

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
http://www.foxitsoftware.com/ For evaluation only

# 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

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



**NGC 3370 (Hubble).**

Similar a nuestra galaxia.

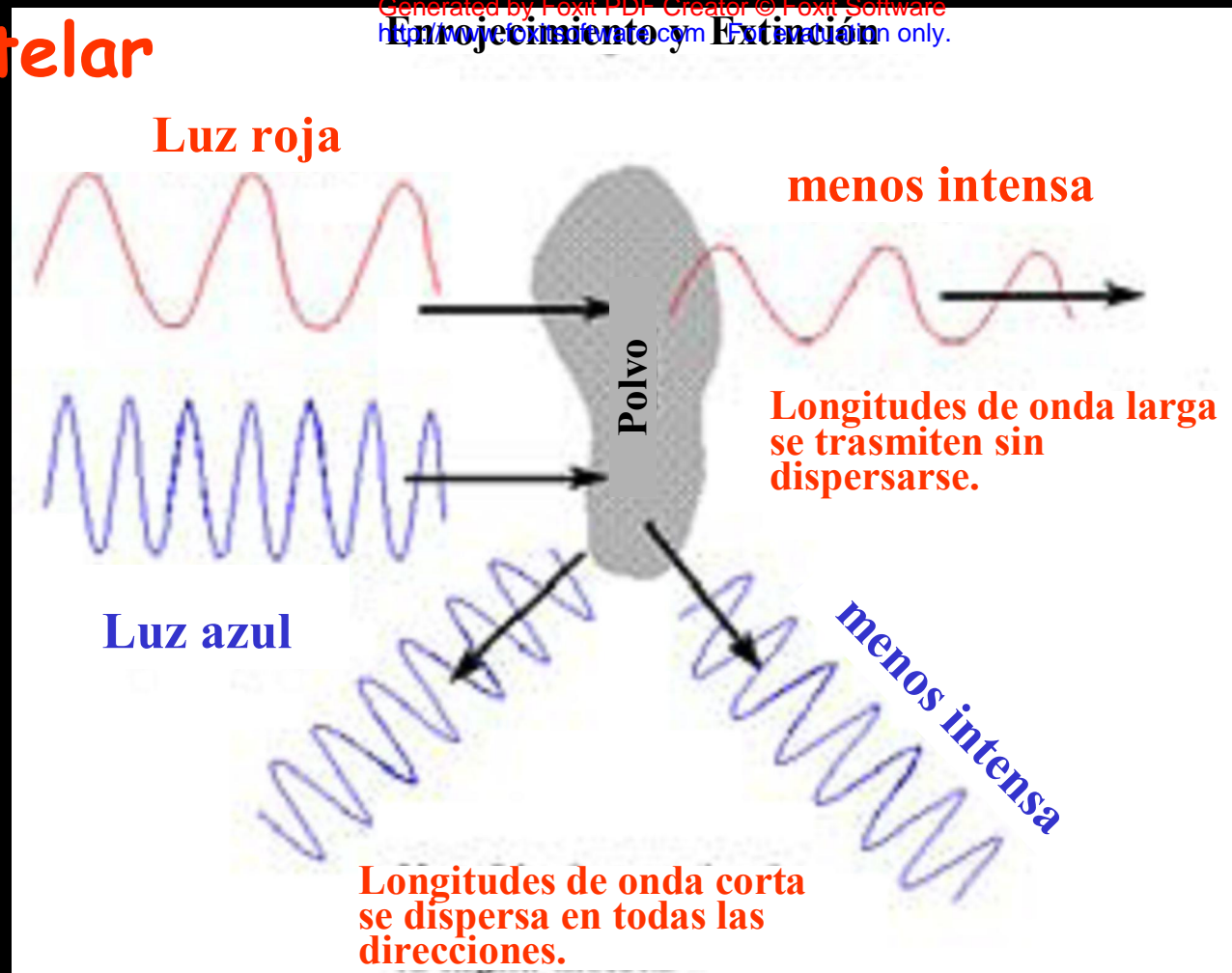
Una galaxia se compone de:

- Estrellas
- Nubes de gas y polvo
- Medio interestelar

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

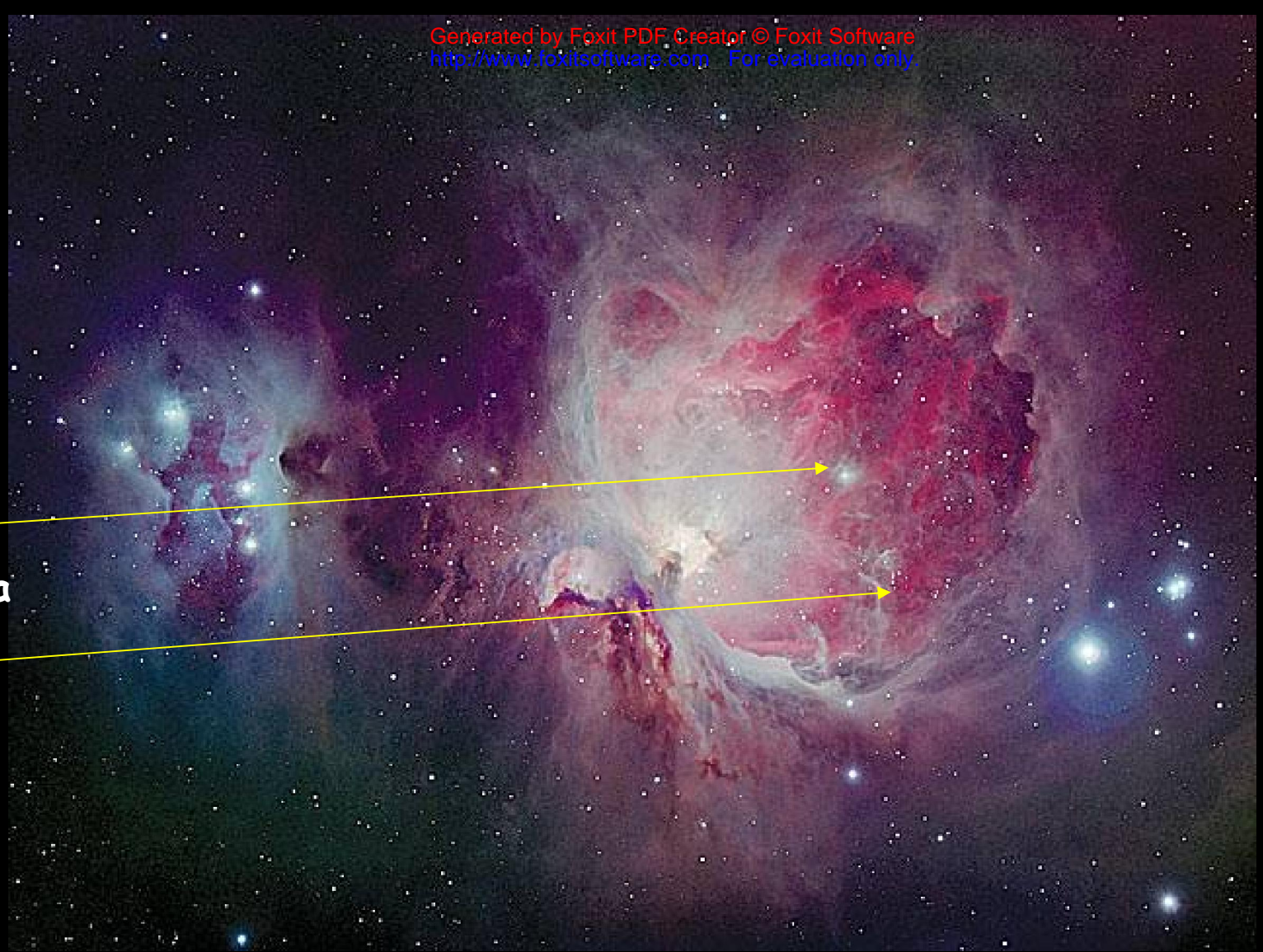
- Densidad pequeña (1 átomo/cc) pero el 20%-30% de la masa total
- Compuesto por H y He (primordial, Big Bang) y elementos pesados (explosiones nova)
- Inmerso en radiación, campos magnéticos, rayos cósmicos ( $T \sim 10^6$  K)

# 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, 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 de emisión



Estrellas luminosas y calientes, ionizan H. La recombinación produce luz roja

## 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 produce luz debido a la energía creada por una o varias estrellas luminosas que excitan el H de la nube.

# Nebulosas de reflexión

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



## 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 de absorción



Nebulosa cabeza de caballo

- Una nebulosa de absorción o negra, simplemente 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 que está detrás suyo

# Nebulosas, todas juntas

Estrellas jóvenes y nebulosa de reflexión

Nebulosas oscuras



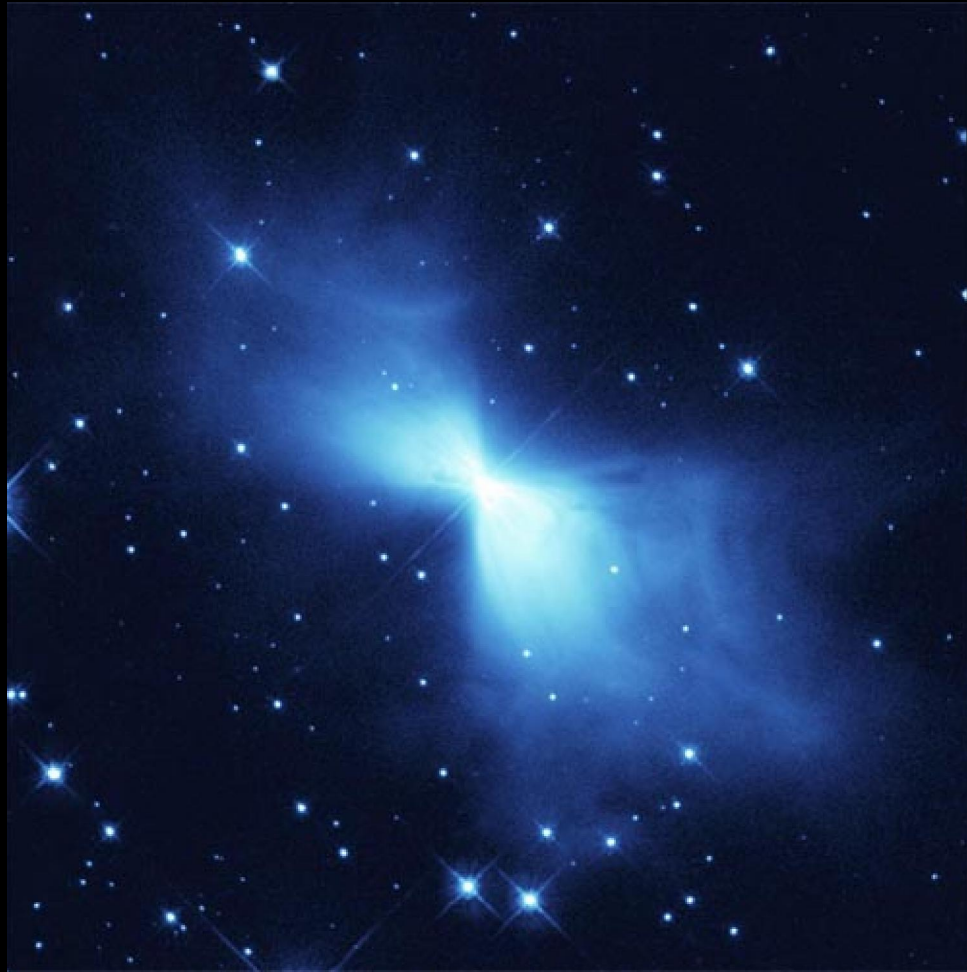
NGC 6559

- Nebulosa emisión con una nebulosidad de reflexión alrededor de dos estrellas jóvenes y nebulosas de absorción en forma filamentosa
- Nebulosas de emisión y reflexión están asociadas a regiones de formación estelar (con estrellas calientes y jóvenes)



# Otras nebulosas ... planetarias

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



↑ Protonebulosa planetaria "Boomerang"  
(antes de la fase de nebulosa planetaria)  
es el lugar más frío del universo



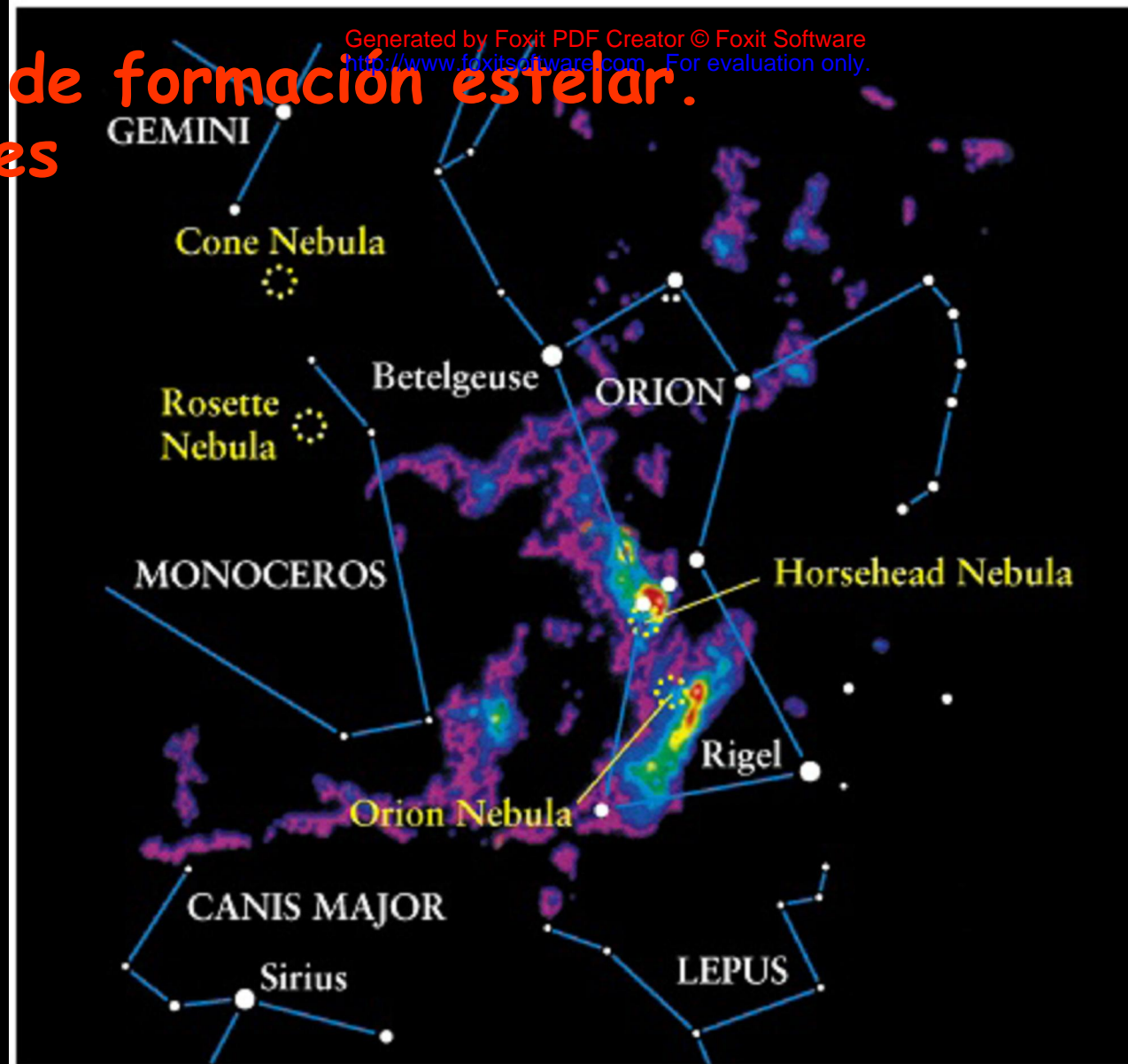
Nebulosa planetaria "La Hélice"



Nebulosa planetaria "Ojo de Gato" →

# Grandes regiones de formación estelar. Nubes Moleculares

Concentración de CO  
en la Vía Láctea

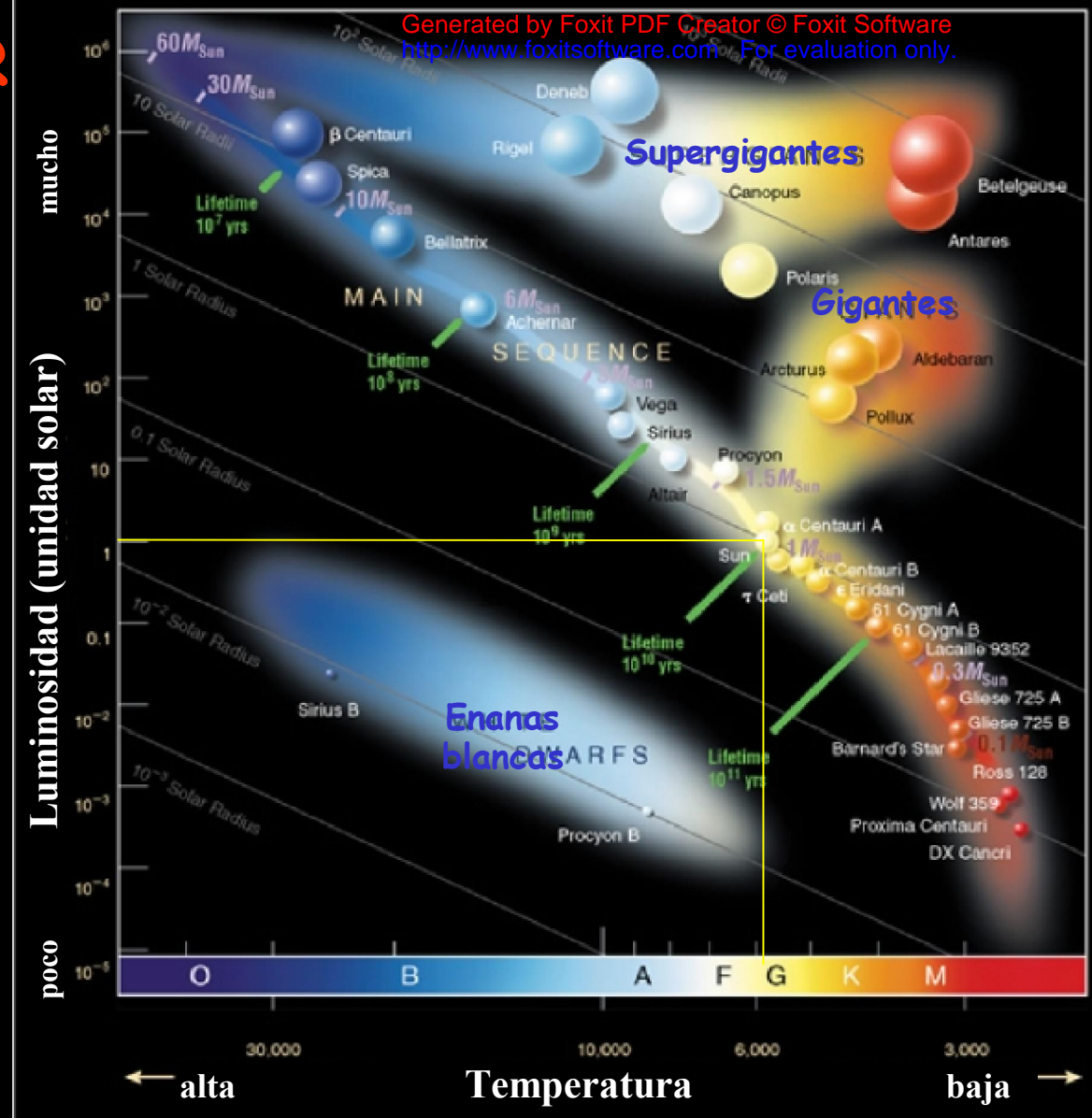


- Grandes agrupaciones de gas y polvo, remanentes de la formación de una galaxia. Compuestas por H, son las porciones del medio interestelar **más frías y densas**.
- Nube molecular gigante: entre 1 y 300 años luz y una masa de hasta 100 000 soles.
- Una galaxia media tiene entre 100 y 2000 nubes gigantes, pequeñas muchas más.
- No se ven (en el óptico), se utilizan radiotelescopios desde hace 25 años.

# Índice

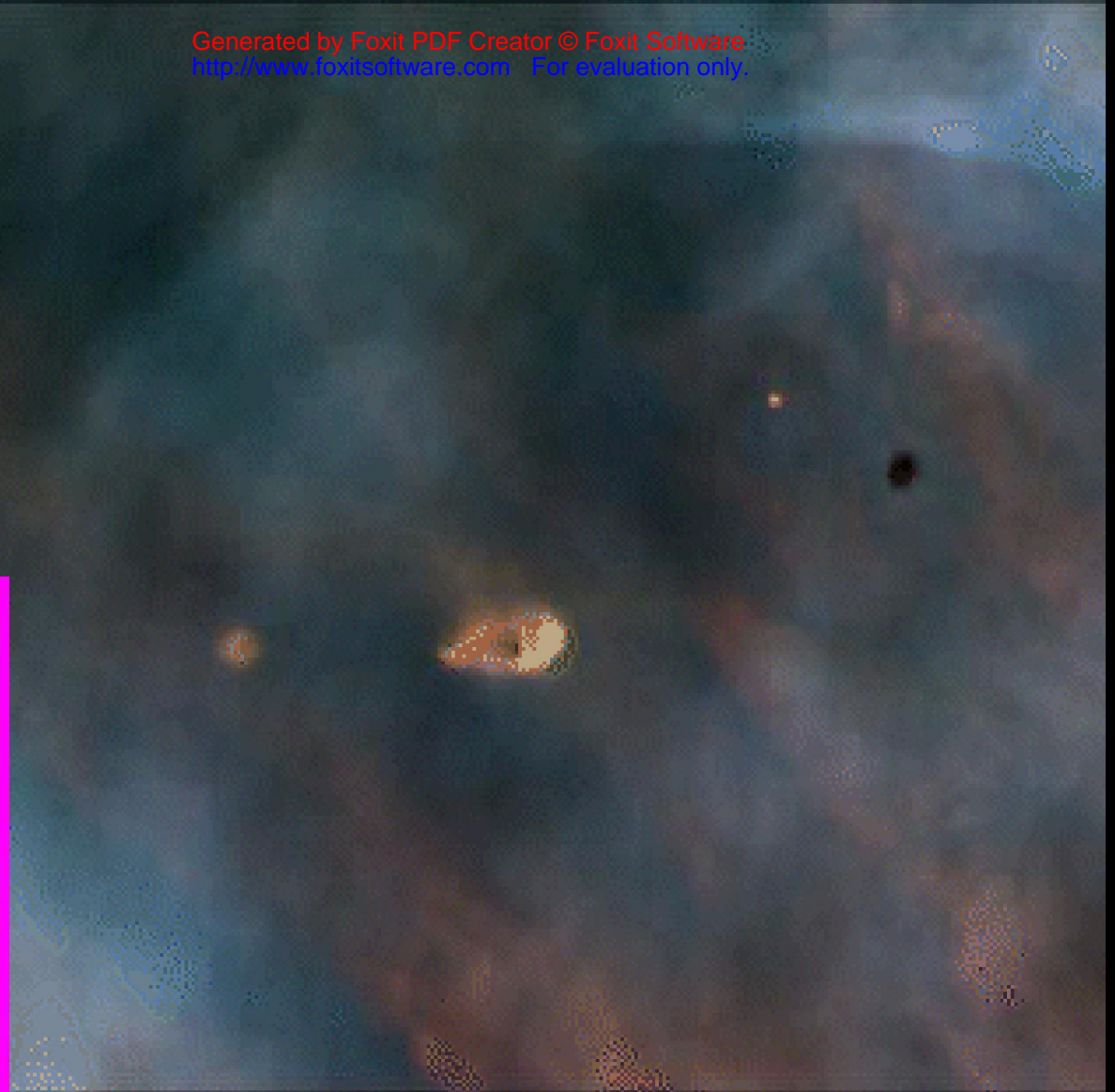
- Antes de nacer
  - Medio interestelar
  - Nebulosas
  - Nubes gigantes moleculares
- Objetos estelares jóvenes
  - Protoestrellas
  - Objetos HH
  - T-Tauri
- Evolución de estrellas
  - Pequeñas ( $< 0.8$  masa del sol)
  - Medianas (entre 0.8 y 8 masa del sol)
  - Grandes ( $> 8$  masa del sol)

# 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 estrellas evolucionan y cambian su posición.
- Es una herramienta básica que los astrónomos usan para clasificar las estrellas.

# Protoestrellas



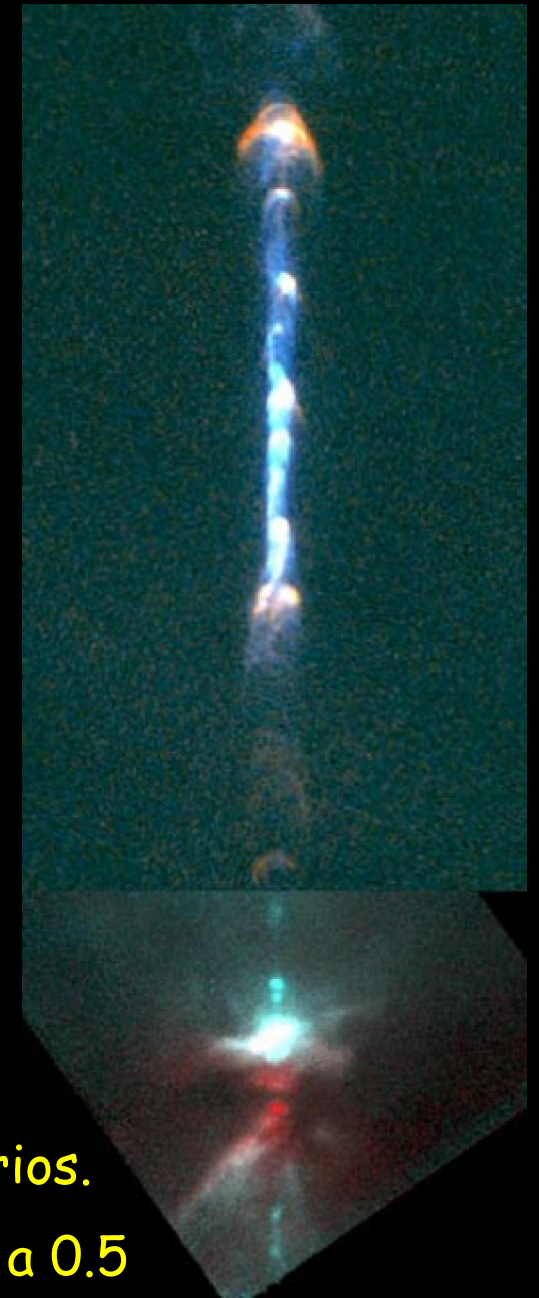
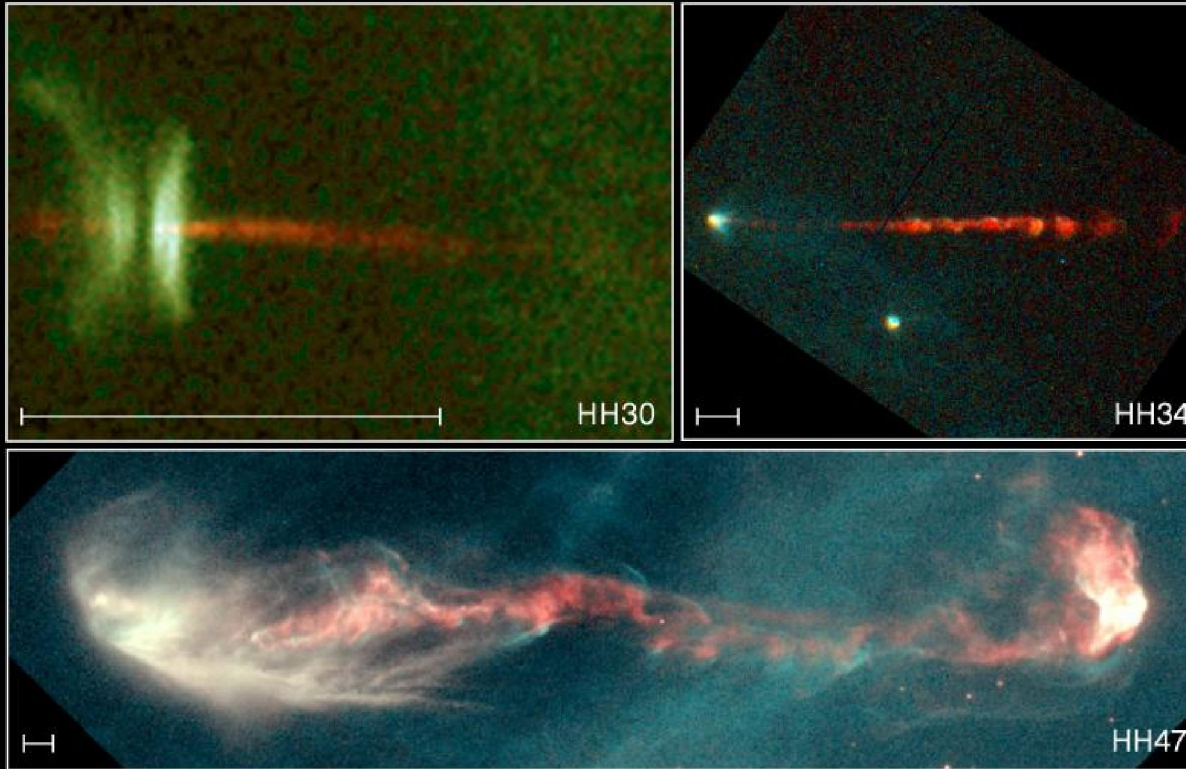
## Protoestrellas en Orión y discos protoplanetarios

- Complicadas condiciones de dos discos jóvenes que inician su crecimiento.
- La radiación ultravioleta de otras estrellas destruye rápidamente los discos que rodean las protoestrellas. Sólo el 10% sobrevive, se transforma en estrella.

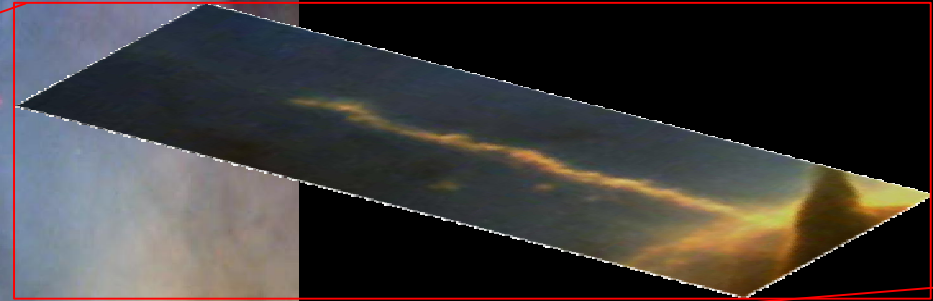
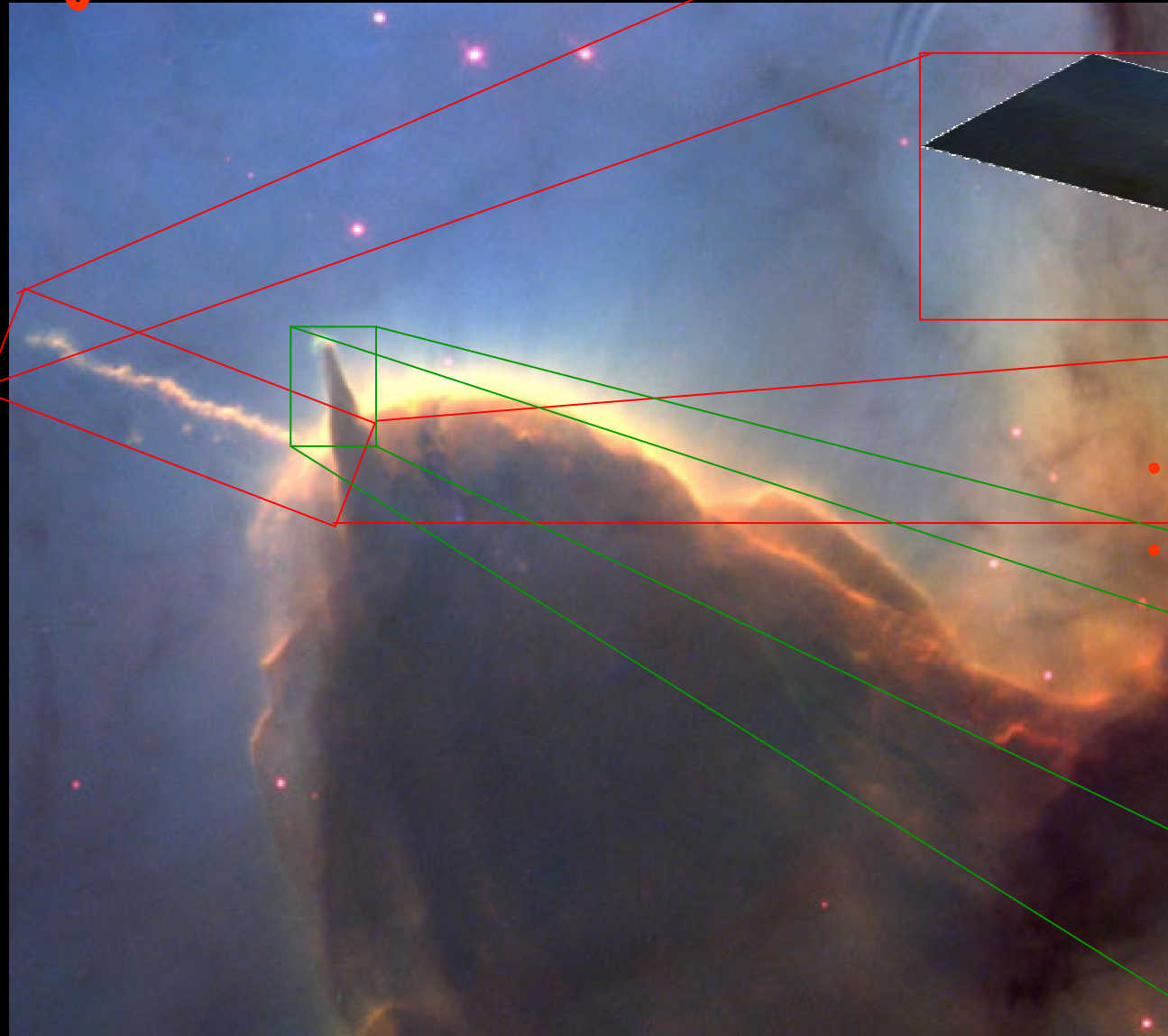
# Objetos Estelares Jóvenes: HH

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.

- Objeto Estelar Joven  $\Rightarrow$  fase entre protoestrella y estrella, gran variedad de formas según edad, masa y medio



- **Objetos Herbig-Haro** contienen discos circumestelares en fase de colapso y emiten chorros de gases por los polos
- Los discos son oscuros y con 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 las nubes de gas oscuro



## Nebulosa Trífida

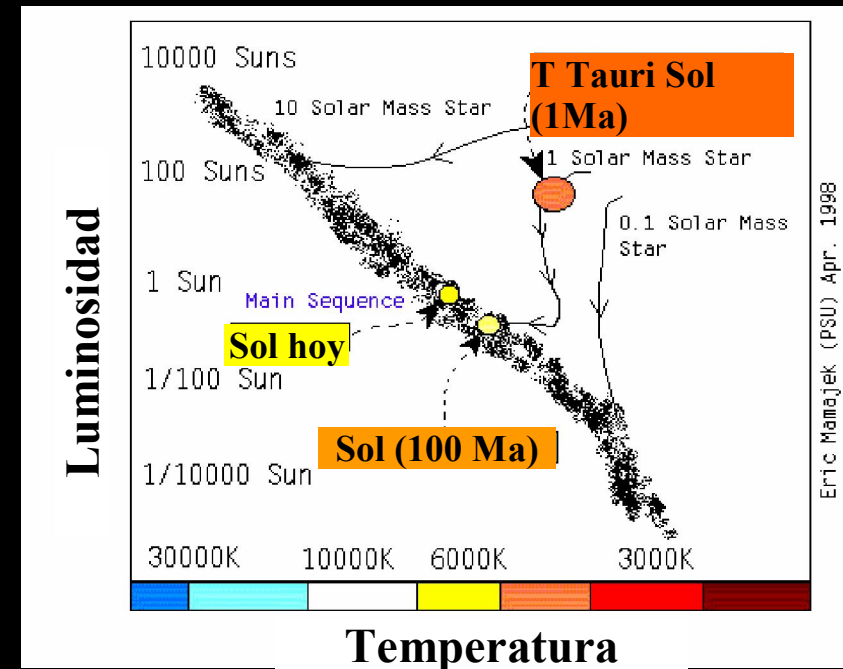
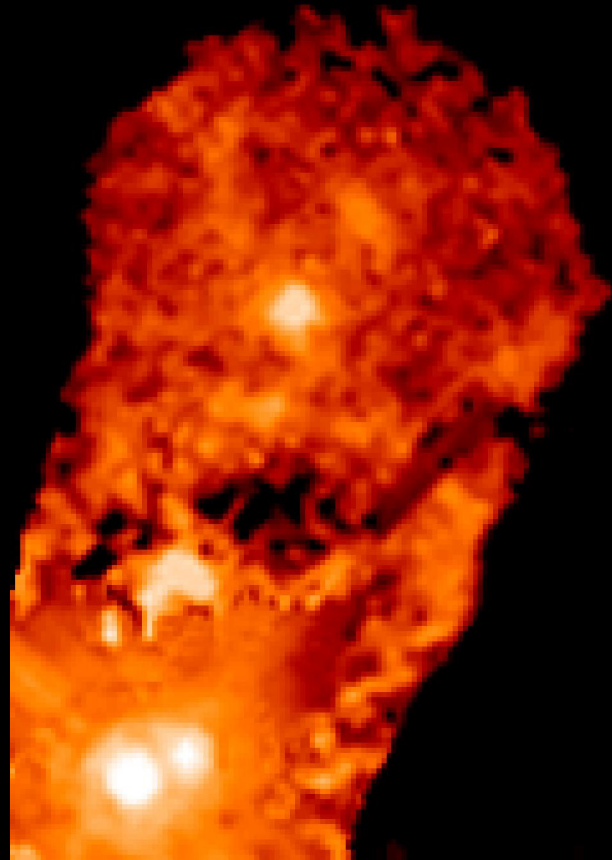
- Región de formación estelar.
- Se observa fácilmente en el visible porque una estrella masiva puede calentar todo el medio interestelar.



- 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

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



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

- Estrellas muy jóvenes y ligeras ( $< 1$  millón de años,  $< 3 M_{\text{sol}}$ ) se encuentran todavía formándose, en fase de contracción gravitatoria.
- Muestran un estado intermedio entre protoestrella y estrella de la sec. principal
- Son 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 formados por polvo. Las más evolucionadas carecen de los discos, ¿se habrán transformado en planetas?

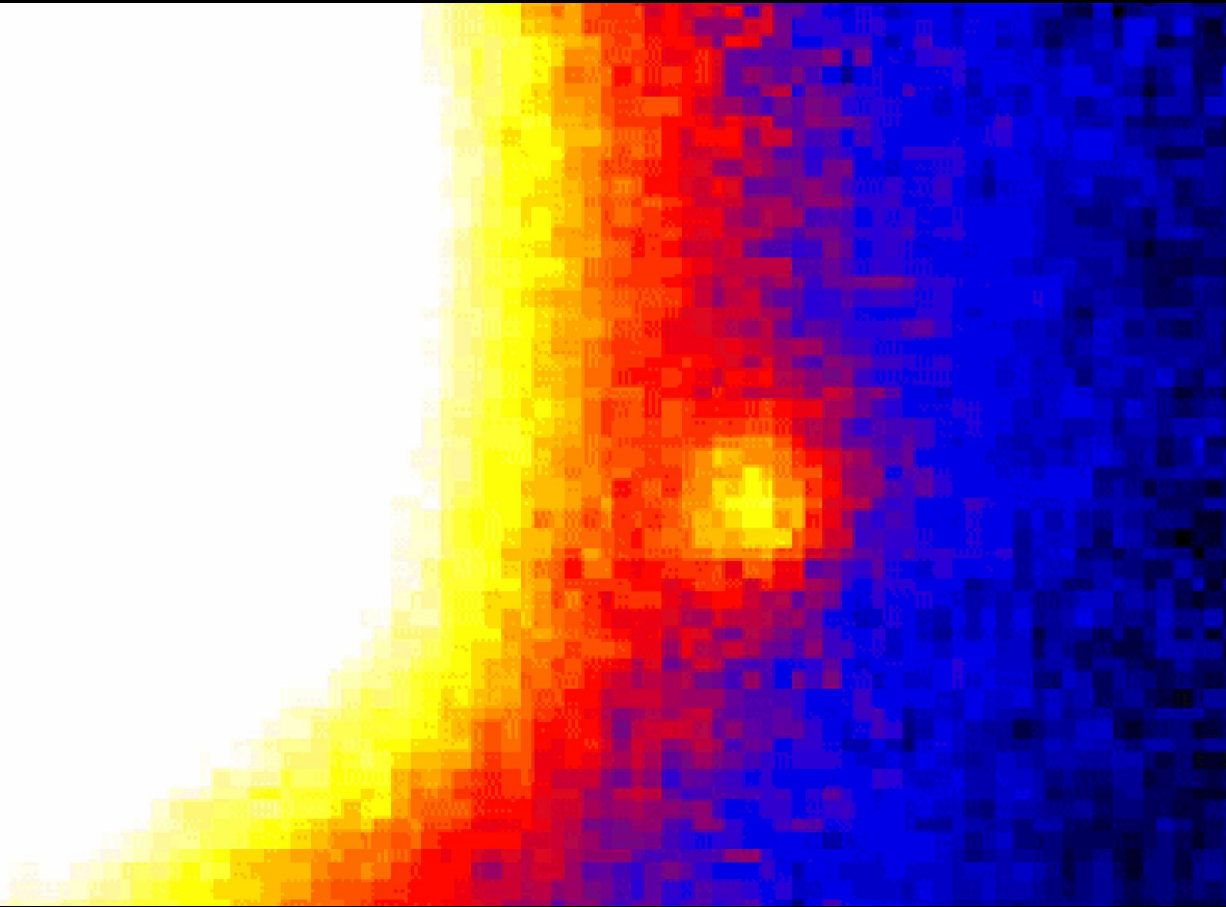


# Índice

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

# Casi-estrellas. Enana marrón

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



- 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:

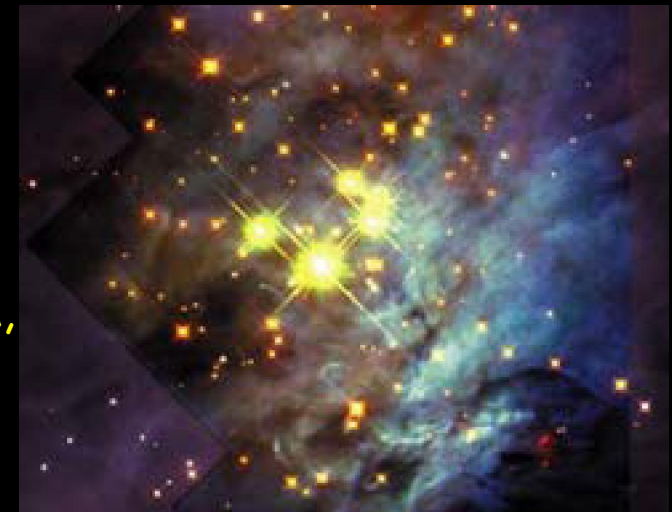
$$T \sim 3 \times 10^6 \text{ K}$$

$$\text{Masa} \sim 75 \text{ MJúpiter}$$

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

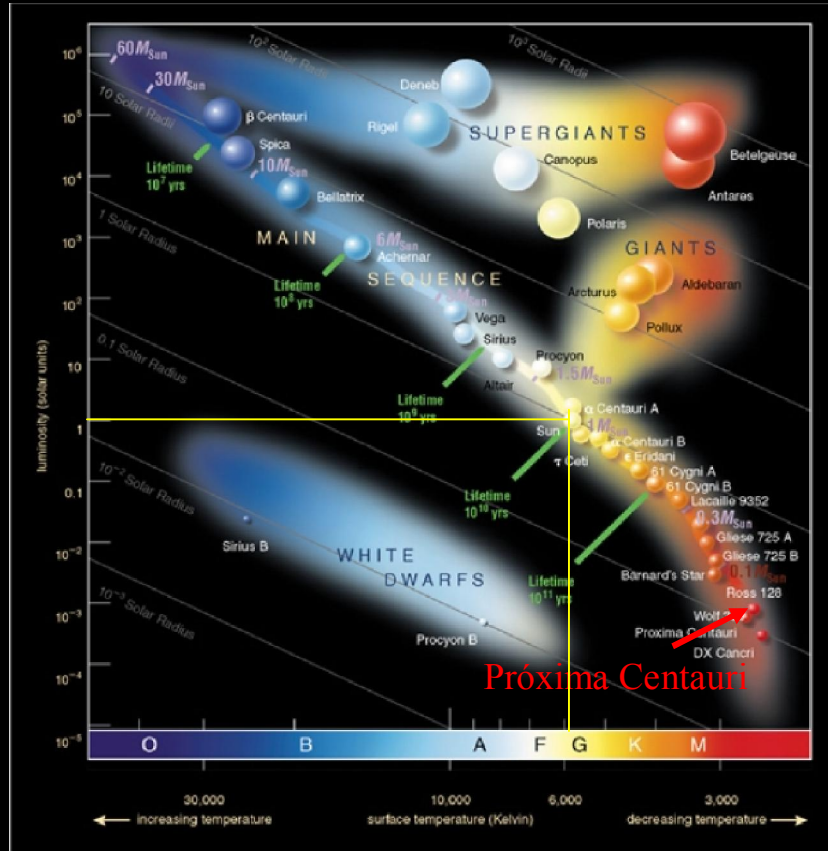
- No alcanzó la masa suficiente para ser estrella
- Emite energía en el infrarrojo por contracción gravitatoria, como Júpiter y Saturno, durante  $15 \times 10^6$  años.

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



# Estrellas pequeñas. Enana roja

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



## 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 0.8 $M_{\text{sol}}$ . 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  $14\,000 \times 10^6$  años en gastar su energía (más de la edad del Universo)

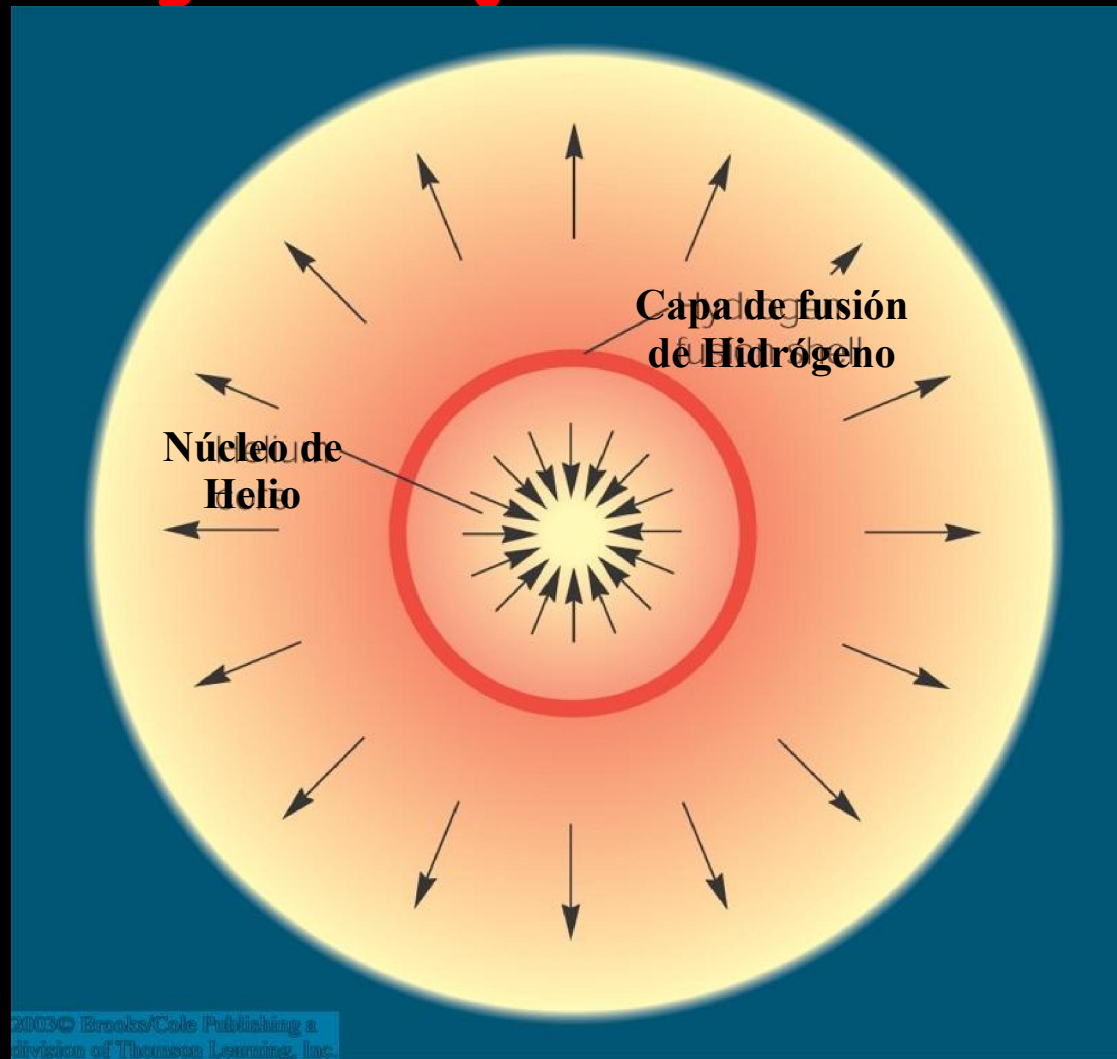
# Estrellas Medianas. El Sol



Sol (Soho)

- Son estrellas con masa entre 0.8 y 8  $M_{\text{sol}}$ . La fusión de H produce una presión que se contrarresta con la gravedad durante unos  $12\,000 \times 10^6$  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 colapsa, 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 => Gigante Roja

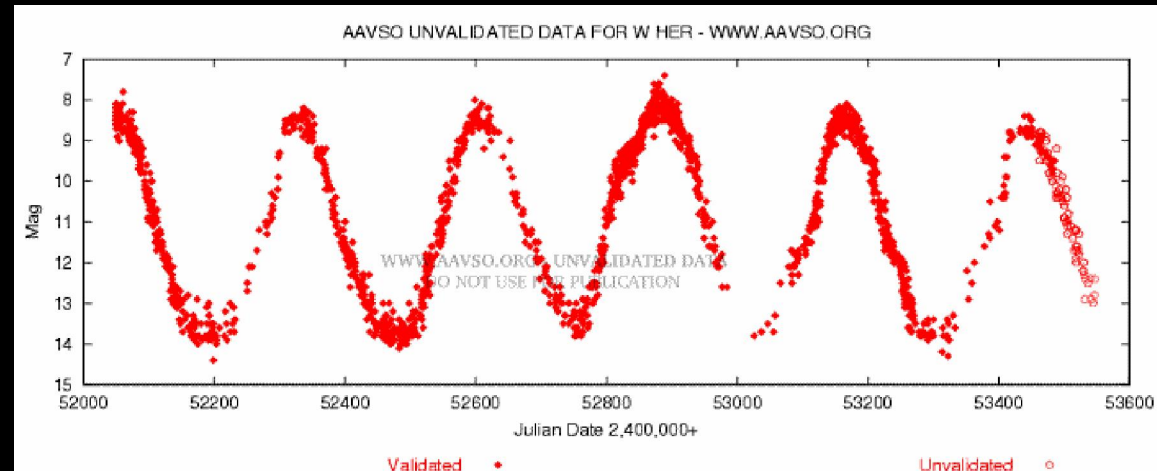
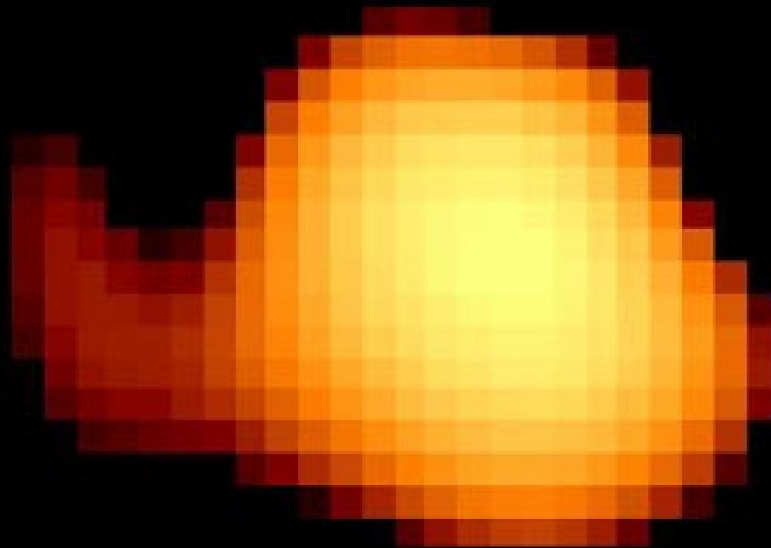
# Evolución de estrellas medianas. Expansión a Gigante Roja



- Cuando el H del núcleo se ha gastado completamente, la temperatura interior crece, produciéndose la fusión del Helio en el núcleo.
- Hidrógeno se fusiona alrededor del núcleo => expansión de las capas externas, que crecen y se enfrían. Lo que se denomina **Gigante Roja**

# Estrella mediana. Fase Mira

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.



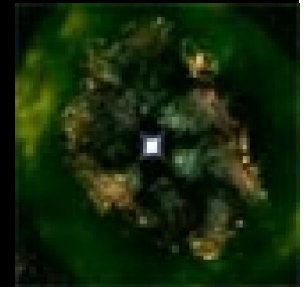
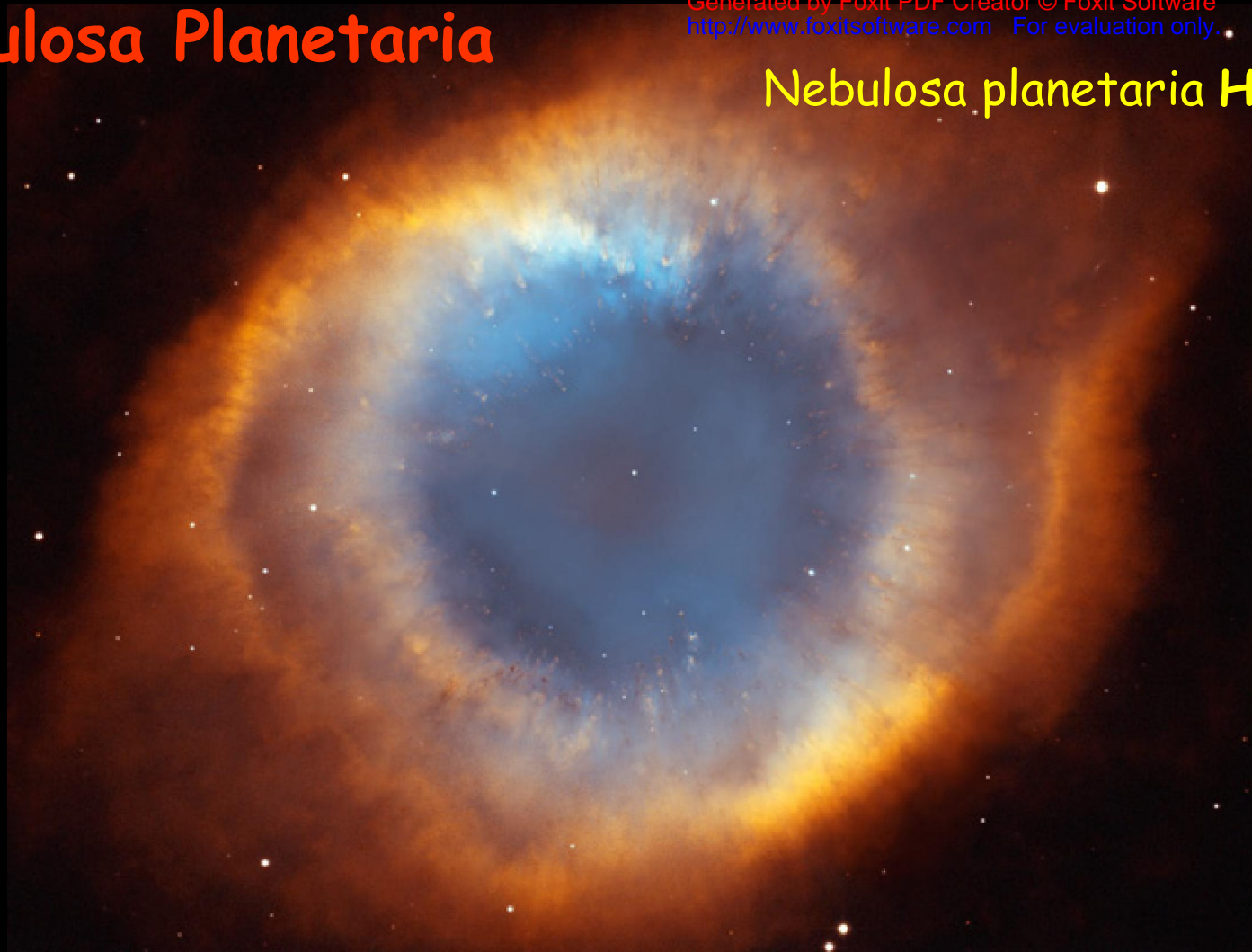
## Estrella Mira y curva de luz

- Las capas externas se expanden, la estrella evoluciona hacia **gigante roja**.
- El brillo aumenta (1 000 y 10 000), la temperatura baja (3000 ó 4 000 K), **enrojeciéndose**.
- La estrella puede pulsar, se expande y contrae cíclicamente. => el brillo cambia.
- Dentro de unos millones de años se transformará en nebulosa planetaria. Un fuerte viento expulsará las capas externas y dejando tan sólo un núcleo en el centro, la enana blanca.

# Nebulosa Planetaria

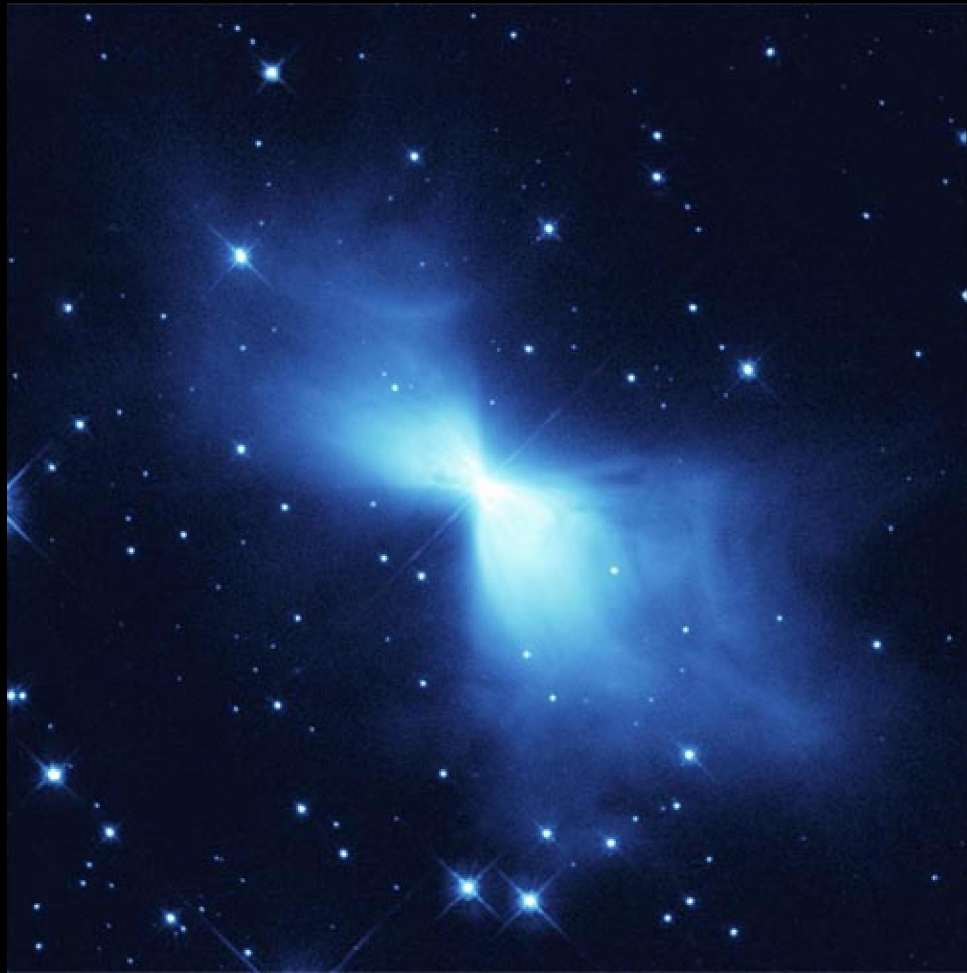
Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.

## Nebulosa planetaria Hélice (Hubble)



- El material eyectado forma un cascarón de gas, que se expande por el medio interestelar creando algunas de las imágenes más espectaculares...
- 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.

# Más planetarias...



↑ Protonebulosa planetaria "Boomerang"  
(antes de la fase de nebulosa planetaria)  
es el lugar más frío del universo



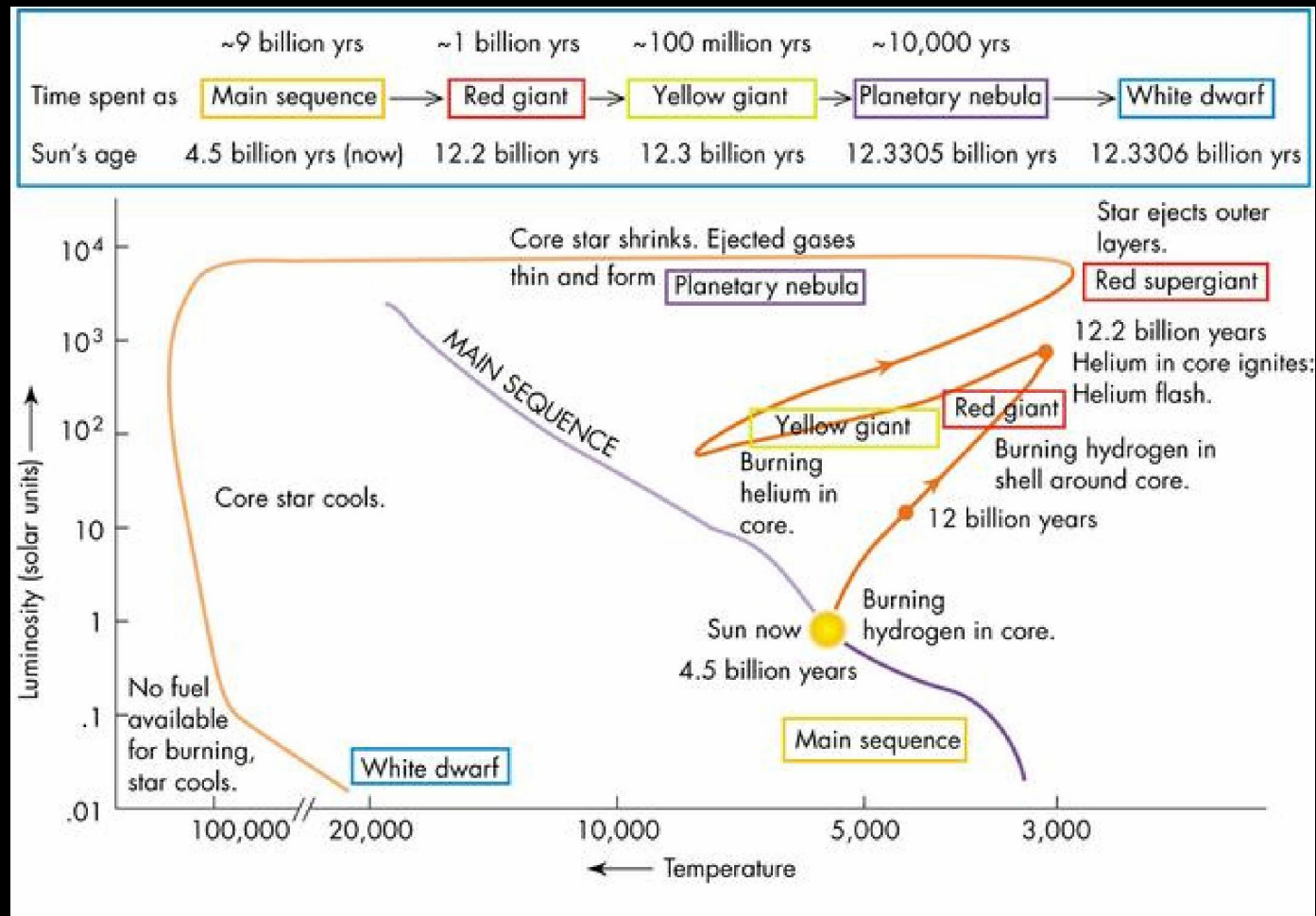
Nebulosa de "Saturno"  
al natural y con filtros  
de color.  
Casi, casi, casi ... tan  
bonita como el planeta



Nebulosa planetaria "Ojo de Gato" →



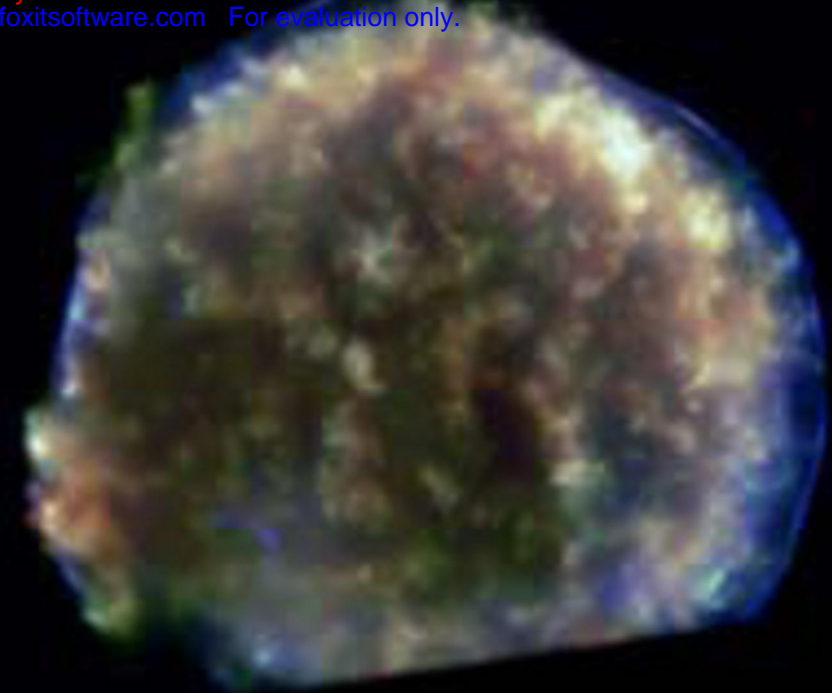
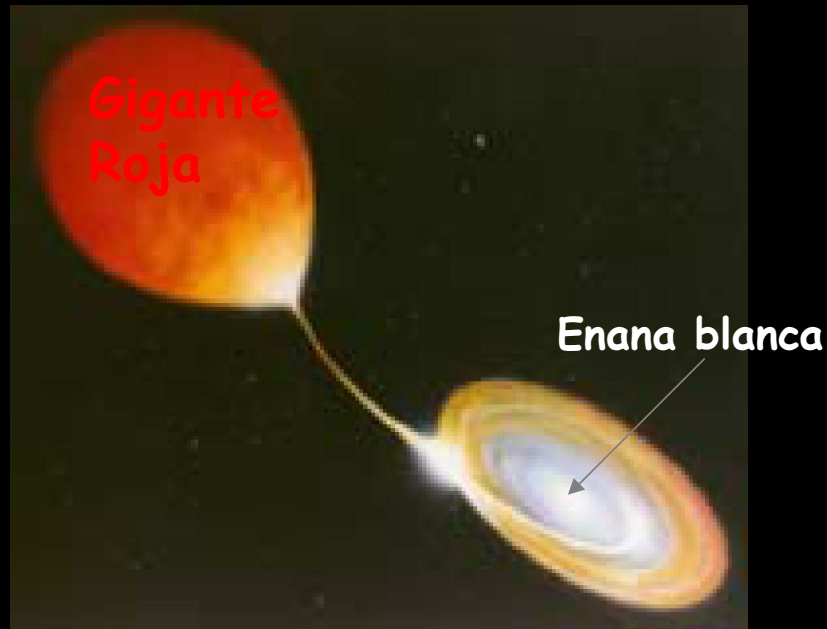
Fase	Edad (10 <sup>6</sup> años)
Nace	0
T-Tauri	10
Sec. Principal	100
Ahora	4 500
Sale sec. Prin.	12 000
Gig. Roja	12 200
Gig. Amarilla	12 300
Nebu. Planet	12 330
Enana blanca	12 330
Enana negra	24 000



Time spent as	~9 billion yrs	~1 billion yrs	~100 million yrs	~10,000 yrs
	Main sequence	Red giant	Yellow giant	Planetary nebula
Sun's age	4.5 billion yrs (now)	12.2 billion yrs	12.3 billion yrs	12.3305 billion yrs
				White dwarf
				12.3306 billion yrs

- Sol: tipo G en secuencia principal, temperatura superficial=5 800 K, luminosidad=1.
- Cuando gaste H del núcleo ⇒ la fusión para, el núcleo se contrae y quema He en el interior: **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.**
- Gaste enana blanca =>(dentro de 12 000 millones de años) pasará a ser una **enana negra**

# Sistema binario. Un camino alternativo.



Tycho, remanente de supernova (Chandra)

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

- 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  $\Rightarrow$  nebulosa planetaria  $\Rightarrow$  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 ( $M < 0.08M_{\text{Sol}}$ )
  - Pequeñas ( $M < 0.8 M_{\text{Sol}}$ )
  - Medianas ( $0.8 M_{\text{Sol}} < M < 8 M_{\text{Sol}}$  )
  - Grandes ( $M > 8M_{\text{Sol}}$ )



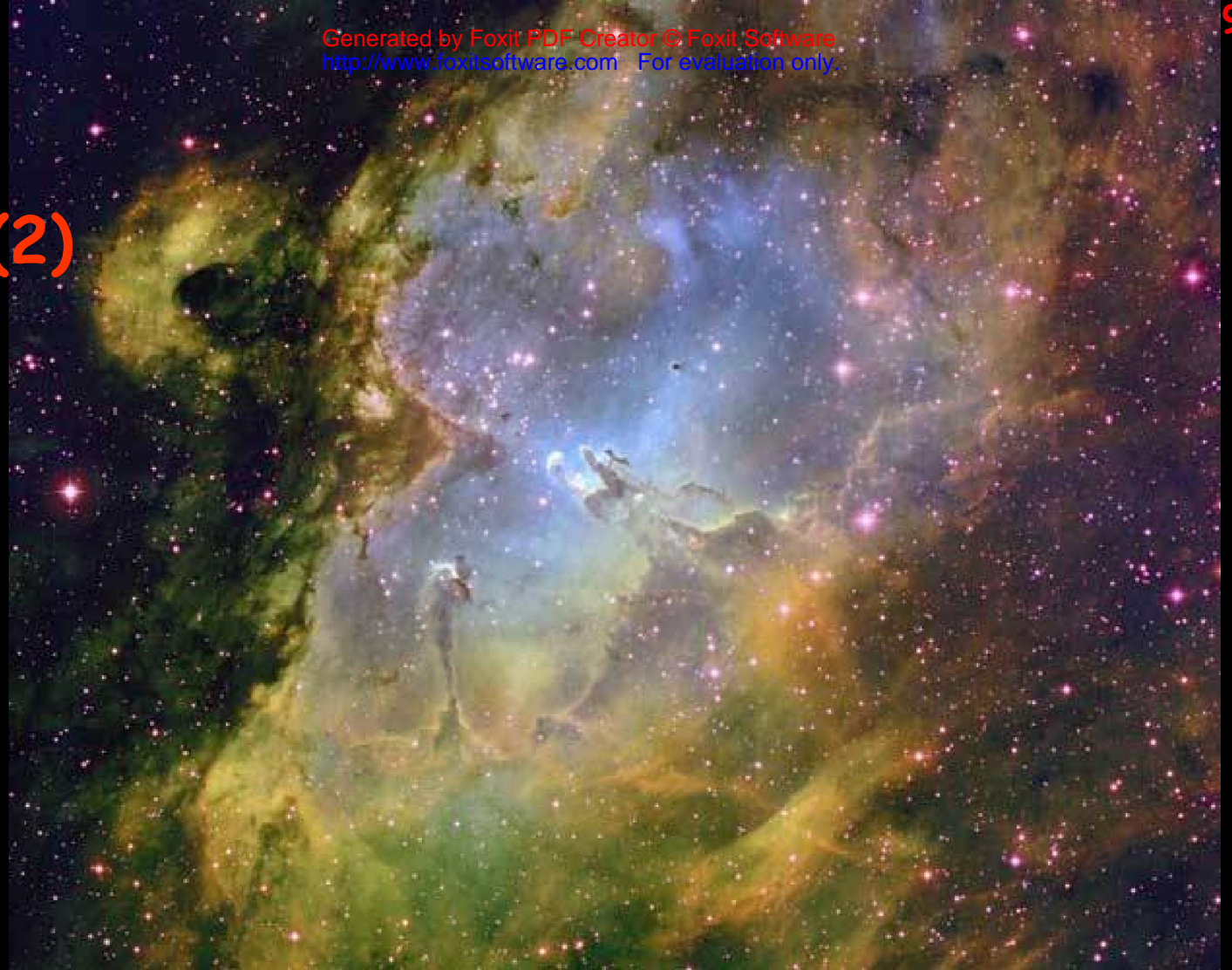
## Formación de estrellas masivas



**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.**

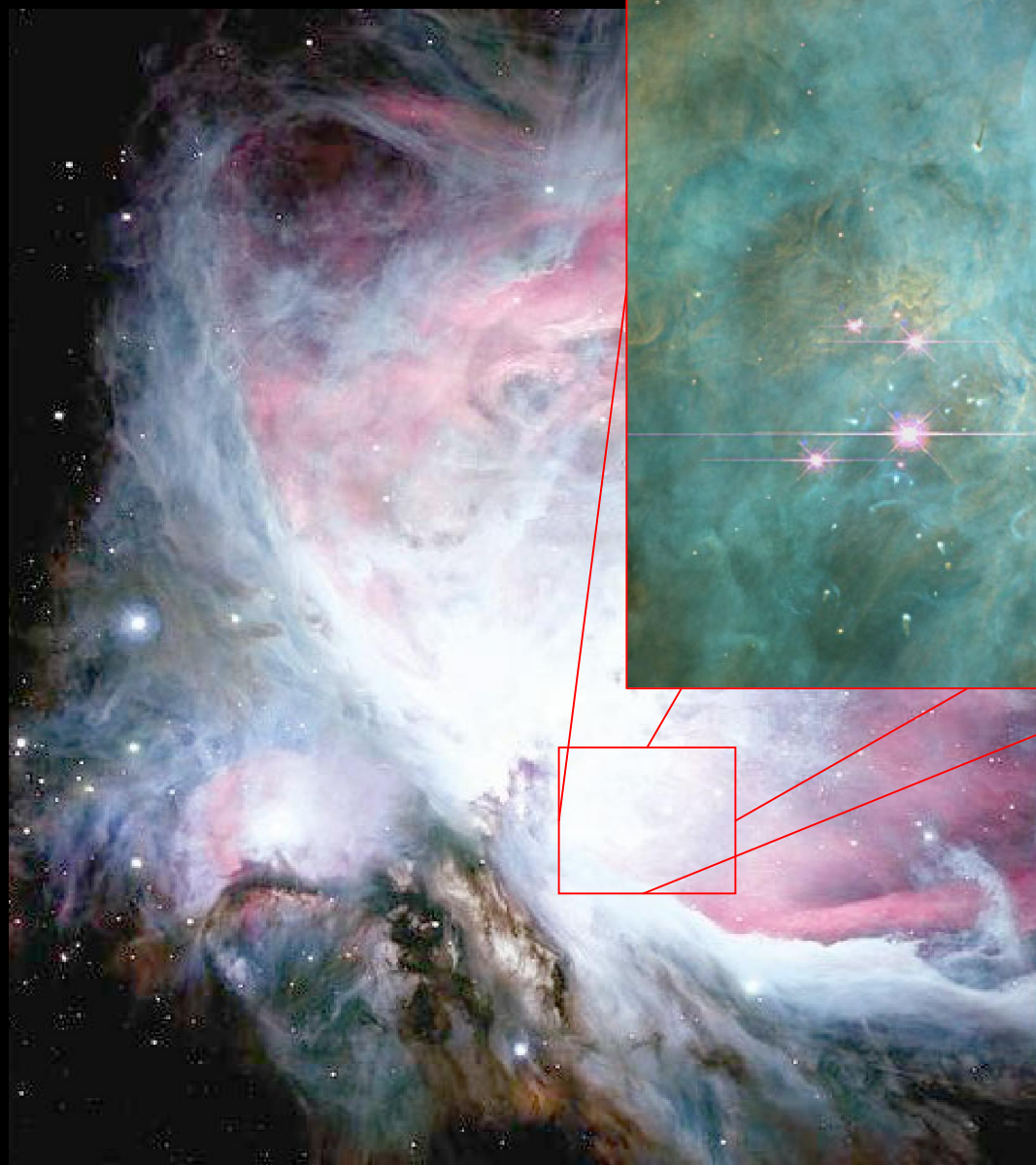
## Formación de estrellas masivas (2)



### Nebulosa del Ágila

- 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.
- Las estrellas masivas regulan la formación de estrellas a gran escala.
- Aceleran o detienen la formación con su radiación, viento y explosiones de supernova.
- Al formarse unas pocas su gran brillo y luminosidad calienta el gas, rompen las moléculas, las expulsan al exterior impidiendo que se formen más estrellas.

# Formación de estrellas masivas (3)

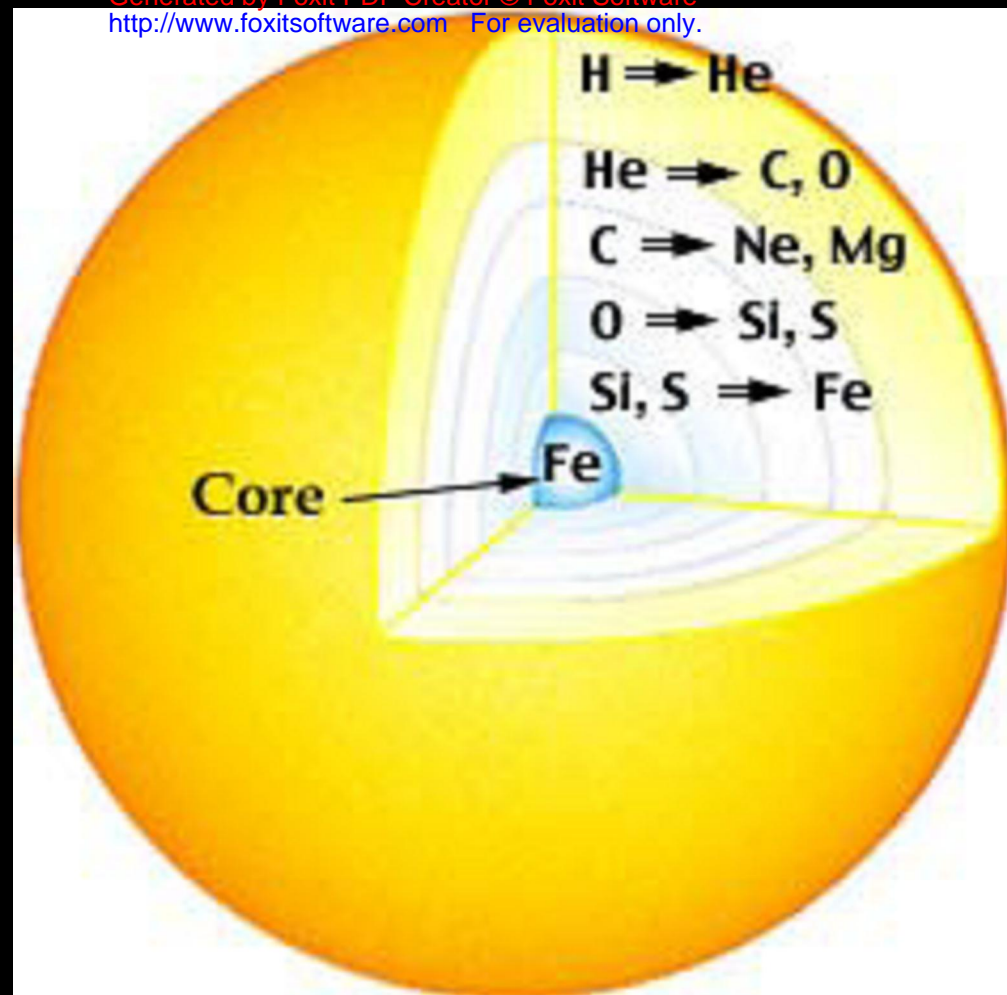


la  
xima.

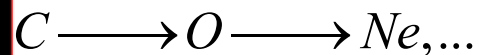


# Estructura interna

- Las estrellas grandes SI tienen masa suficiente para aumentar la temperatura y fundir elementos más pesados.
- Al igual que las jóvenes consumen:



- Tras consumir el He, consumen C



- 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  $^{57}\text{Fe}$

# Trágico final

Sher 25, la próxima supernova observable



- El núcleo de Fe crece conforme la estrella evoluciona.
- Si la masa del núcleo alcanza  $1.4M_{\text{sol}}$ , 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  $8\,000\text{ km}$  a  $19\text{ km}$ .
- La energía del proceso es inmensa (más que 100 soles durante toda su vida).
- La energía es emitida en neutrinos (invisibles) y en una explosión de supernova.



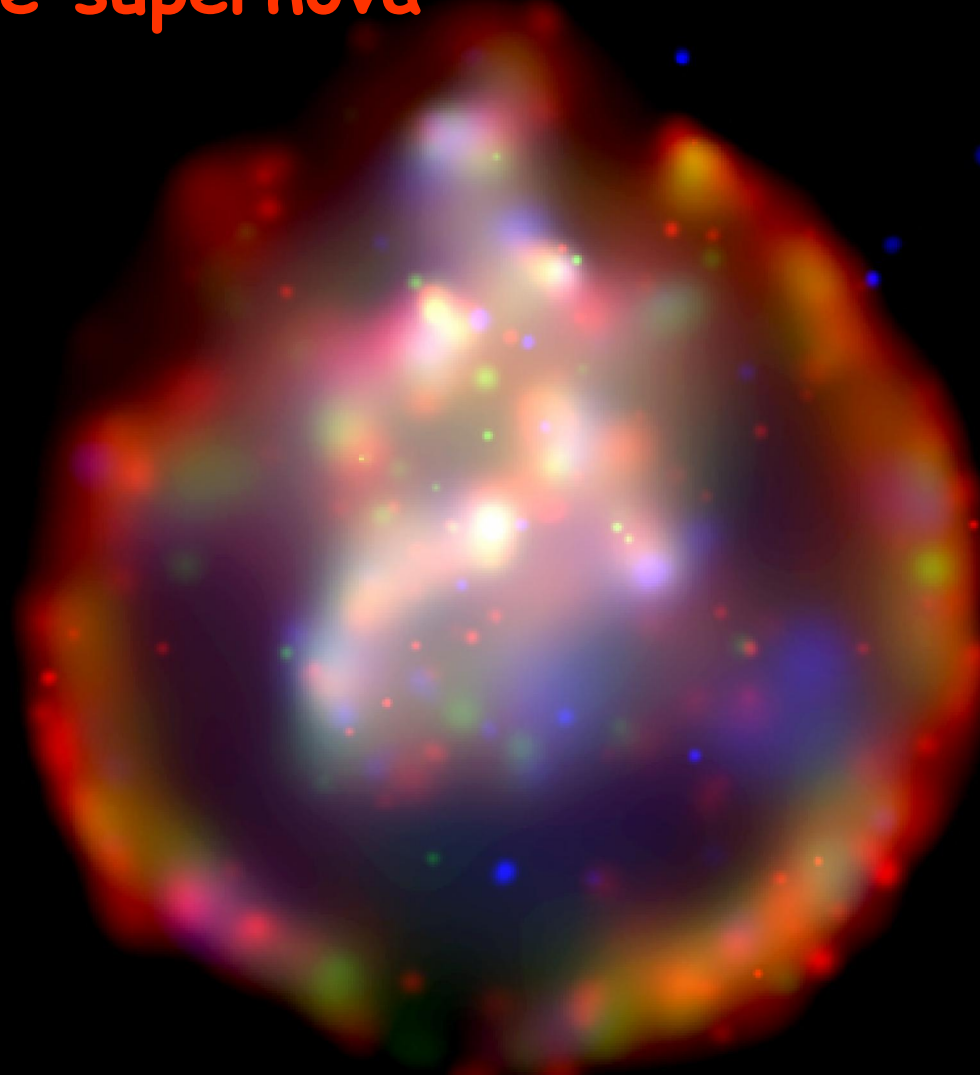
## Trágico final (2)



- **SN1987A**, en Gran Nube de Magallanes, la primera supernova "moderna" estudiada
- Se observa coronas de material expandiéndose por el medio interestelar

- El núcleo colapsa tan rápidamente que supera la posición de equilibrio, rebota y colisiona con las partes externas de la estrella que están contrayéndose.
- Se genera una onda de choque que se propaga hacia la superficie. En el interior se producen elementos más pesados que el hierro.
- En la superficie la onda de choque produce una luminosidad de  $1\,000 \times 10^6$  soles durante uno o dos días.

# Remanente de supernova

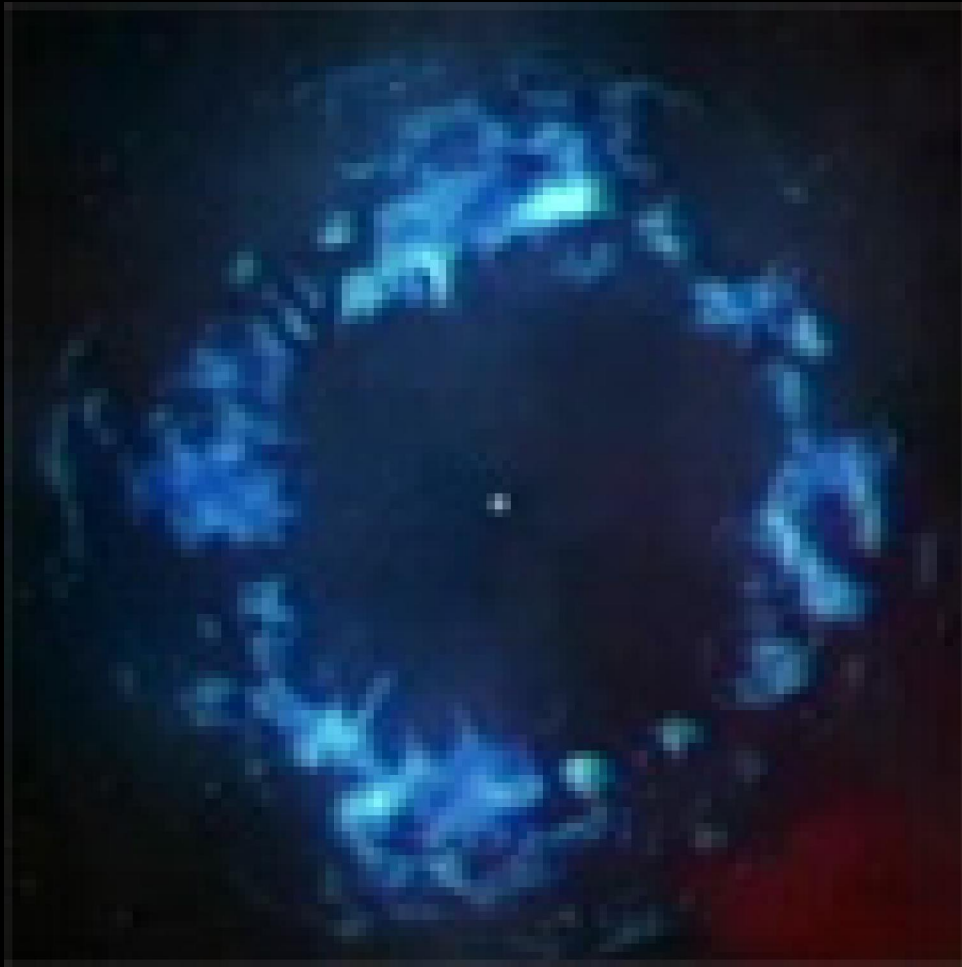


**SNR 0103-72.b**

- 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)

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
http://www.foxitsoftware.com For evaluation only.



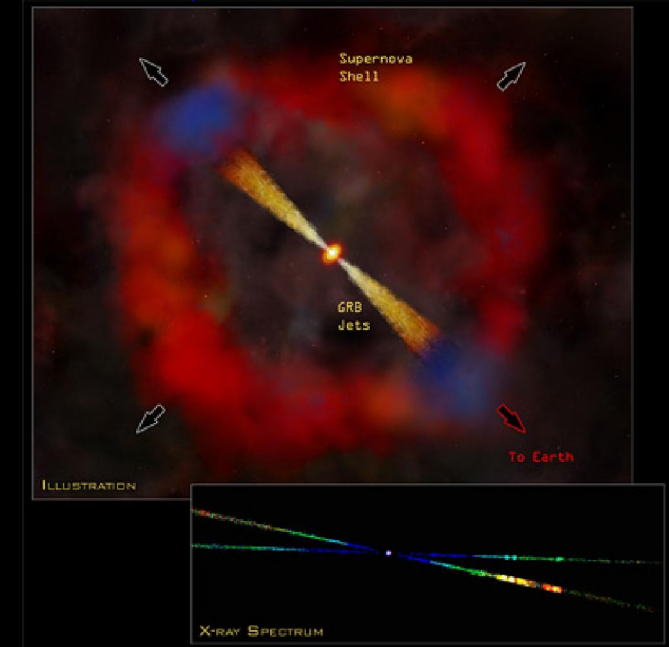
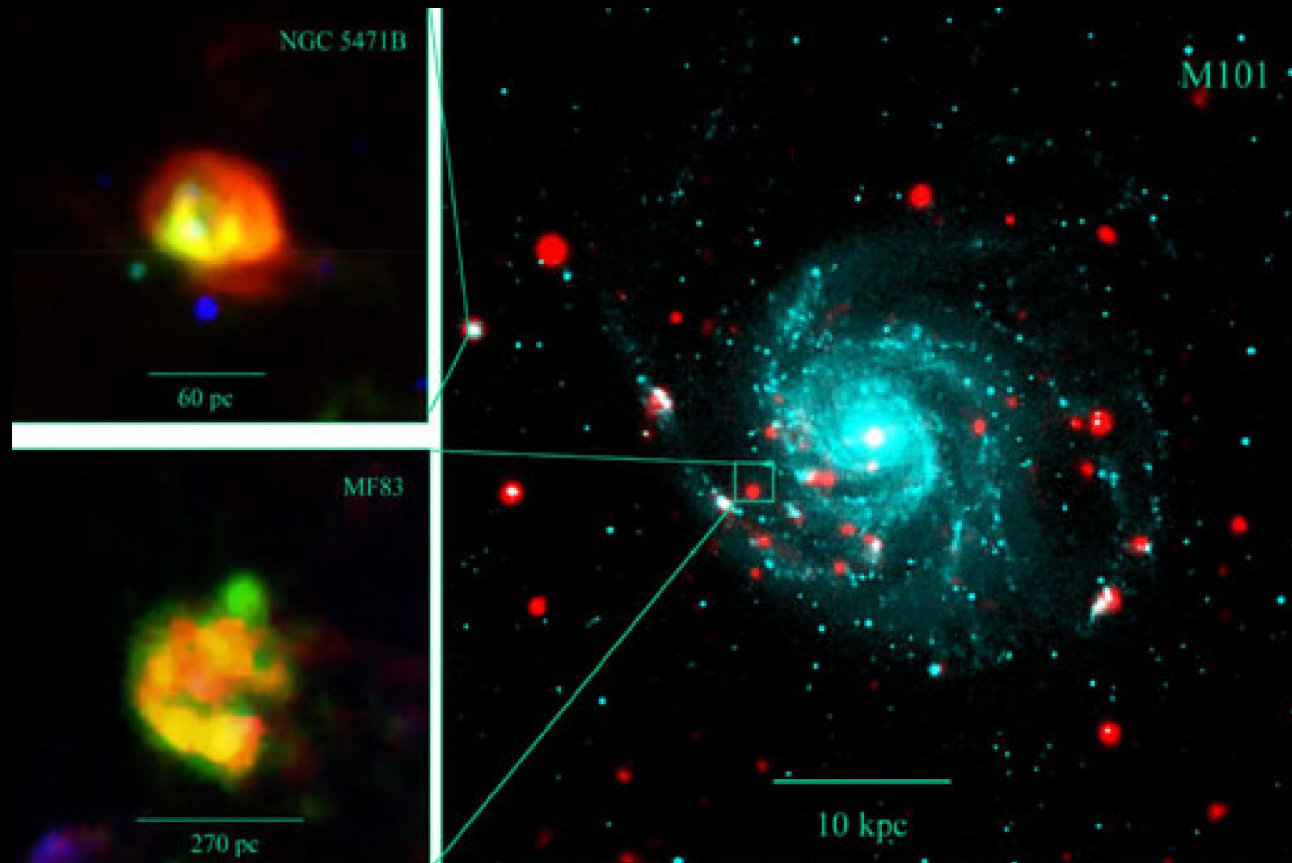
Remanente de Supernova del Velo.

## Remanente de Supernova de Kepler

- 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

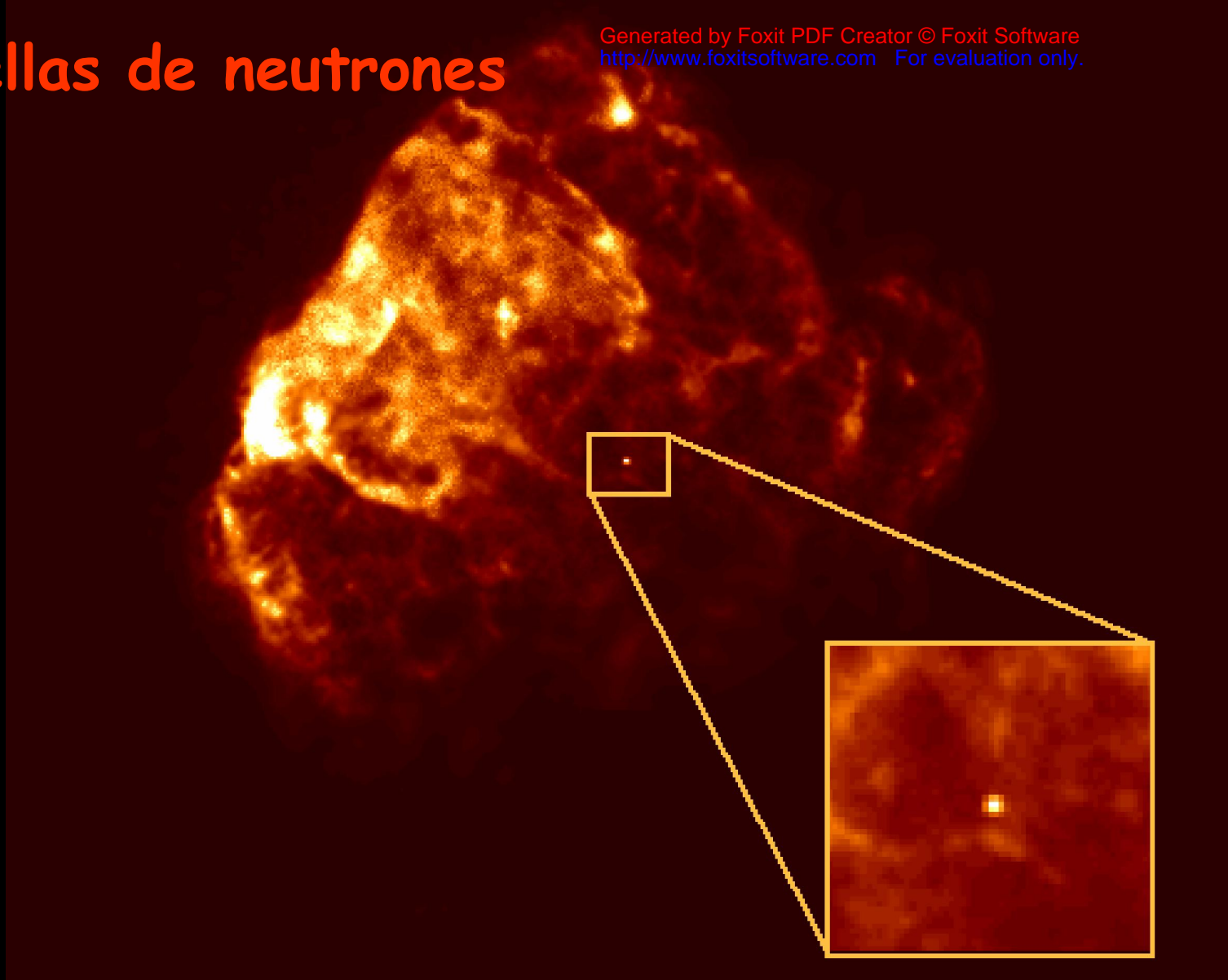
# Estallidos de rayos -gamma

Generated by Foxit PDF Creator © Foxit Software  
<http://www.foxitsoftware.com> For evaluation only.

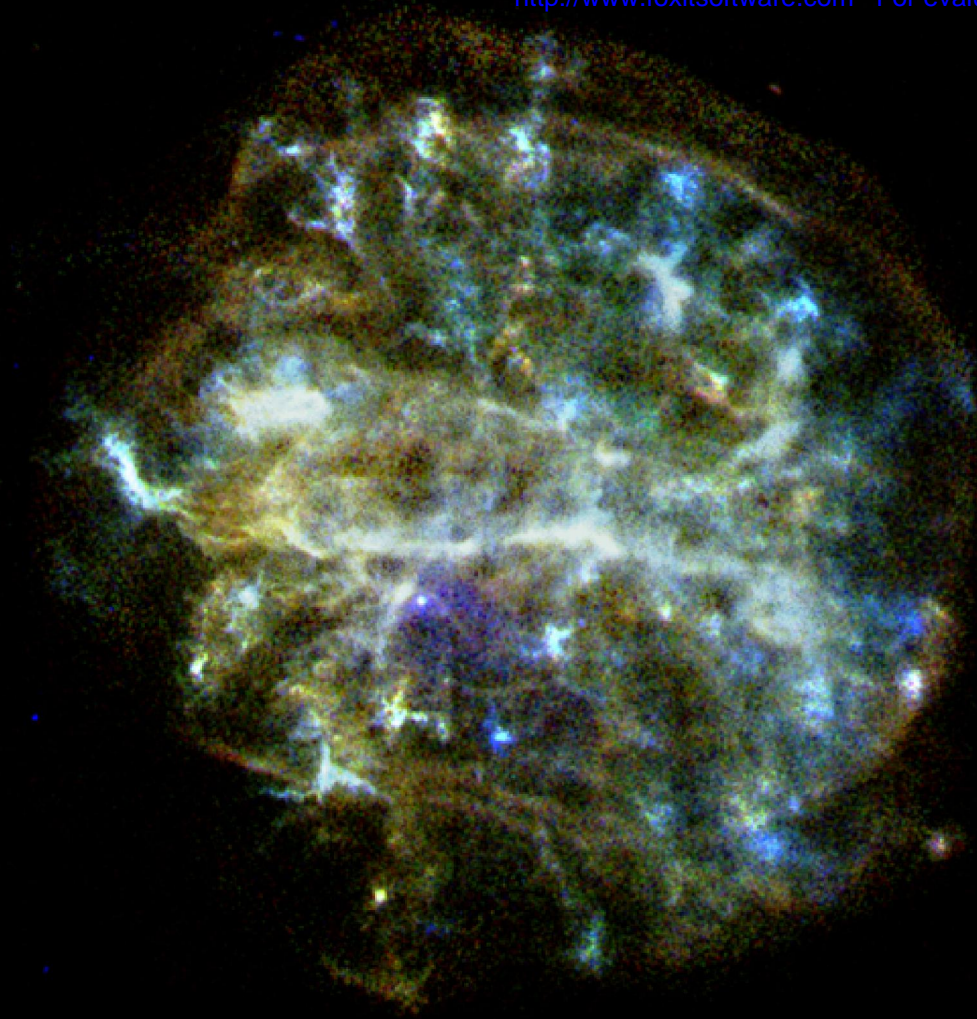


- Los estallidos de rayos gamma son una de las explosiones más energéticas y luminosas del Universo. La energía liberada en un segundo es mayor que la del Sol en toda su vida
- Únicamente observables desde el espacio, duran entre milisegundos y unos minutos y se pueden producir en cualquier dirección 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

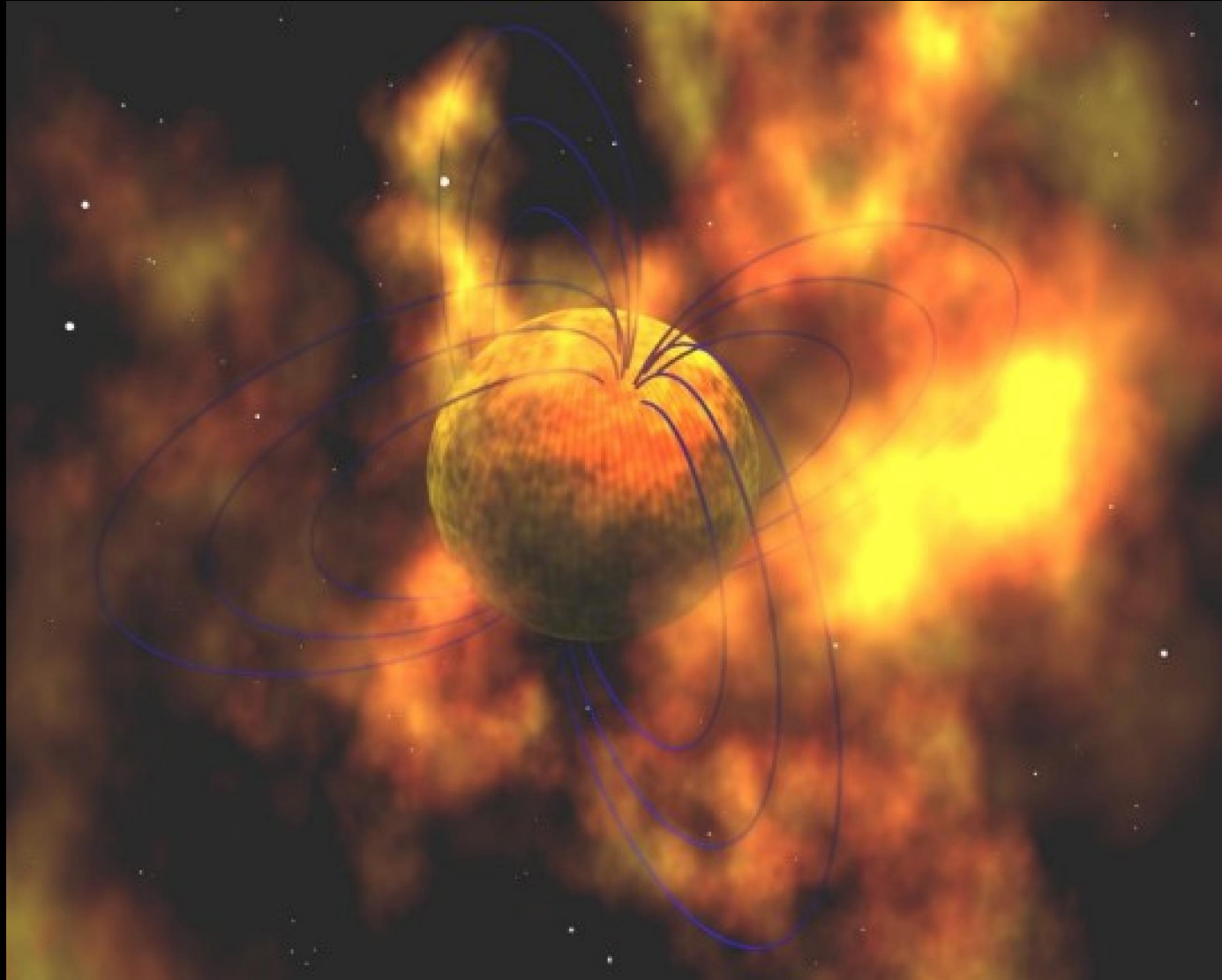


- Las estrellas de neutrones se producen cuando la masa es  $> 8M_{\text{sol}}$  y la masa del núcleo está entre 1.4 y 2.5  $M_{\text{sol}}$ .
- El colapso del núcleo es tan masivo que los electrones son empujados al núcleo, se recombinan con protones formando neutrones.
- Las estrellas de neutrones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



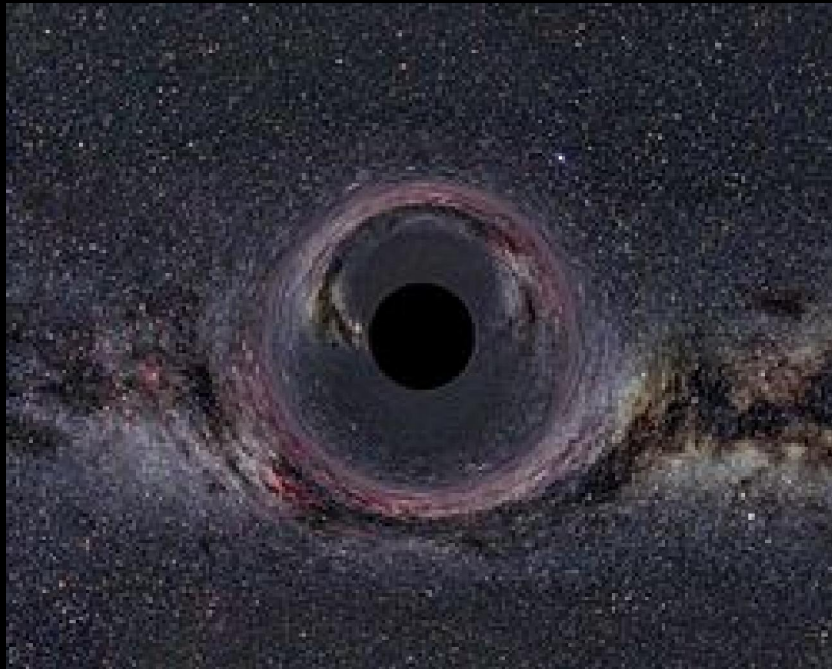
- Púlsares son estrellas de neutrones girando y que emiten chorros de partículas a la velocidad de la luz por los polos magnéticos.
- Como en la Tierra, los polos magnéticos y de rotación pueden no estar alineados. Los chorros de partículas rotan con la estrella, como los haces de luz de un faro.
- El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

# Magnetoestrellas



- Son estrellas de neutrones con campos magnéticos ingentes,  $100 \times 10^{12}$  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  $> 3 \text{ Msol}$ , la presión por degeneración de neutrones no puede frenar la fuerza de gravedad y la estrella colapsa.
- Los neutrones son estrujados unos con otros creciendo exponencialmente la fuerza de gravedad.
- **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.





- 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

