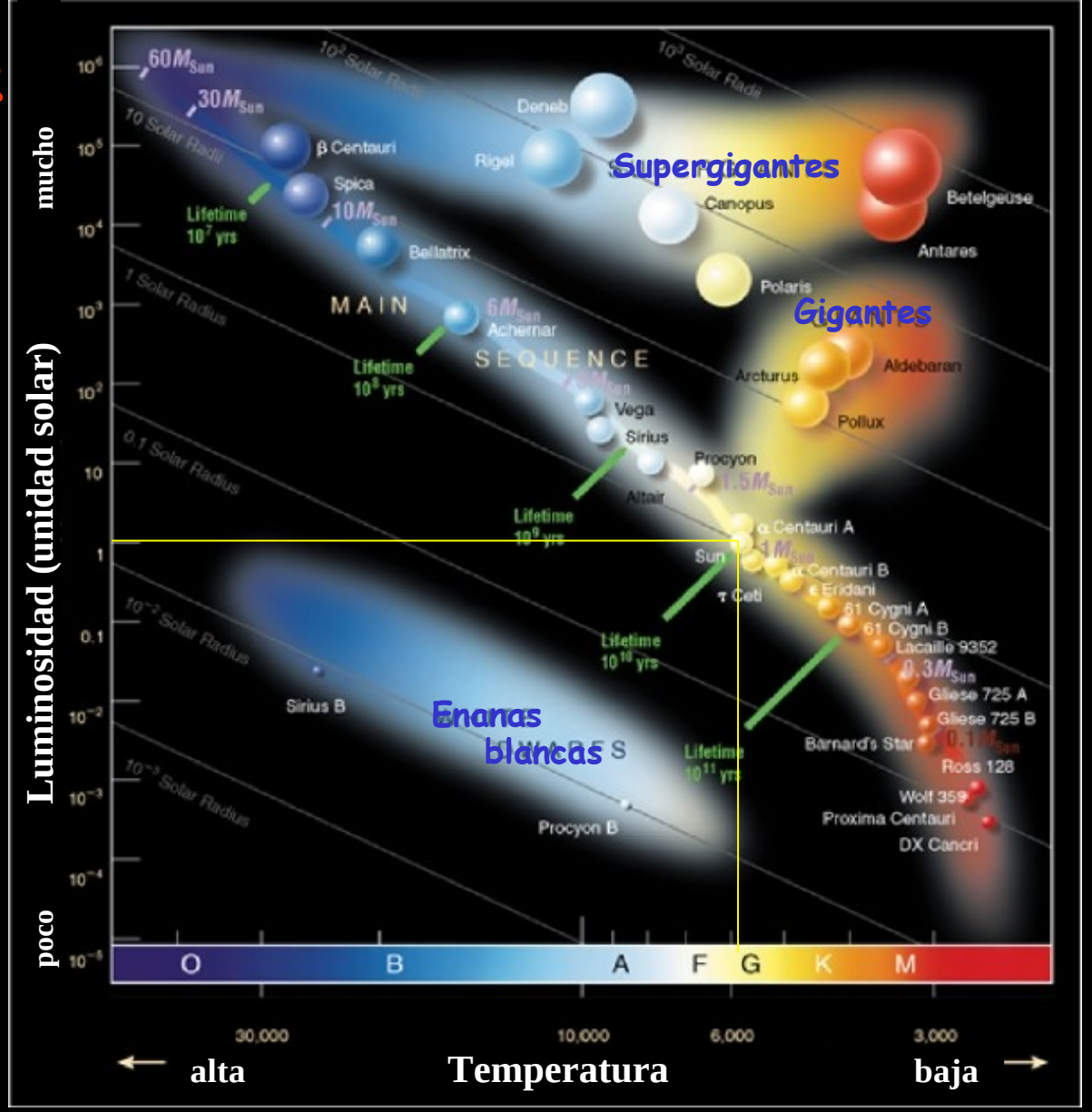
Nube Molecular Gigante Gran en Orión. Se muestra la concentración de CO

- Grandes agrupaciones de gas y polvo, remanentes de la formación de una galaxia. Compuestas por H, son las porciones del medio interestelar **más frías y densas**.
- Diámetros ~1 y 300 años luz y masa para formar hasta 1 millón de soles.
- Una galaxia media tiene entre 100 y 2000 nubes gigantes, pequeñas muchas más.
- No emiten en el óptico, se detectan con radiotelescopios desde hace 25 años.

Índice

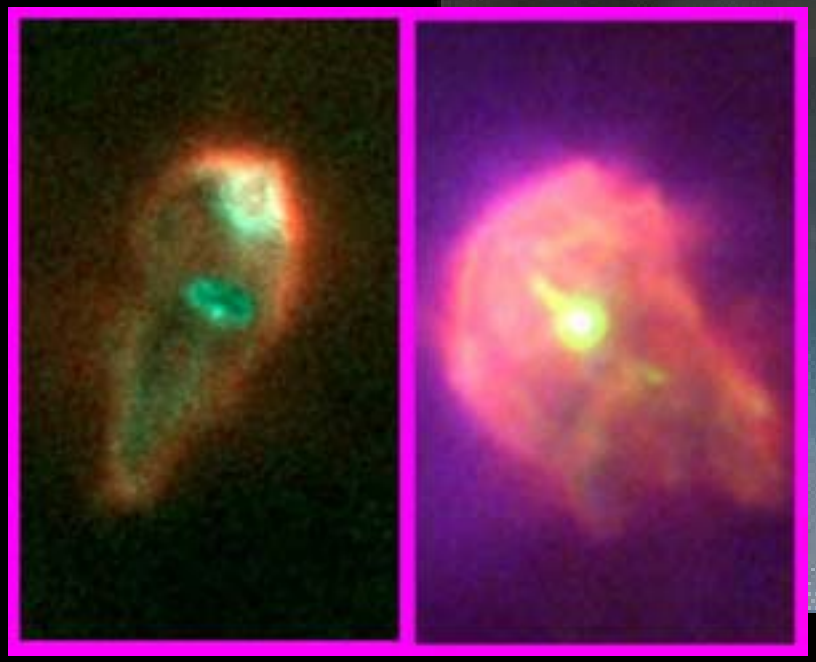
- Antes de nacer
  - Medio interestelar
  - Nebulosas
  - Nubes gigantes moleculares
- Primeras fases de una estrella
  - Protoestrellas
  - Objetos HH
  - T-Tauri
- Evolución de estrellas
  - Pequeñas (< 0.8 masa del sol)
  - Medianas (entre 0.8 y 8 masa del sol)
  - Grandes (> 8 masa del sol)

Diagramas HR



- Las fases evolutivas de una estrella se describen por su posición en el diagrama HR
- Se puede considerar el diagrama HR como la tabla periódica de las estrellas.
- Las estrellas en la misma región tienen las mismas propiedades (brillo, masa, vida media, temperatura, radio, etc). Las estrella evolucionan y cambian su posición.
- Es una herramienta básica que los astrónomos usan para clasificar las estrellas.

Protoestrellas

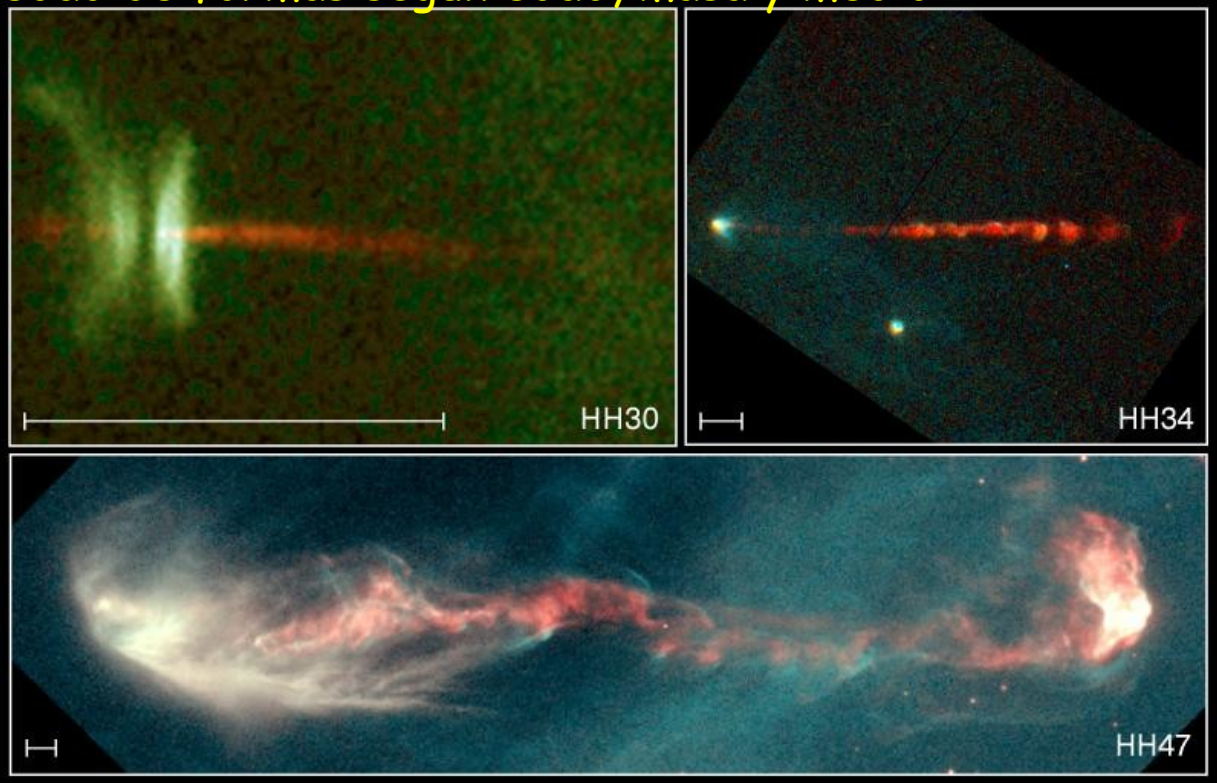


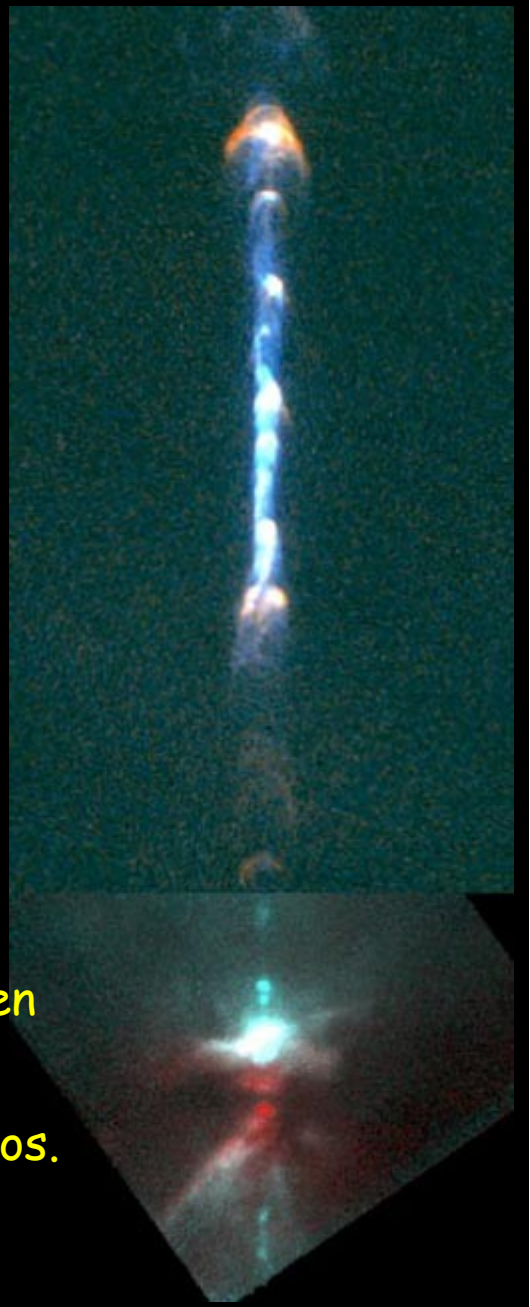
Protoestrellas en Orión y discos protoplanetarios

- Protoestrella -> primera fase en la vida de una estrella T~2500K
- Se muestran protoestrellas embebidas en discos protoplanetarios, con unas condiciones de temperatura y radiación muy complicadas.
- La radiación ultravioleta de otras estrellas destruye rápidamente los discos que rodean las protoestrellas. Únicamente el 10% se transforma en estrella.

Objetos Estelares Jóvenes: HH

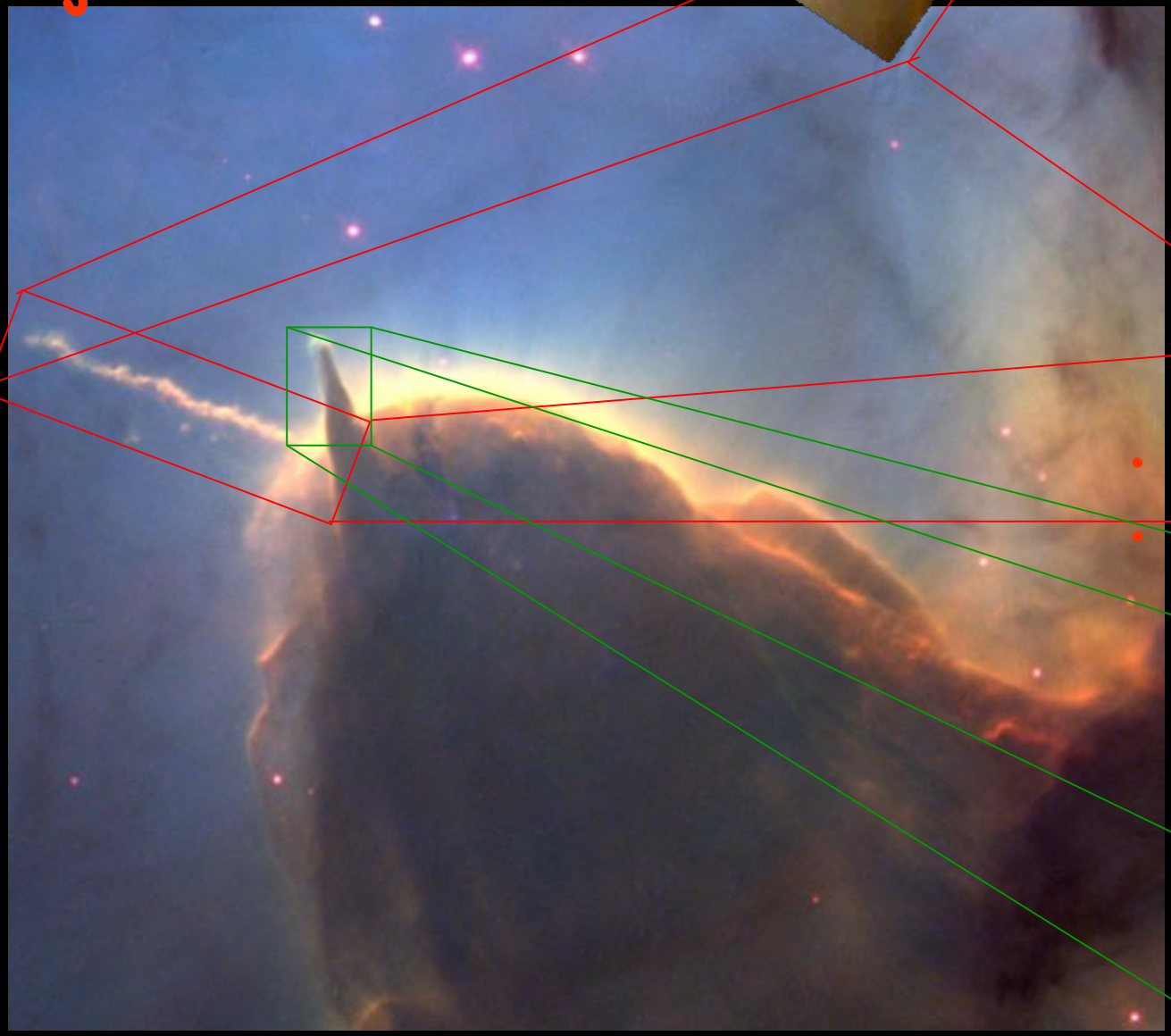
- Objeto Estelar Joven=> fase entre protoestrella y estrella, gran variedad de formas según edad, masa y medio





- Objetos **Herbig-Haro** (Hubble) contienen discos circumestelares en fase de colapso y emiten chorros de gases por los polos
- Los discos son oscuros y contienen la materia de sistemas planetarios.
- Chorros de gases calientes son disparados desde el interior a 0.5 millones de Km por hora y colisionan con el medio interestelar.
- Se han encontrado en los límites de nubes de gas

Objetos HH

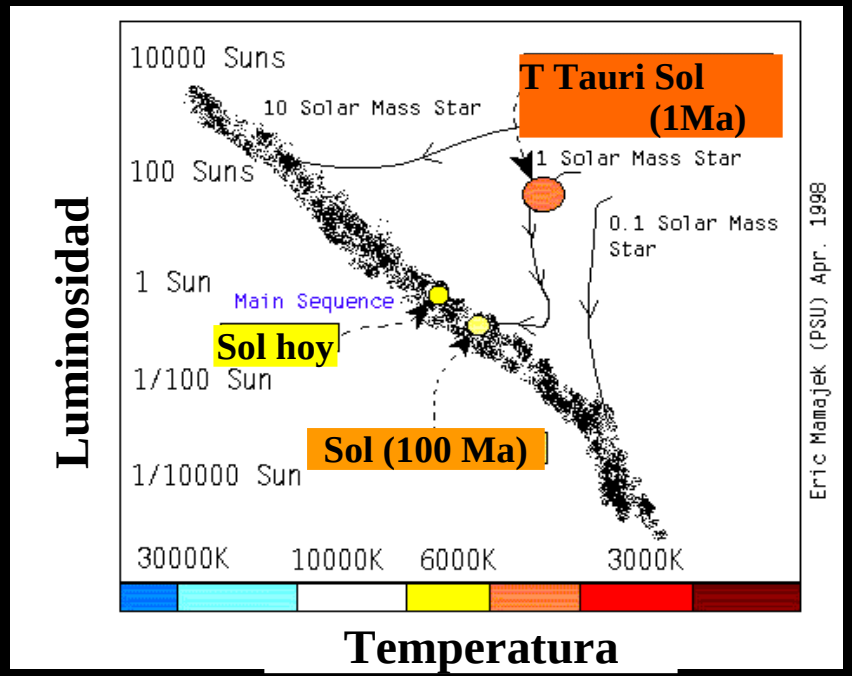


Nebulosa Trífida

- Región de formación estelar.
- Se observa fácilmente en el visible porque una estrella masiva puede calentar todo el medio interestelar.

- Región que será destruida por el frente de ionización en 20 mil años
- Se observa un chorro muy destacado que parte de un objeto estelar joven
- También se aprecia un "dedo" con otro diminuto chorro.

Objetos Estelares Jóvenes: T-Tauri



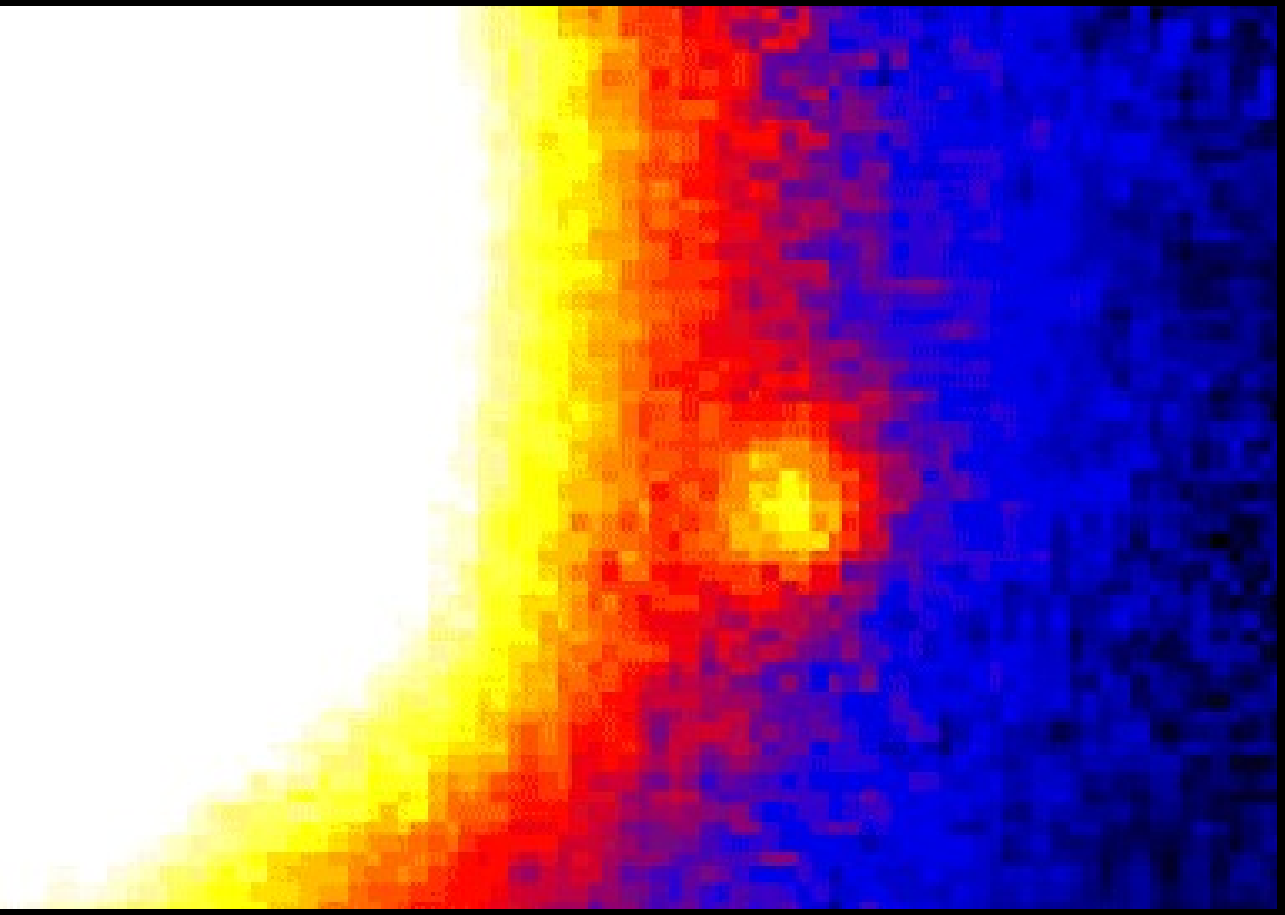
- Localización de T-Tauri en el diagrama HR
- Binaria T-Tauri (Hubble)

- Estrellas muy **jóvenes** y **ligeras** (<10x10^6 años, <3 Msol) en fase de contracción grav.
- Son un estado intermedio entre protoestrella y estrella de la secuencia principal.
- Muestran un estado inicial en la evolución solar
- **Más luminosas** que las estrellas de la secuencia principal y sufren **cambios** muy importantes y erráticos de **brillo**.
- Las más jóvenes tienen discos de acreción (polvo), las más evolucionadas no.

Índice

- Antes de nacer
  - Medio interestelar
  - Nebulosas
  - Nubes gigantes moleculares
- Objetos estelares jóvenes
  - Protoestrellas
  - Objetos HH y T-Tauri
- **Evolución de estrellas**
  - Casi-estrellas (M < 0.08MSol)
  - Pequeñas (M < 0.8 MSol)
  - Medianas (0.8 MSol < M < 8 MSol))
  - Grandes (M > 8MSol)

Casi-estrellas. Enana marrón



Enana marrón **Gliese 229B** (Palomar)

- Una protoestrella con masa menor de 0.08 Msol nunca alcanza la temperatura para producir fusión termonuclear.
- El nacimiento se frustra y se genera una **enana marrón**, a medio camino entre planeta y estrella.

Condiciones para la fusión:

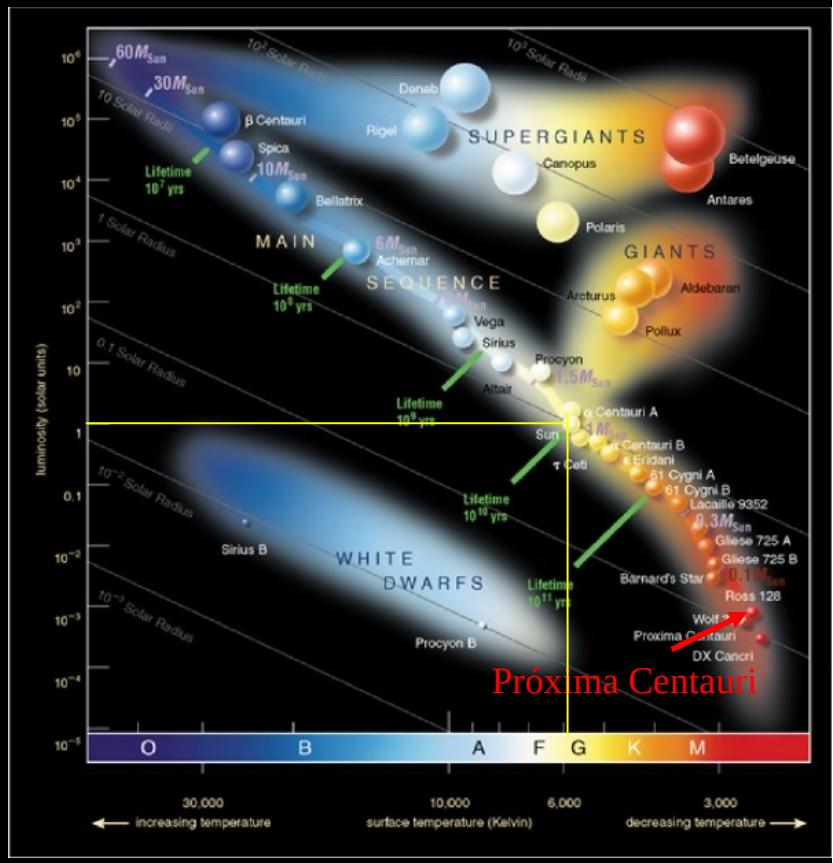
T ~ 3×10^6 K

Masa ~ 75 MJúpiter

- No alcanzó la masa suficiente para ser estrella
- Emite energía en el infrarrojo por contracción gravitatoria, como Júpiter y Saturno, durante 15×10^6 años.

El Trapecio superponiendo imágenes del óptico (estrellas amarillas) e infrarrojo (estrellas marrones)

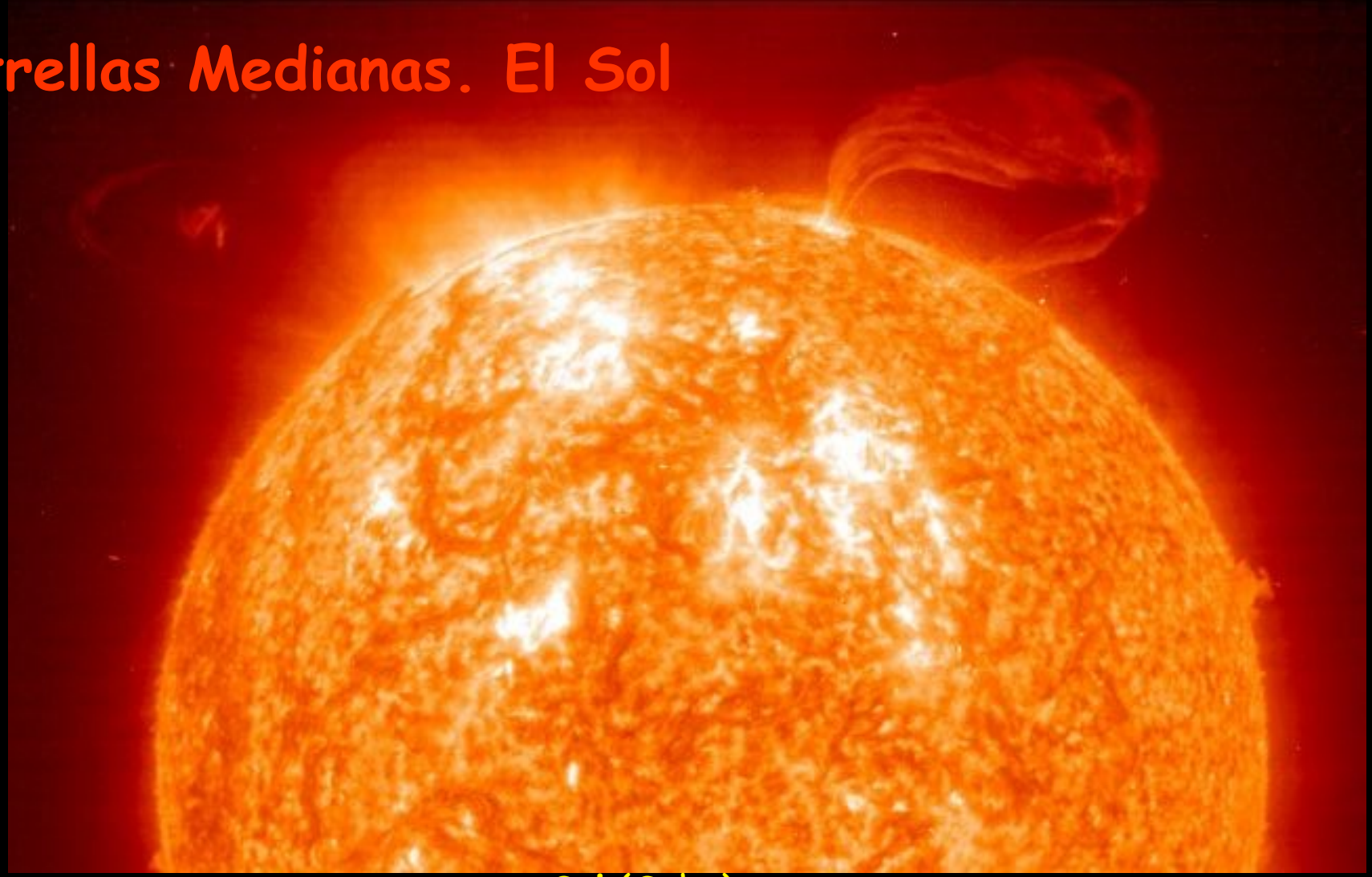
Estrellas pequeñas. Enana roja



Próxima Centauri (Chandra) la estrella más cercana a la Tierra

- Las enanas rojas son las estrellas de la secuencia principal más pequeñas, tienen una masa entre 0.08 y 0.8Msol. Situadas en la esquina inferior derecha del HH
- La energía de fusión nuclear siempre es contrarrestada por la gravedad.
- Cuando todo el H se consume produciendo He, las reacciones nucleares paran, no se produce evolución posterior.
- Una enana roja tarda 14 000x10^6 años en gastar su energía (más de la edad del Universo)

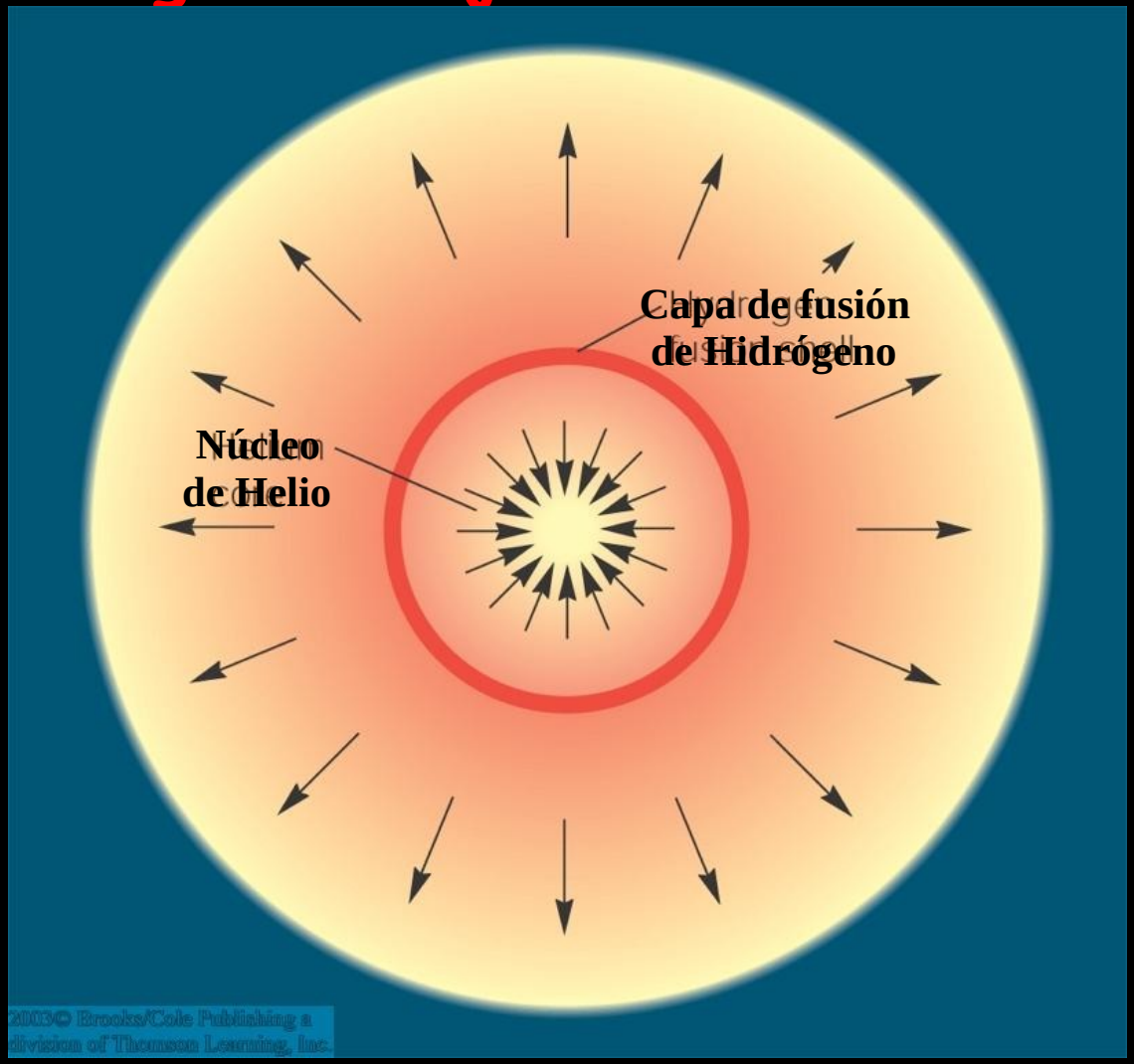
Estrellas Medianas. El Sol



Sol (Soho)

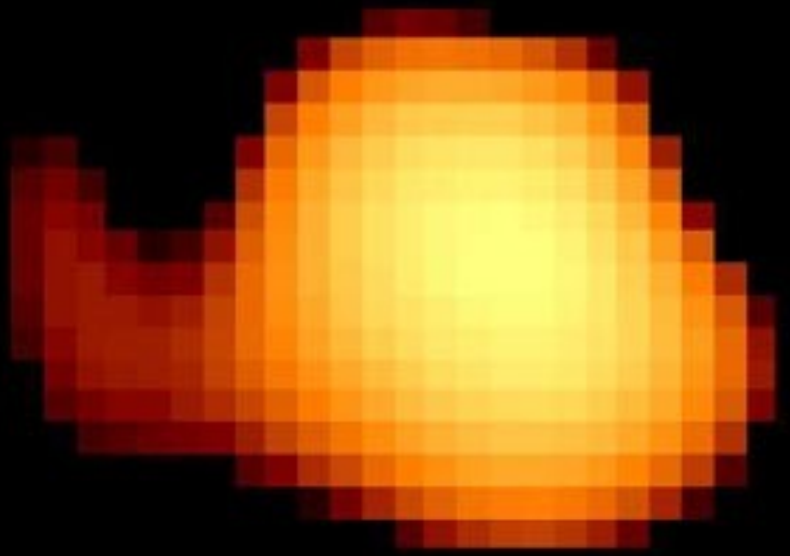
- Son estrellas con masa entre 0.8 y 8 Msol. La fusión de H produce una presión que se contrarresta con la gravedad durante unos 12 000 x10^6 años (para el Sol)
- Durante esta fase la estrella mantiene una alta estabilidad en brillo y radiación.
- Cuando se gasta el H del núcleo, la fusión se detiene. El núcleo vuelve a colapsar por acción de la gravedad, aumenta la temperatura y presión del interior. Cuando se dan las condiciones adecuadas se produce la fusión del He en C y O.

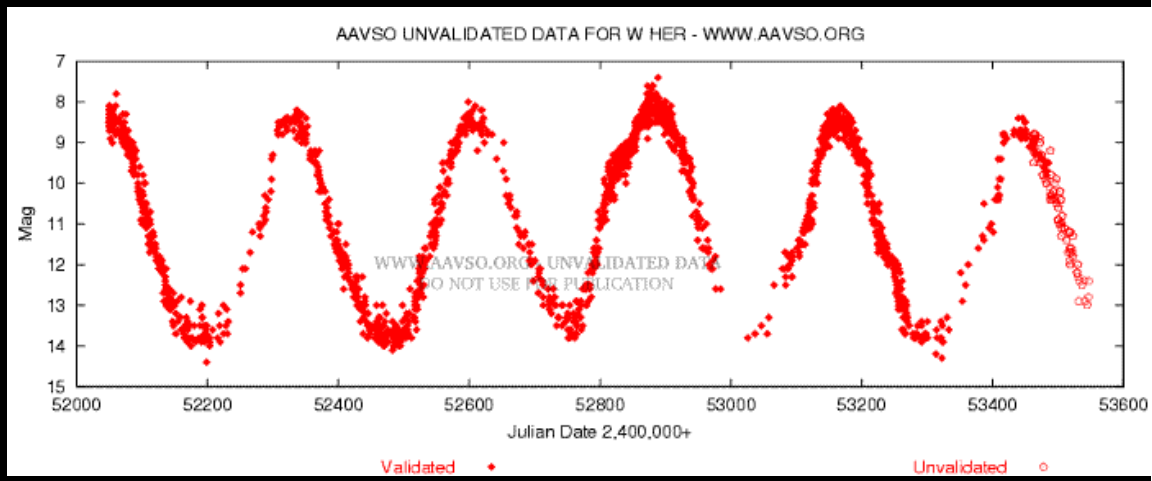
Evolución de estrellas medianas. Expansión a Gigante Roja



- Cuando el H del núcleo se ha gastado completamente, la temperatura interior crece, produciéndose la fusión del Helio.
- H continúa fusionándose alrededor del núcleo, lo que produce una expansión de las capas externas => Expansión y enfriamiento, fase de **Gigante Roja**

Estrella mediana. Fase Mira



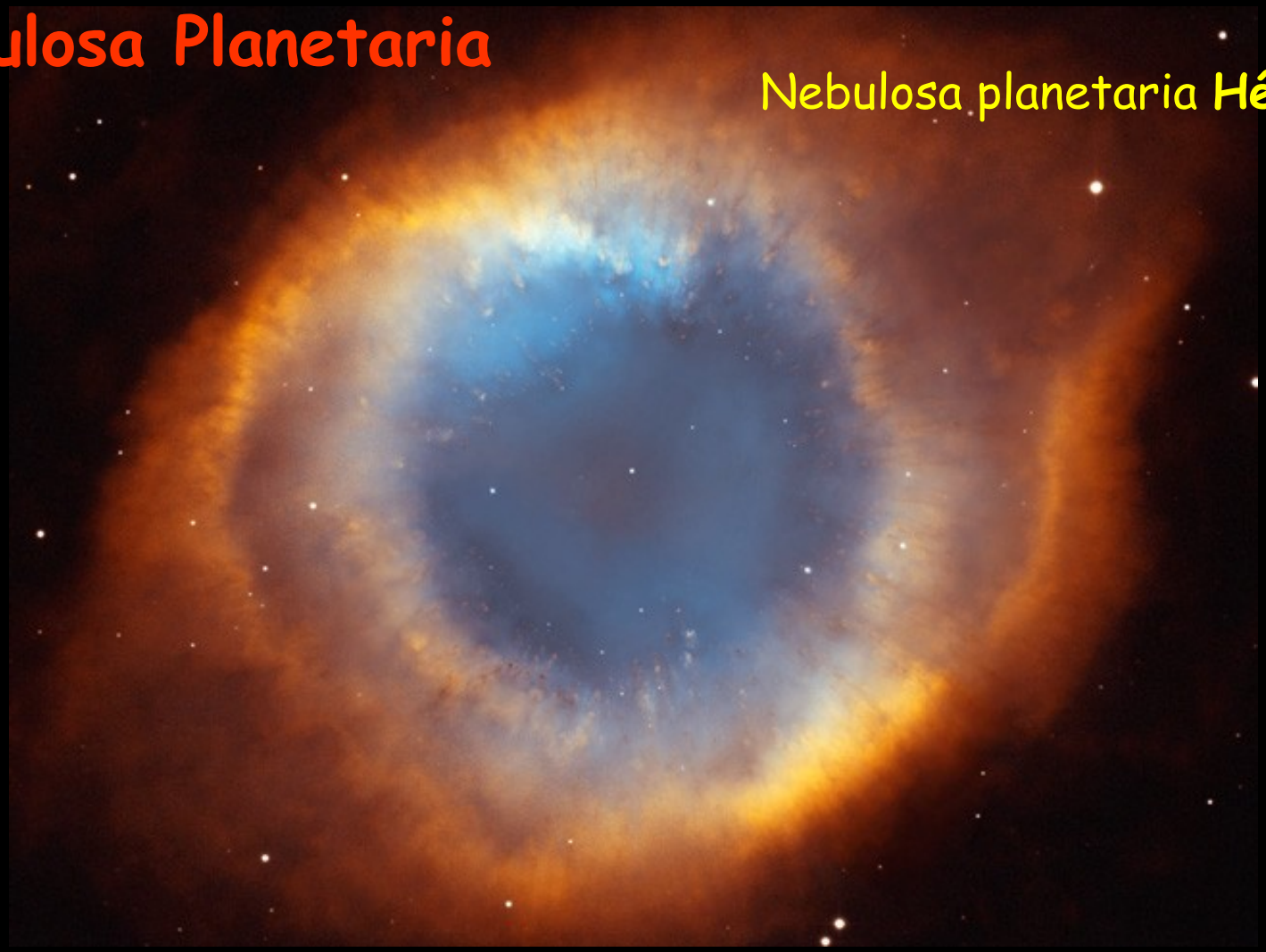


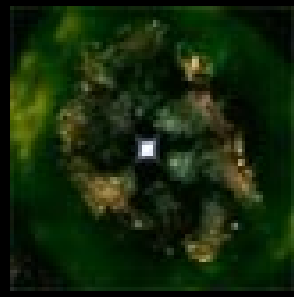
Mira imagen del Hubble y curva de luz

- Las capas externas se expanden enormemente y la estrella comienza su evolución hacia la fase de gigante roja. El brillo aumenta (1 000 y 10 000 veces), la temperatura cae hasta 3000 K – 4 000 K, tomando un aspecto rojizo.
- La gigante roja puede pulsar, la superficie se expande y contrae cíclicamente.
- Las pulsaciones de la **variable Mira** produce un cambio en el brillo de la estrella.
- En unos millones de años un fuerte viento saldrá de la estrella, expulsando las capas exteriores creando una nebulosa planetaria y quedando el núcleo remanente como una enana blanca. llevándose casi toda la envoltura de H que rodea al núcleo de la estrella.

Nebulosa Planetaria

Nebulosa planetaria **Hélice** (Hubble)

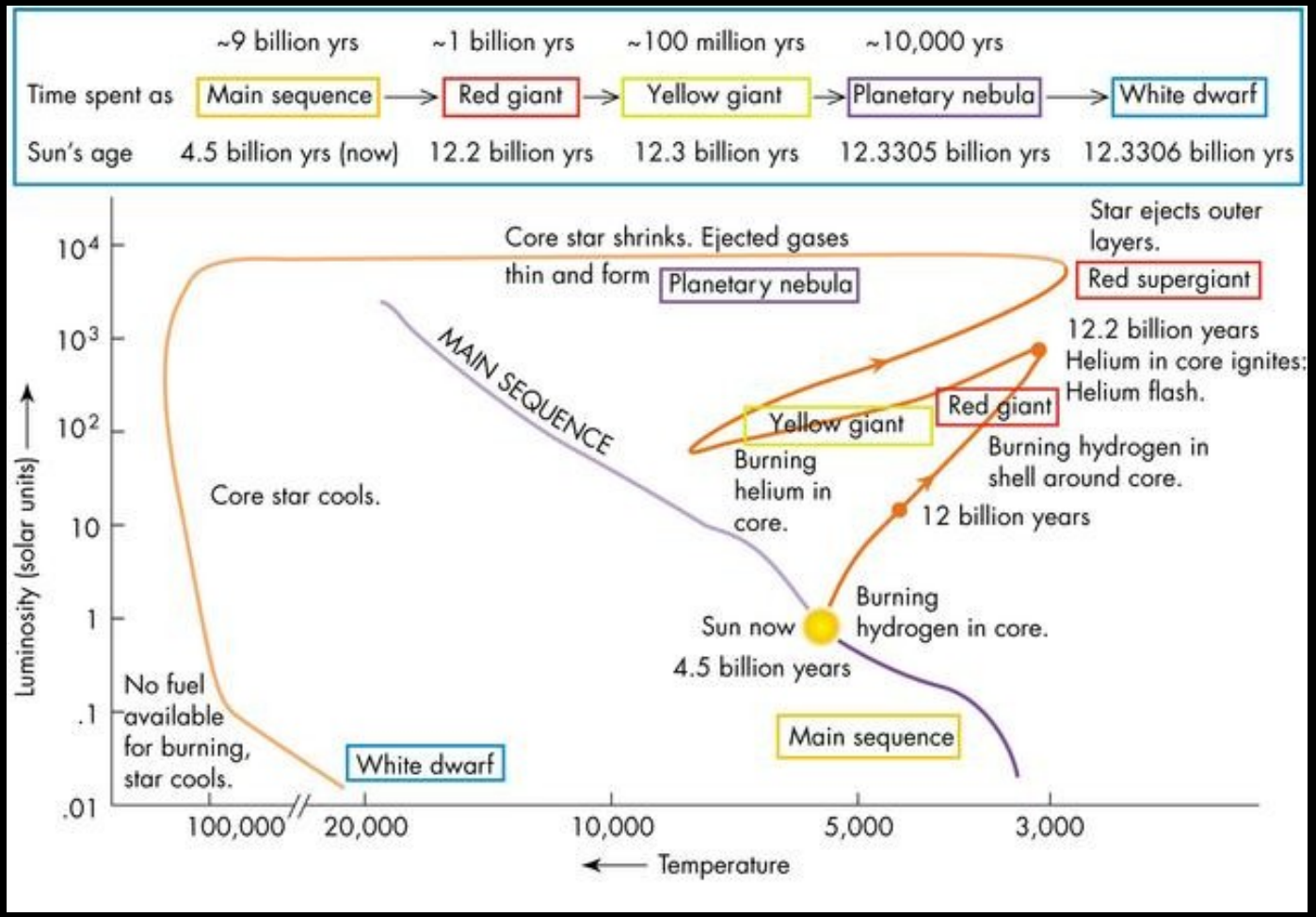




- El material eyectado forma un envoltorio de gas, **Nebulosa planetaria**, que se expande por el medio interestelar.
- La estructura es muy tenue y de vida muy corta (unos 50 000 años.)
- En el centro queda el núcleo de la estrella, **enana blanca**, extremadamente denso.
- La enana blanca mantiene un balance entre gravedad y repulsión electrónica.
- Cuando la **enana blanca** radia toda su energía se transforma en **enana negra**
- Todavía no se ha formado ninguna, el Universo no es lo suficientemente viejo.

La vida del Sol

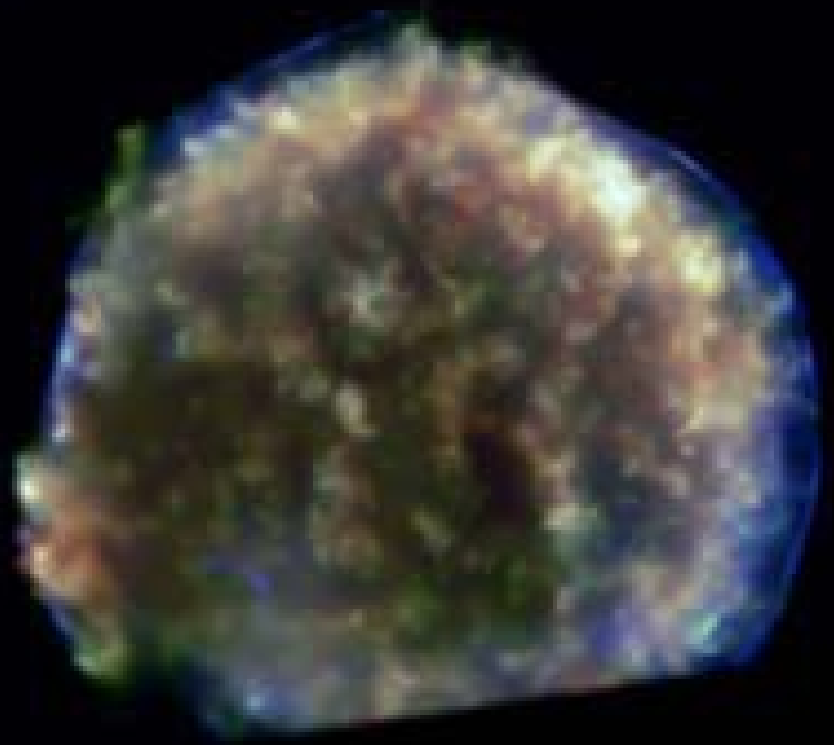
Fase	Edad (10^6años)
Nace	0
T-Tauri	10
Sec. Principal	100
Ahora	4 500
Sale sec. Prin.	12 000
Gig. Roja	12 200
Gig. Amarilla	12 300
Nebu. Planet	12 330
Enana blanca	12 330
Enana negra	24 000



- Sol: tipo G en secuencia principal, temperatura superficial=5 800 K, luminosidad=1.
- Cuando gaste H del núcleo ⇒ la fusión para ⇒ contracción del núcleo ⇒ produccción de He en capas externas. Gigante Roja.
- Si gasta H de la corteza ⇒ contracción, calentamiento, menos luminoso ⇒**Gigante Amarilla.**
- Gaste el He => contracción, fuerte emisión de las capas externas ⇒ Nebulosa Planetaria con un núcleo de carbono llamado **enana blanca.**
- La enana blanca radiará energía durante 12000 millones de años hasta agotarse, **enana negra**

Sistema binario.
Un camino alternativo.

Sistema binario. Enana blanca "robándole" material a su compañera gigante roja



Tycho, remanente de supernova (Chandra)

- Una **enana blanca** no es el producto final en sistemas binarios con masas de 1Msol y 5Msol. La estrella mayor evoluciona rápidamente: antes y se transforma en

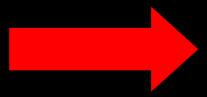
  gigante roja ⇒ nebulosa planetaria ⇒ enana blanca

- Cuando la más pequeña llega a gigante roja, crece y su capa externa puede ser atraída por el campo gravitatorio de la a más pequeña. El material sigue un movimiento en disco espiral hacia la superficie de la enana blanca., que crece rápidamente.

- Si la masa de la enana blanca supera un límite (1.4Msol), puede fusionar el carbono de manera explosiva, en menos de un segundo es destruida mediante una catastrófica explosión. Todo el material es expulsado y el núcleo destruido

Índice

- Antes de nacer
  - Medio interestelar
  - Nebulosas
  - Nubes gigantes moleculares
  - Protoestrellas
- Objetos estelares jóvenes
  - Objetos HH y T-Tauri
- **Evolución de estrellas**
  - Casi-estrellas (M < 0.08MSol)
  - Pequeñas (M < 0.8 MSol)
  - Medianas (0.8 MSol < M < 8 MSol))
  - Grandes (M > 8MSol)



Formación de estrellas masivas

M7 cúmulo abierto, región de formación de estrellas masivas (masa > 8 MSol)

- Es difícil estudiar la distribución de estrellas masivas porque su emisión principal es radiación ultravioleta, no detectable desde la superficie de la Tierra.
- Su vida en la secuencia principal es muy corta. Incluso puede que no se hayan ensamblado totalmente hasta después de que su núcleo se haya fisionado considerablemente.

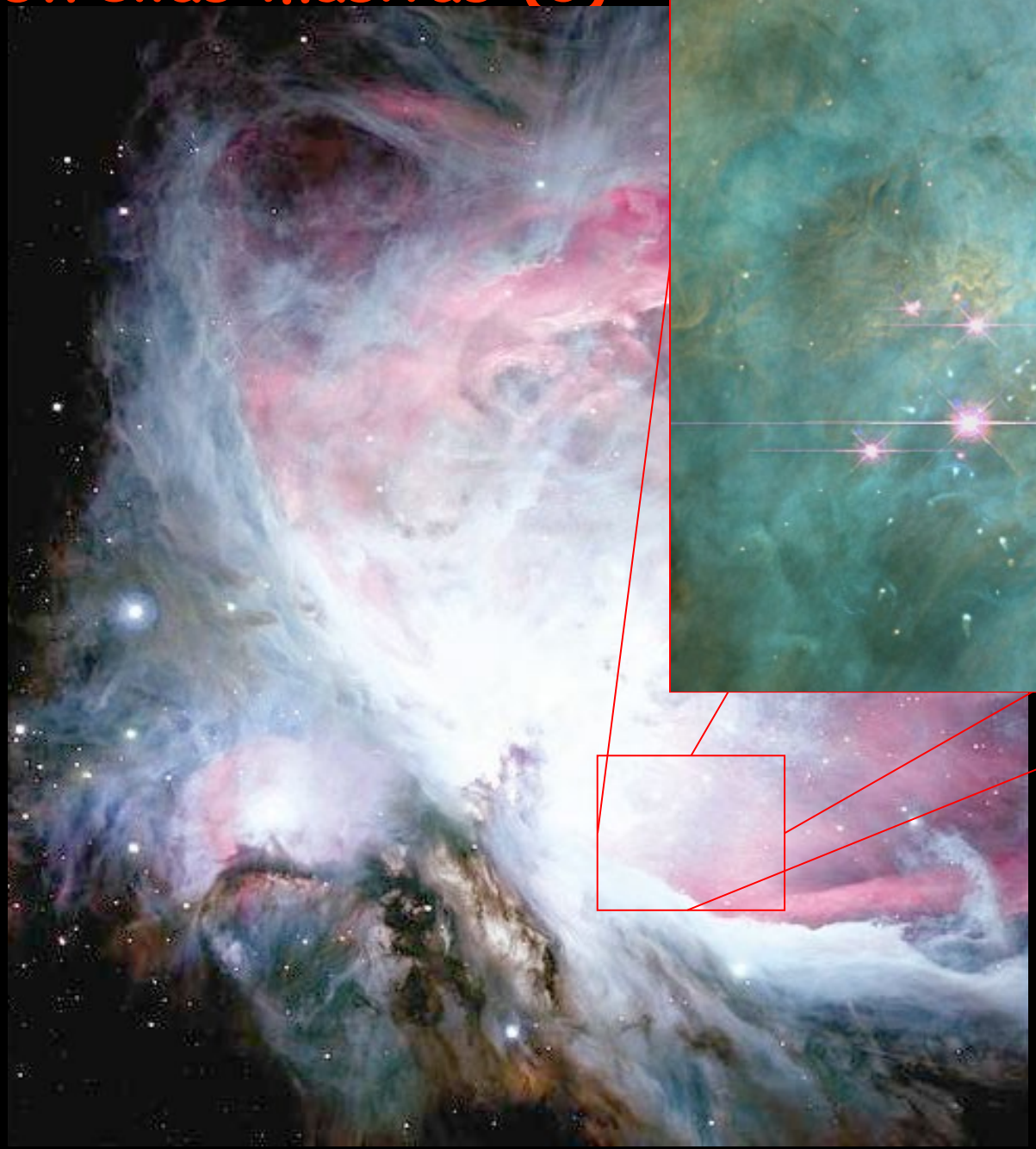
Formación de estrellas masivas (2)

Nebulosa del Águila

- Región de formación de estrellas masivas.

- El número de estrellas masivas es bajo, pero contribuyen a las propiedades de las galaxias por su producción de elementos pesados.
- La formación estelar en un cúmulo se detiene al formarse unas pocas estrellas masivas debido al efecto que producen a su alrededor. Su alto brillo y luminosidad calienta el gas, rompen las moléculas, lo expulsan hacia el exterior e impiden la formación estelar.
- Regulan la formación de estrellas a gran escala, alimentándola o retrasándola mediante sus intensos vientos, radiación y explosiones de supernova.

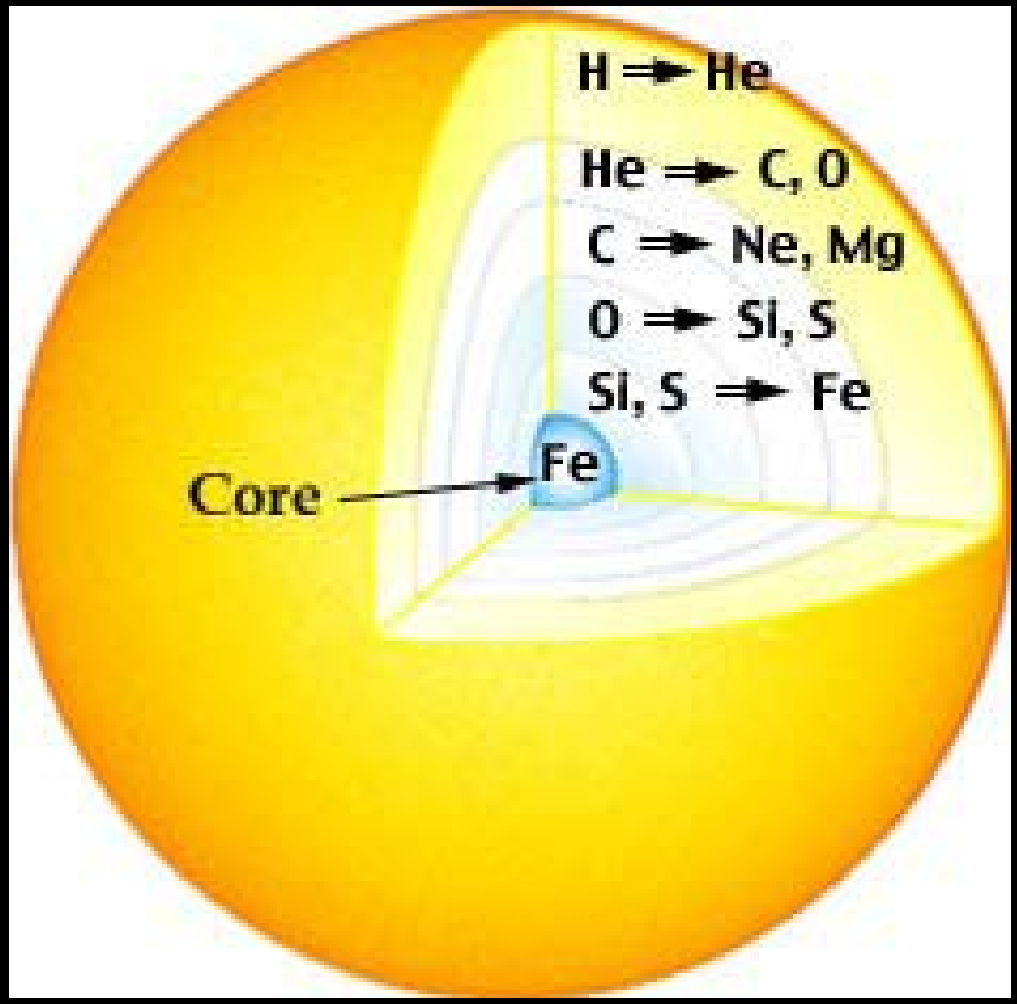
Formación de estrellas masivas (3)



- Consta de una nebulosa de emisión excitada por 4 estrellas jóvenes, calientes y luminosas, el **Trapecio** de 2 x 10^6 años.
- El complejo de Orión se dispersará en 100 000 años y su apariencia será similar a las Pléyades (cúmulo abierto).

Pleyades

Estructura interna



- Tras consumir el H, el núcleo de las estrellas masivas produce elementos más pesados:

- Una vez consumidos, el núcleo de C y O se contrae y calienta hasta que puede continuar el proceso de fusión, produciendo **Ne, Mg, Si** y **S**.
- También Si y S fusionan para formar Fe, Ni y otros elementos.
- La estructura de la estrella presenta distintas capas, con Fe en el núcleo y capas superpuestas de elementos más ligeros.
- El elemento más estable es ^{57}Fe.

Trágico final

Sher 25, la próxima supernova observable

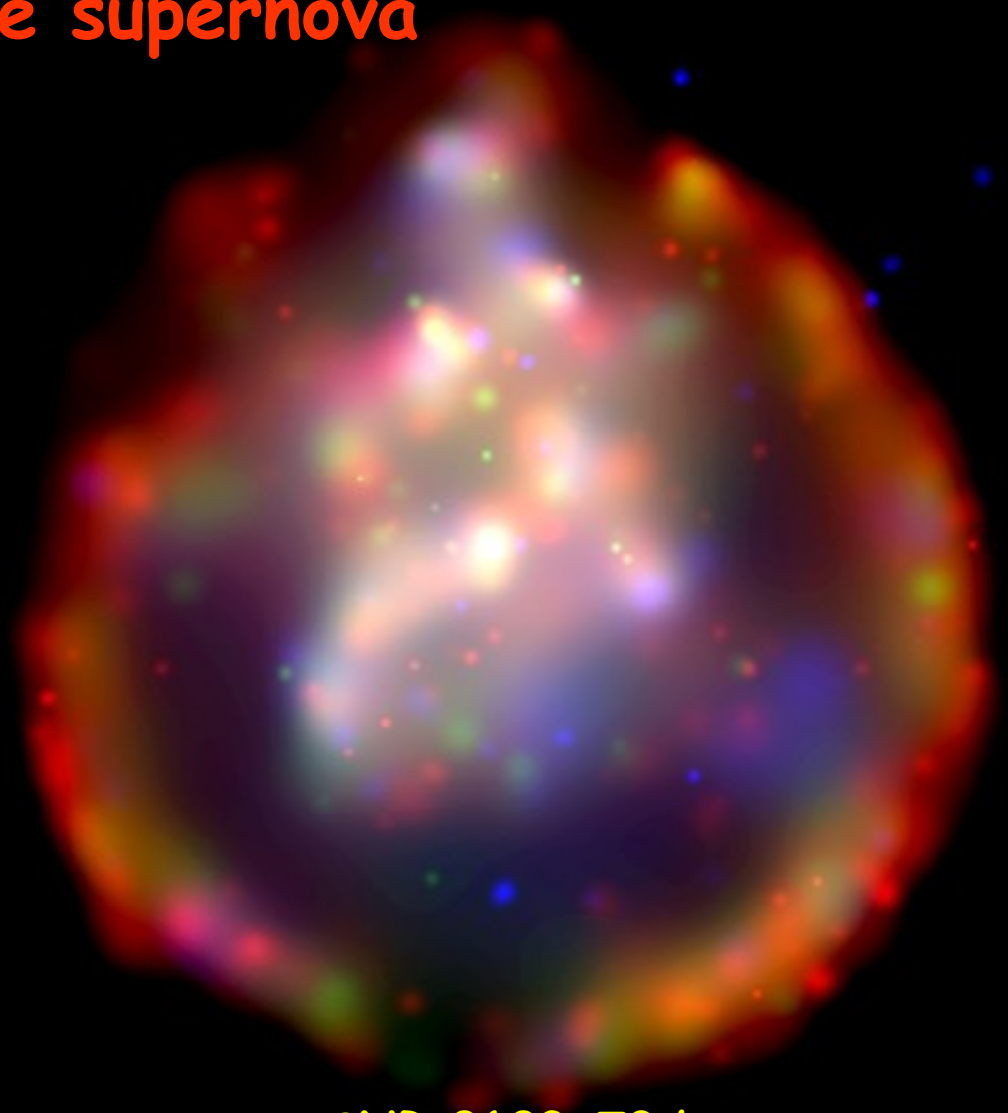
- El núcleo de Fe crece conforme la estrella evoluciona.
- Si la masa del núcleo alcanza 1.4Msol, la presión de degeneración electrónica no es capaz de frenar el colapso gravitatorio de la estrella.
- En menos de un segundo el núcleo colapsa, pasa 8 000 km a 19 km.
- El núcleo colapsa tan rápidamente que supera la posición de equilibrio, rebota y colisiona con las partes externas de la estrella que están contrayéndose.

Trágico final (2)

- **SN**1987A, en Gran Nube de Magallanes, la primera supernova "moderna" estudiada (Keppler 1604)
- Se observa coronas de material expandiéndose por el medio interestelar

- La energía del proceso es inmensa (más que 100 soles durante toda su vida).
- La energía es emitida en neutrinos y en una explosión de supernova.
- Durante unos días la supernova puede brillar como toda una galaxia.
- El material expulsado se dispersa entre las estrellas y podrá ser utilizado durante la formación de otra estrella.

Remanente de supernova



SNR 0103-72.b

- Muestra el resultado de una supernova que explotó hace 10 000 años en la nube pequeña de Magallanes, una galaxia cercana.
- Es más fácil estudiar las supernovas en otras galaxias porque en la Vía Láctea estos objetos son oscurecidos por el gas y polvo de los brazos espirales.

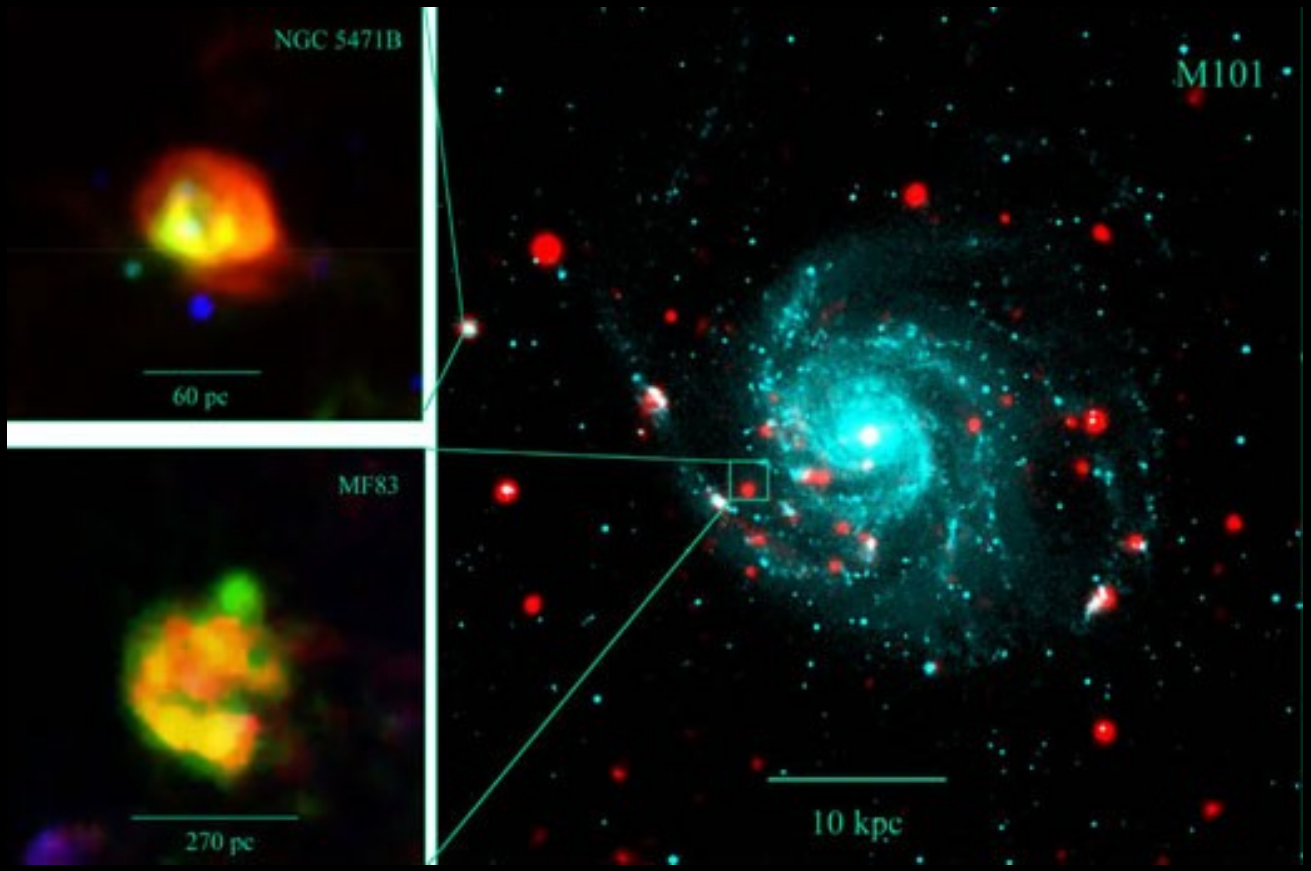
Remanente de supernova (2)

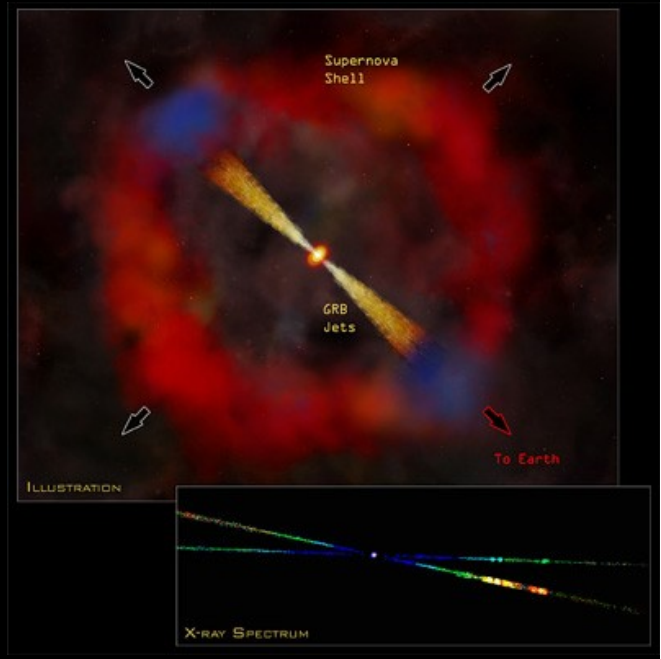
Remanente de Supernova de Kepler

Remanente de Supernova del Velo.

- Los remanentes propagan elementos pesados por el medio interestelar, permitiendo la generación de granos de polvo y materiales rocosos, que darán lugar a planetas.
- El núcleo interno depende de la masa inicial de la estrella, y puede ser una estrella de neutrones, un púlsar, una magnetoestrella o un agujero negro

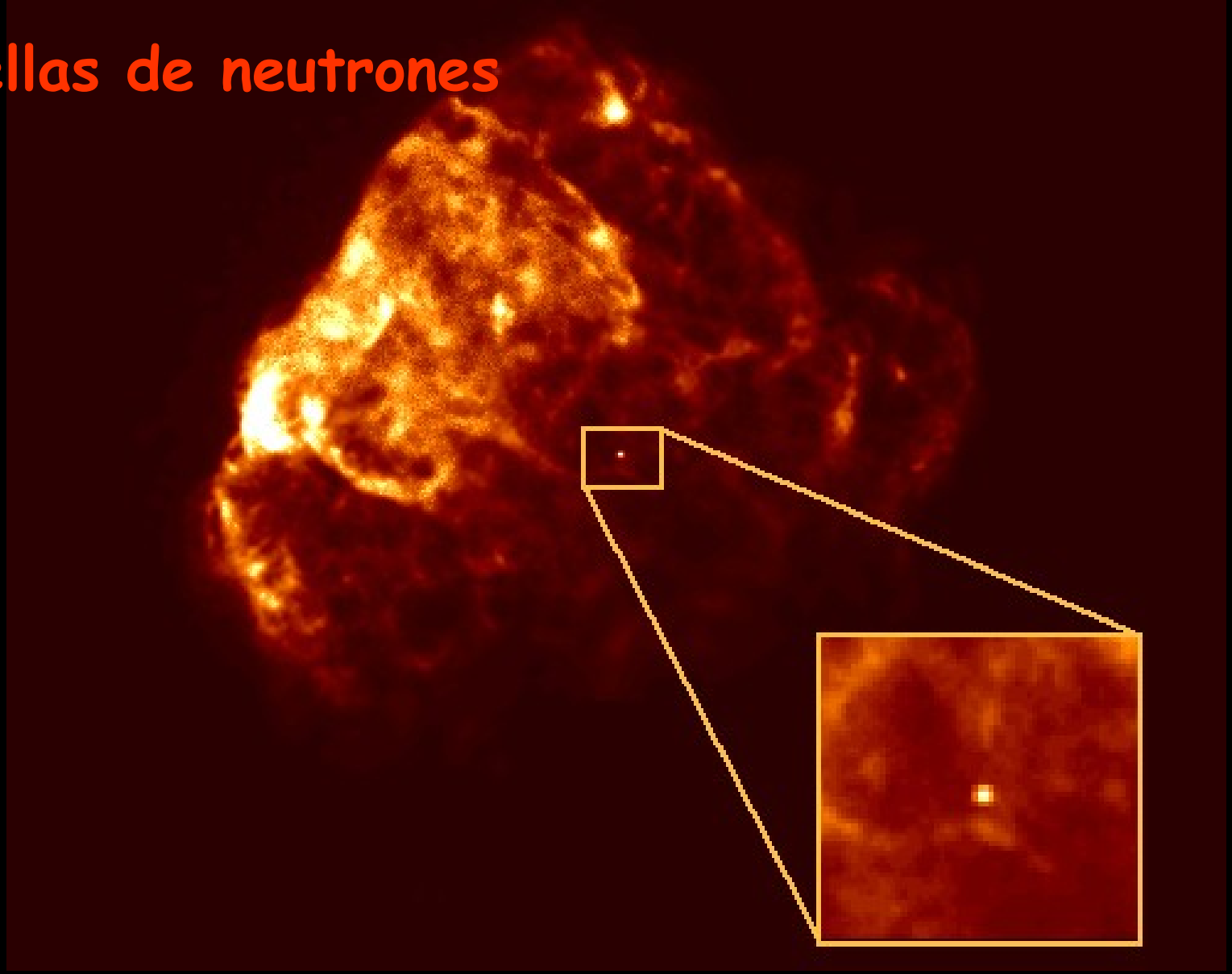
Estallidos de rayos -gamma





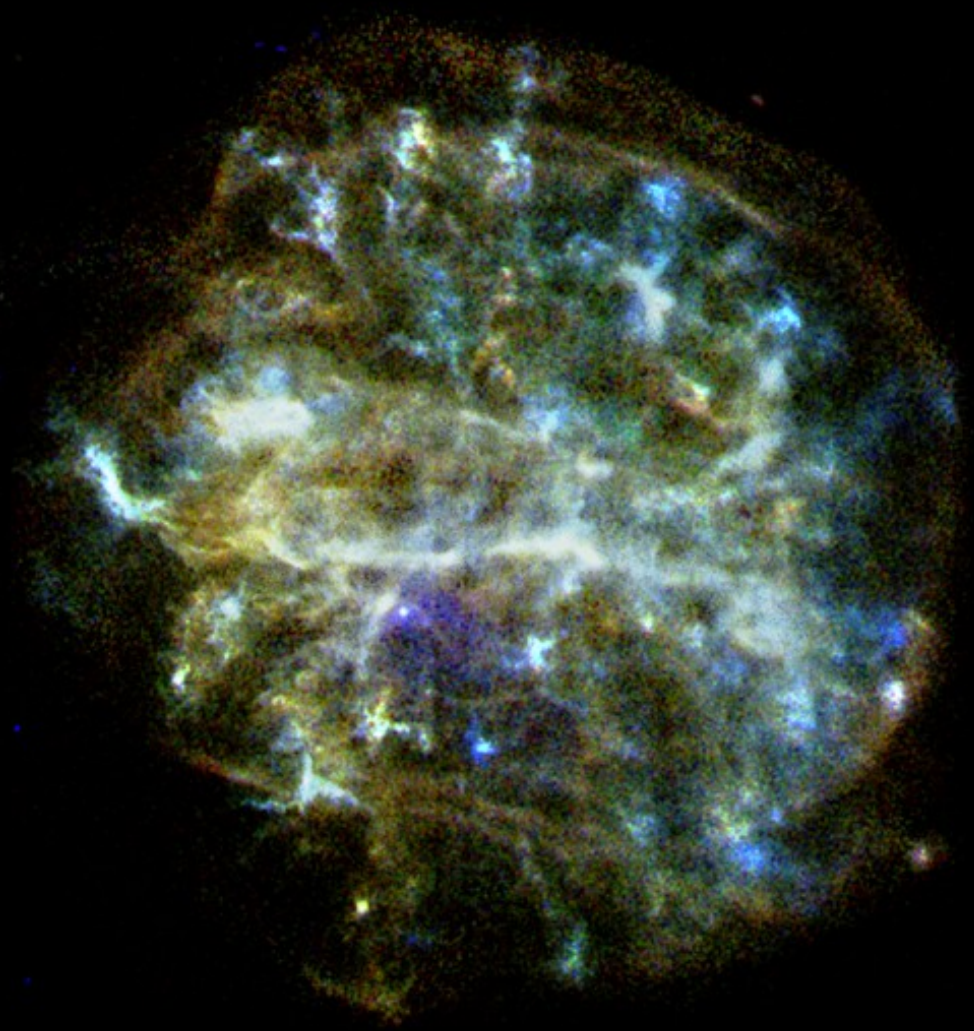
- Los estallidos de rayos gamma son una de las explosiones más energéticas y luminosas del Universo. La energía liberada en un segundo es mayor que la del Sol en toda su vida
- Únicamente observables desde el espacio, duran entre milisegundos y unos minutos y se pueden producir en cualquier dirección del cielo, en cualquier galaxia.
- Observaciones recientes indican que podrían deberse a la explosión de masivas estrellas, que emiten su energía y partículas mediante chorros muy localizados.

Estrellas de neutrones



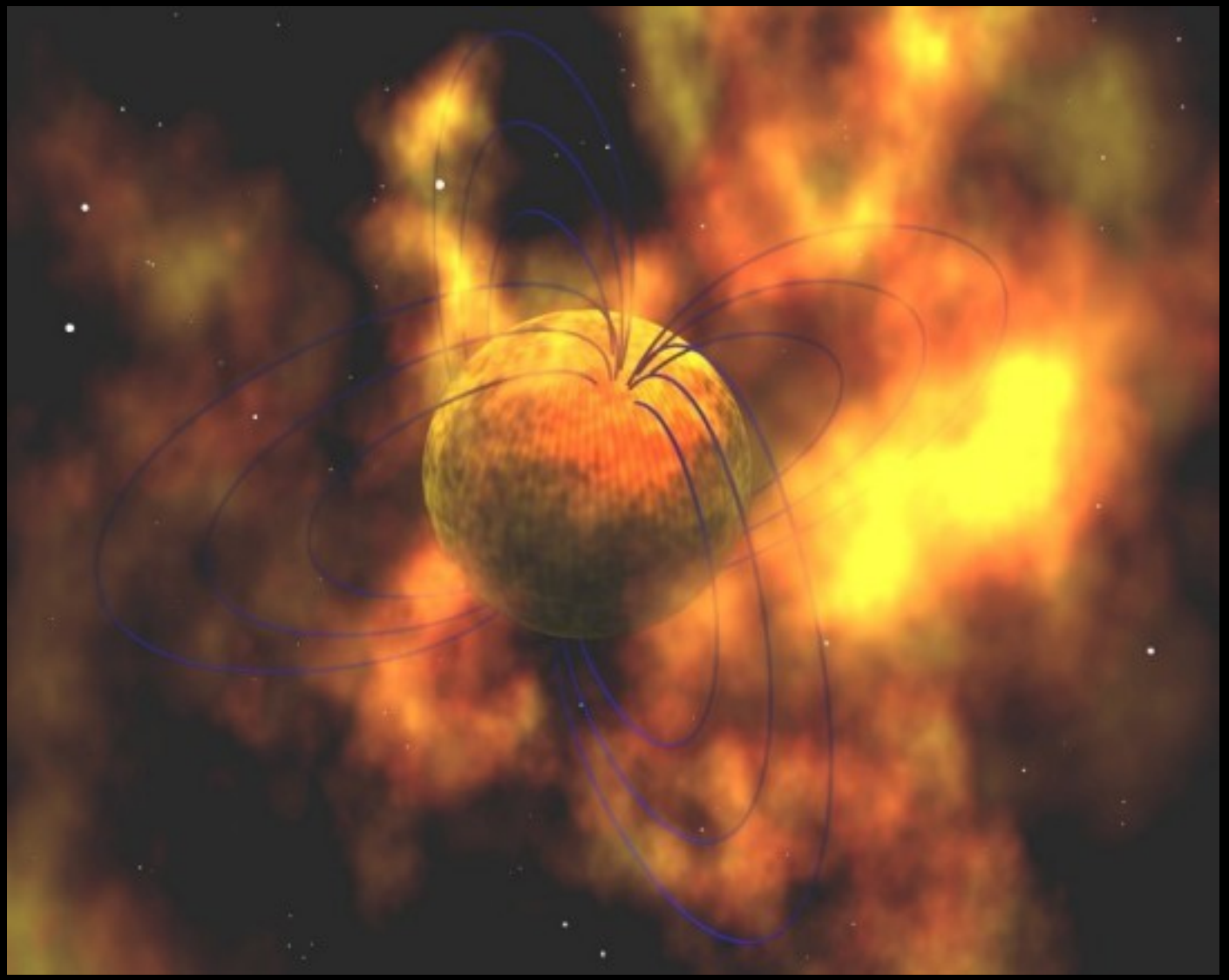
- Las estrellas de neutrones se producen cuando la masa es > 8Msol y la masa del núcleo está entre 1.4 y 2.5 Msol.
- El colapso del núcleo es tal que los electrones son empujados al núcleo, se recombinan con protones formando neutrones.
- Las estrellas de neutrones están en equilibrio porque la presión de degeneración de neutrones es capaz de frenar la fuerza de gravedad.

Púlsar



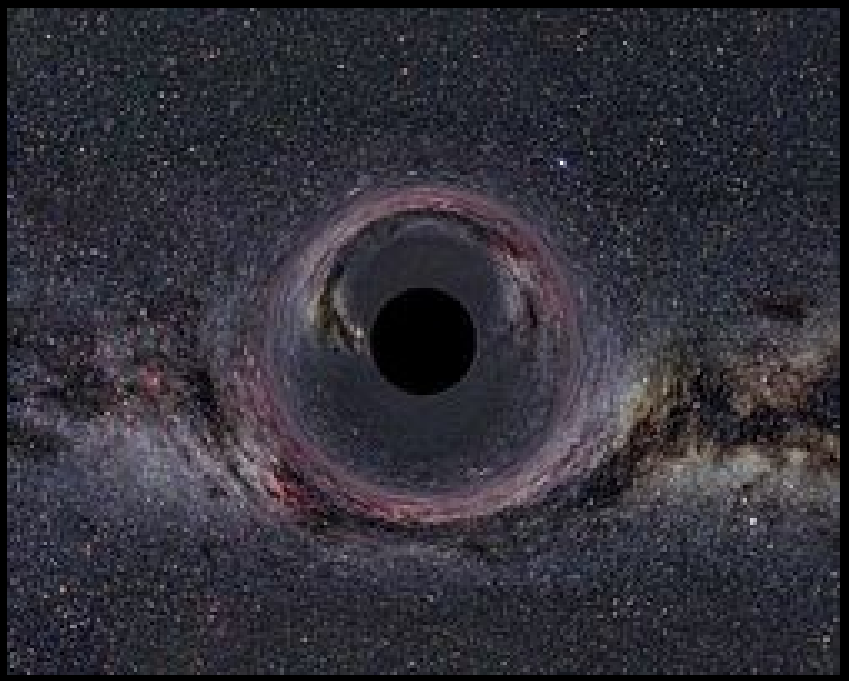
- Púlsares son estrellas de neutrones girando y que emiten chorros de partículas a la velocidad de la luz por los polos magnéticos.
- Como en la Tierra, los polos magnéticos y de rotación pueden no estar alineados. Los chorros de partículas rotan con la estrella, como los haces de luz de un faro.
- El periodo de rotación proporciona información de sus propiedades.

Magnetoestrellas

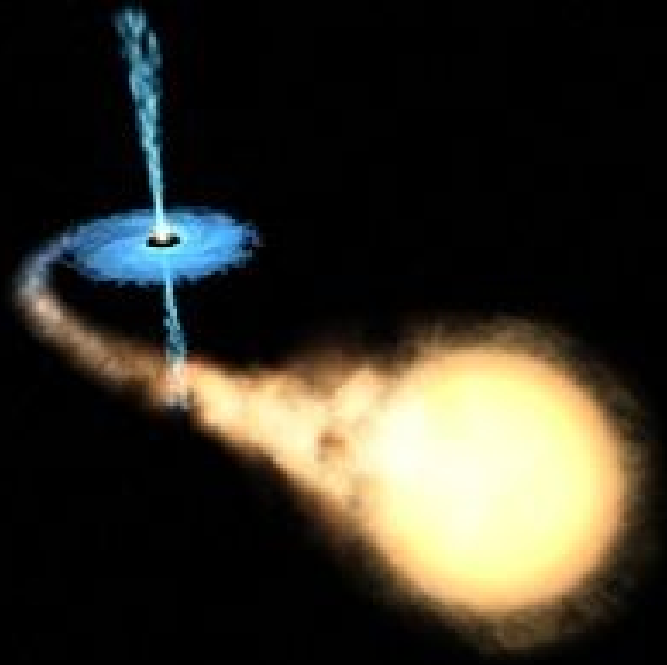


- Son estrellas de neutrones con campos magnéticos ingentes, $100x10^{12}$ el campo de la Tierra. El campo es tan grande que la superficie de la estrella se rompe, produciendo "estrella-motos" con la emisión de rayos X y gamma.

Agujero negro



Simulación de la distorsión de la luz producida por un agujero negro de 10Msol con la vía Láctea al fondo.



Agujero negro con una estrella compañera que se mueve en órbita cercana. La materia que cae forma un disco de acrecimiento, parte de la materia es expulsada por los polos.

- Si la masa del núcleo es > 3 Msol, la presión por degeneración de neutrones no puede frenar la fuerza de gravedad y la estrella colapsa.
- Los neutrones son comprimidos unos con otros creciendo exponencialmente la fuerza de gravedad lo que origina un agujero negro.
- **Horizonte de sucesos**= lugar del espacio del que no puede salir ni la luz. No puede escapar la radiación. Aunque si podemos obtener información mediante los efectos que producen sobre lo que hay alrededor.

Conclusiones

- Estamos en el comienzo de entender los procesos de formación estelar, evolución y destrucción.
- Telescopios en superficie y órbita proporcionan información en todo el espectro de longitudes de onda, desde radio a rayos gamma.
- Los avances tecnológicos nos permiten explorar el universo de manera cada vez más detallada, es de esperar obtener significados avances en la comprensión de un amplio rango de fenómenos cósmicos, incluyendo el ciclo sin fin de la formación y destrucción estelar.

EVOLUCIÓN ESTELAR.
Un paseo por la vida de una estrella

Gregorio José Molina Cuberos