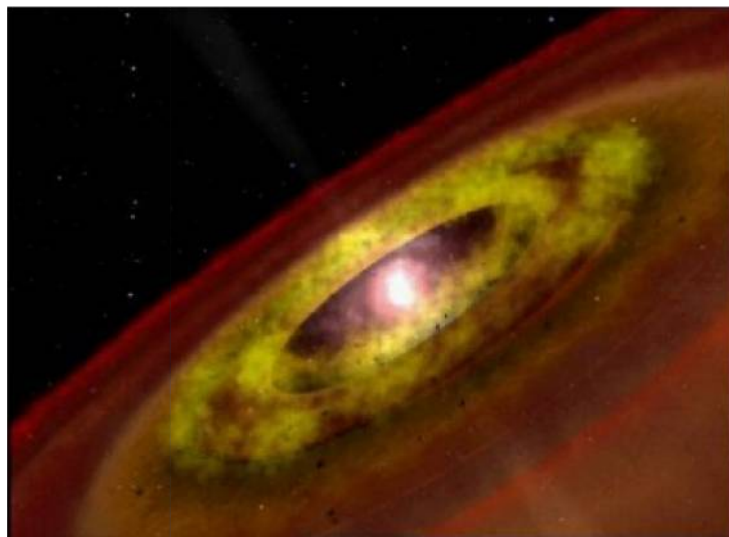


Estrellas T Tauri

Lic. Maria Victoria del Valle

Introducción

Las estrellas se forman a partir de material interestelar que se condensa por efectos gravitatorios; se forman en grupos, en regiones de formación estelar. Las estrellas pueden clasificarse, a grandes rasgos, en dos amplias clases: estrellas de gran masa ($M \geq 8 M_{\text{sol}}^{(1)}$) y estrellas de baja masa ($M \leq 8 M_{\text{sol}}$); bajo esta clasificación el sol es una estrella de baja masa. La evolución y la formación de las estrellas dependen fuertemente de su masa.



Cuando una estrella no es lo suficientemente densa su núcleo no tiene la temperatura necesaria para quemar hidrógeno eficientemente. A las estrellas que queman eficientemente hidrógeno en su núcleo se las llama estrellas de Secuencia Principal (Ver *Figura 2*); El sol es una estrella de Secuencia Principal. Las estrellas de baja masa deben atravesar varios estadios evolutivos desde su formación hasta alcanzar un estado como el del sol actual. Antes de ser una estrella de Secuencia Principal las estrellas como el sol son estrellas T Tauri⁽²⁾. Es decir que las estrellas T Tauri son estrellas de baja masa en sus estadios tempranos de evolución.

Las estrellas T Tauri se encuentran en las llamadas regiones de formación estelar, rodeadas de gas y polvo. La *Figura 1* muestra algunas regiones de formación estelar donde se encuentran estrellas T Tauri.

Estas estrellas son de especial interés ya que están rodeadas de discos protoplanetarios, donde se cree que se forman los planetas de los sistemas solares similares al nuestro.

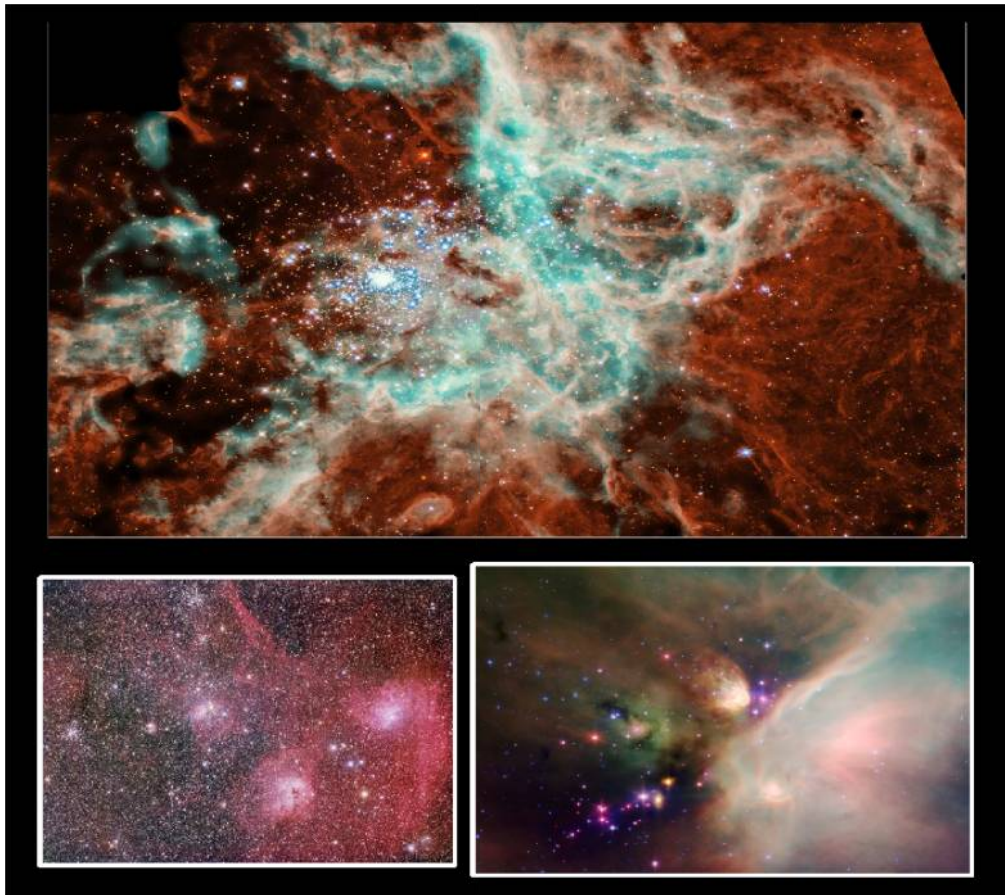


Figura 1: Regiones de Formación estelar: **arriba:** 30 Doradus, en la galaxía Nube Mayor de Magallanes. Imagen tomada con el HST (Telescopio Espacial Hubble). Crédito: NASA, N. Walborn (STScI), J. Maíz-Apellániz (SRScI), and R.Barbá (La Plata Observatory, Argentina). **Abajo derecha:** Nube oscura de Rho Ophiuchi imagen del satélite de la NASA *Spitzer Space Telescope*. Esta es una de la regiones de formación estelar más cercana. Esta ubicada cerca de la constelación de Scorpius y de Ophiuchus; la nebulosa se encuentra a aproximadamente 407 años luz³ de la Tierra. Crédito: NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. **Abajo izquierda:** Imagen en 385 mm de las nubes de Taurus-Auriga. Estas nubes constituyen una de las regiones de formación estelar mejor estudiadas y más cercanas. Las nubes contienen muchas nebulosas, estrellas jóvenes y algunas estrellas muy masivas (tipos O o B). Estas nubes son un lugar excelente para estudiar la formación de estrellas de baja masa.

Características

Las estrellas T Tauri son estrellas de tipo solar en estado evolutivo temprano, es decir que son estrellas de pre Secuencia Principal . Por lo tanto son estrellas jóvenes, aún en el proceso de contracción gravitatoria, evolucionando hacia la Secuencia Principal (ver *Figura 2*).

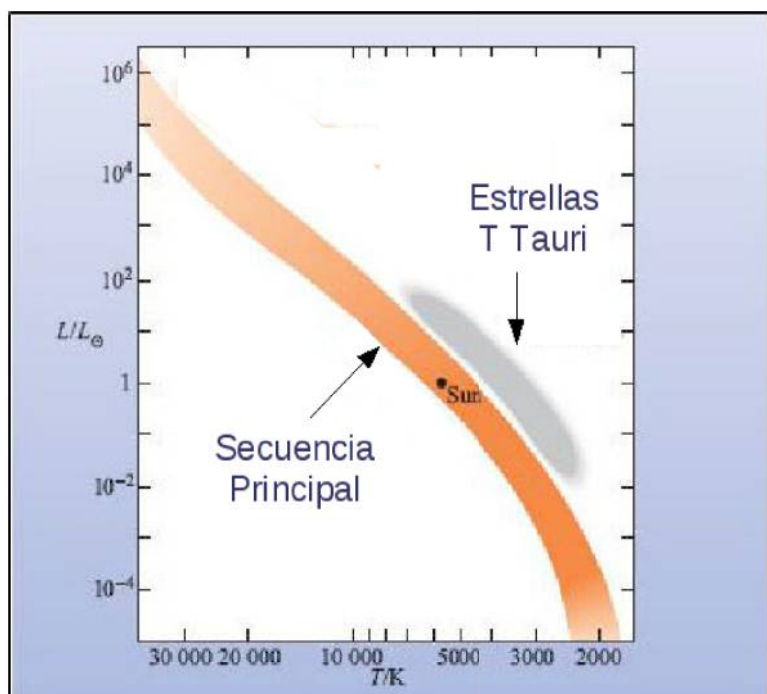
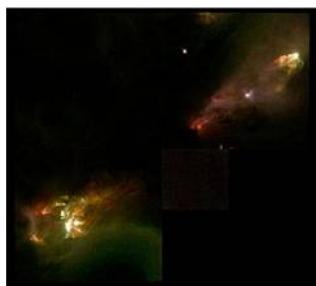


Figura 2: Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR). Las estrellas que comparten características físicas se agrupan en regiones específicas en el diagrama HR. La posición que ocupan las estrellas en este diagrama permite establecer, a grandes rasgos, sus propiedades fundamentales. El eje de las abscisas indica temperatura y el eje de las ordenadas luminosidad (potencia). Sobre la Secuencia Principal se ubican las estrellas que queman hidrógeno en su núcleo, como el sol. Las estrellas T Tauri se ubican por encima de esta franja, es decir que poseen mayor luminosidad a una misma temperatura.

Las estrellas se forman a partir del material interestelar abundante en las regiones de formación estelar. Una nube de gas se torna inestable y comienza a colapsar gravitacionalmente debido a su propia masa. A medida que se contrae se forma un núcleo cada vez más denso, opaco a la radiación. Como la radiación no puede escapar del núcleo, dado que es opaco, el núcleo se calienta. Mientras tanto el material circundante sigue cayendo gravitatoriamente, y como el núcleo está rotando se forma un disco de acreción⁽⁴⁾ en torno a él. El material que es acretado calienta la superficie del núcleo y se forma la protoestrella.



El disco de acreción emite radiación en el infrarrojo producida cuando es iluminado y calentado por la radiación de la estrella central. El material acretado en el disco rota a distintas velocidades y el roce entre capas de distinta velocidad produce que el material se caliente y que emita radiación en el ultravioleta.

En estas fuentes se producen flujos bipolares de materia altamente colimados o *jets*. Si bien se cree que el campo magnético que conecta el disco con la estrella juega un rol determinante en la formación y colimación de estos *jets*, el mecanismo que los forma continúa

siendo un tema de investigación. Estos sistemas poseen variabilidad a escalas de tiempo relativamente cortas, como muestra la *Figura 3*.

A medida que la protoestrella se contrae la acreción del material continúa. Antes de que la quema del hidrógeno comience en el núcleo como principal fuente de energía, se desarrolla un fuerte viento estelar. Eventualmente, una cantidad suficiente del material circumestelar se ha acretado o se ha dispersado por la acción de los *jets* y del viento estelar, y la estrella se torna visible en el óptico⁽⁵⁾. Estas estrellas poseen una abundancia alta de Litio, lo cual da cuentas de su juventud, ya que el Litio es una de los elementos que más rápidamente se quema en el interior de las estrellas. Esto último se debe a que necesita una temperatura relativamente baja para fusionarse.

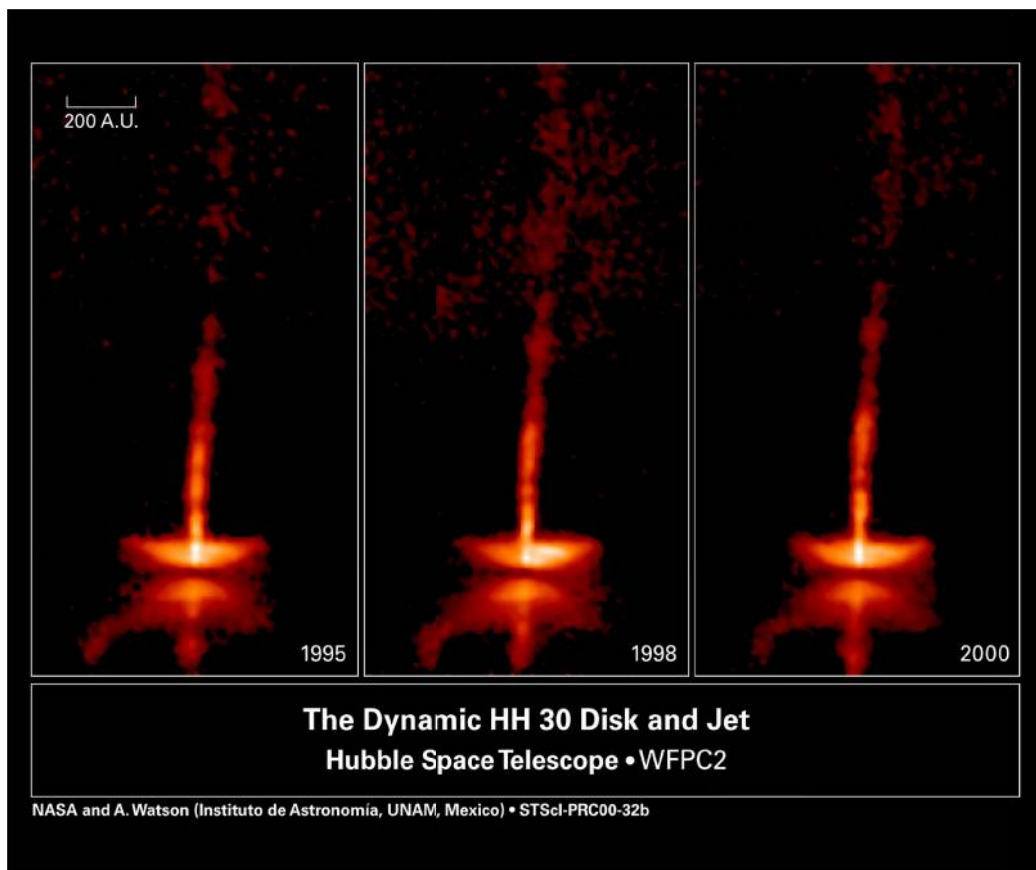


Figura 3: Imágenes de la fuente HH 30. Las imágenes muestran cambios en un período de solo cinco años en el disco y en los *jets* de esta protoestrella. Este objeto tiene una edad de medio millón de años. Las imágenes han sido tomadas entre los años 1995 y 2000 con el HST (*Hubble Space Telescope*). El disco es de especial importancia porque probablemente es similar al disco del cual se formaron el sol y los planetas del sistema solar. Crédito: NASA, Alan Watson (Universidad Nacional Autónoma de México), Karl Stapelfeldt (Jet Propulsion Laboratory), John Krist and Chris Burrows (European Space Agency/ Space Telescope Science Institute).

Las estrellas T Tauri emiten poderosamente en rayos X. Actualmente las teorías indican que existen dos componentes distintas de esta emisión. Una componente corresponde a un gas a muy alta temperatura. Esta emisión está altamente relacionada con los campos magnéticos que existen en la fuente, y es variable en forma de fulguraciones. Los procesos físicos que producen estas fulguraciones son de naturaleza similar a las observadas en el sol, pero a mayor escala. La otra componente, la componente en rayos X blandos (i.e. menos energéticos), se cree que es producida por un material más denso. Este material produce *shocks* que se forman por el impacto del material acretado con la superficie de la estrella.

Clasificación y evolución

Existen dos grandes tipos de estrellas T Tauri de acuerdo a su estado evolutivo; esta clasificación está basada en las características espectroscópicas de sus discos: las estrellas T Tauri clásicas (CTT) y las estrellas T Tauri de líneas débiles (WTT). Las CTTs tienen discos extensos y su espectro presenta líneas intensas. Las WTTs están rodeadas por un disco que es muy débil o que casi no existe y su espectro es simple.

Las estrellas T Tauri también están clasificadas en clases, muy emparentadas con las características de sus discos. La luz visible es absorbida por el gas y el polvo. Debido a que los objetos protoestelares están embebidos en su nube parental no son visibles en el óptico. La luz infraroja-milimétrica no es absorbida por el material presente en estos sistemas. Por lo tanto, estas clases están agrupadas de acuerdo a las propiedades de la emisión observada en el infrarojo-milimétrico.

Las fases evolutivas de los objetos estelares jóvenes se clasifican en las siguientes clases, según sus distribuciones espectrales de energía en el infrarojo-milímetro:

- Fuentes infrarojas-milimétricas de **Clase 0**. Son protoestrellas con envolturas masivas, frías que colapsan en torno a las regiones centrales. Dentro de la envoltura se forman rápidamente flujos bipolares de material colimado y un disco. La edad de las fuentes de Clase 0 es de aproximadamente 10.000 años.
- Las fuentes de **Clase I** tienen edades de aproximadamente 100.000 años. La mayor parte del material de la envoltura se ha acretado al disco y este está más extendido. La actividad de flujos bipolares todavía está presente pero posee ángulos de apertura mayores.
- **Clase II** es la designación en el infrarojo de las CTTs. La mayor parte de su compleja fenomenología puede modelarse como una estrella interactuando con un disco de acreción circumestelar. La emisión en el infrarojo se debe a la absorción y re-emisión térmica del disco. La acreción produce fricción entre anillos de distinta velocidad en el disco y lo calienta, provocando también emisión térmica. Los miembros más jóvenes de esta clase tienen *jets*, y todos poseen vientos fuertes. Sus edades varían entre 0.5 y 3 millones de años, aunque algunas estrellas mantienen características de CTT hasta aproximadamente 20.000.000 años.

- Las fuentes infrarrojas de **Clase III** o WTTs, tienen espectros simples, lo cual implica que hay un disco de acreción muy ténue o que ya no existe. Muchas WTTs ocupan la misma región en el diagrama HR que las CTTs. Una vez que el disco ha desaparecido (su gas y polvo se ha eyectado del sistema ya sea por el viento estelar, por inestabilidades dinámicas y/o ha sido incorporado a protoplanetas) y los *jets* han cesado, queda una estrella T Tauri “desnuda”.

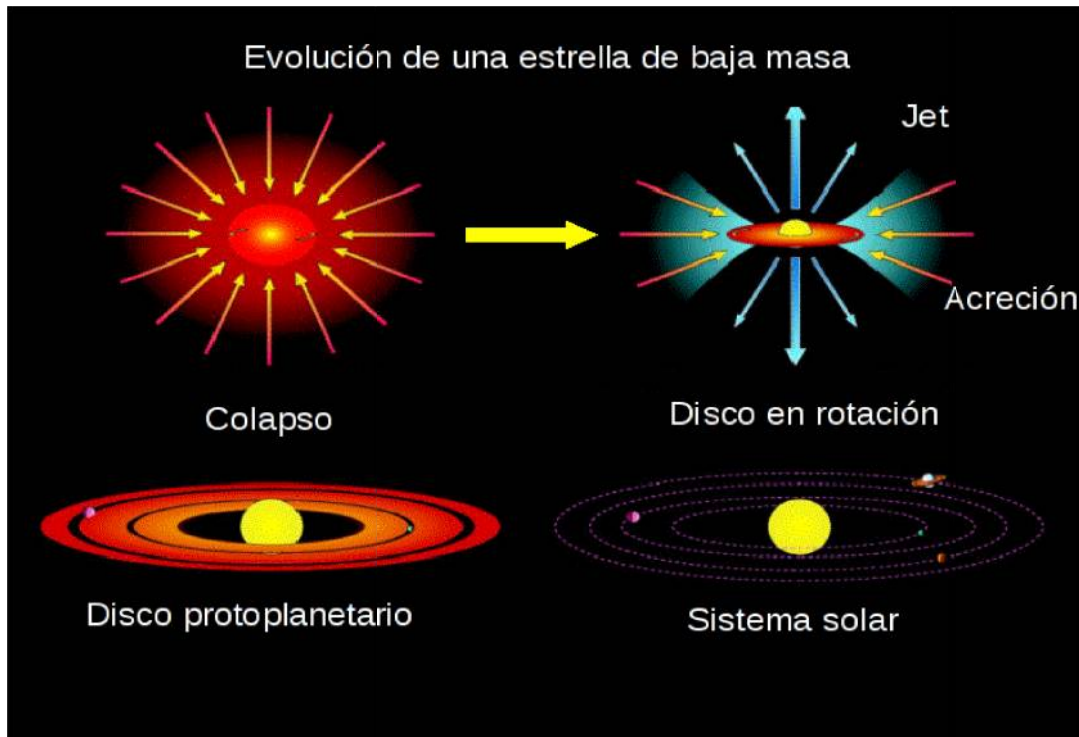


Figura 4: Esquema del nacimiento de estrellas de baja masa. **Arriba izquierda** núcleos de nubes oscuras, de aproximadamente 1 pc de tamaño (~ 200.000 veces la distancia Tierra-sol), gradualmente se contraen y comienza el colapso de adentro hacia afuera a $t = 0$. **Arriba derecha** durante ~10.000 a 100.000 años las protoestrellas transitan una fase de alta acreción y de flujos supersónicos salientes. **Abajo izquierda** gradualmente se barre o acreta el material, dejando solo la estrella joven T Tauri y un disco residual protoplanetario, que en escalas de tiempo de 1-10 millones de años, conlleva a la formación de sistemas planetarios. **Abajo derecha** sistema planetario completamente formado. Crédito: Mark McCaughrean, Astrophysikalisches Institut Potsdam.

La pérdida del disco entre las fases Clase II–III es acompañada por la formación de planetas. Se estima que cerca de un tercio de las CTTs tienen discos suficientemente masivos como para producir una nebulosa similar a la nebulosa de la cual se formó el sistema solar. Tales discos se observan con el HST (ver Figuras 6 y 7).

Discos protoplanetarios

Algunos discos protoplanetarios tienen masas de 0.01 a 0.1 masas solares, más de 10 veces la masa necesaria para evolucionar en un sistema planetario como el nuestro. Mucho de este material se vuela eventualmente por el viento estelar fuerte de la estrella central. El disco esta formado por gas y polvo. El polvo corresponde al 1 % de la masa inicial del disco, el resto de la masa corresponde al gas, mayormente hidrógeno y helio.

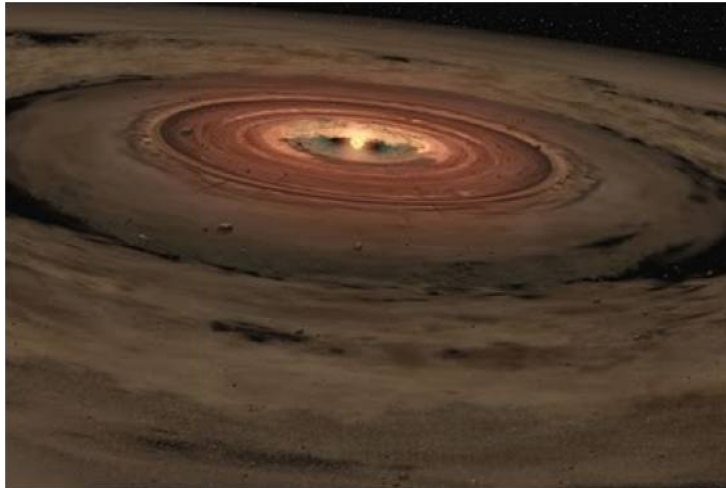
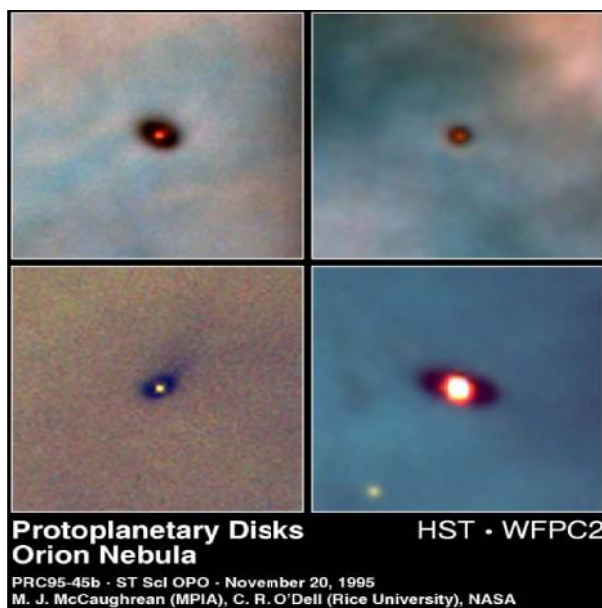


Figura 5: Impresión artística de un disco protoplanetario.
Crédito: NASA

A medida que la acreción continúa dentro de un disco protoplanetario, el material se condensa formando objetos de considerable tamaño conocidos como planetesimales. Los planetesimales después de varios millones de años dan lugar a pequeños planetas rocosos cercanos a la estrella caliente. En las



*Figura 6: Discos en torno a estrellas jóvenes (también conocidos como discos protoplanetarios o *proplyds*). Estos discos están formados de un 99% de gas y de un 1% de polvo. Aún esa pequeña porción de polvo es suficiente para que sean opacos y oscuros en el visible.*

regiones más lejanas a la estrella, donde la temperatura es lo suficientemente baja como para que se forme hielo en el disco, está disponible material más sólido para la formación de planetas. Los gigantes gaseosos, como Júpiter y Saturno, se forman como núcleos de roca y hielo de alrededor de 10 masas terrestres⁽⁶⁾ y barren grandes cantidades de gases livianos para formar sus atmósferas. El barrido del material produce una cavidad central dentro del disco circumestelar, del tamaño del sistema solar, y produce además el agotamiento drástico del contenido de gas del disco.

Los discos protoplanetarios (*proplyds*) han sido observados por diversos instrumentos, ver Figuras 6 y 7.

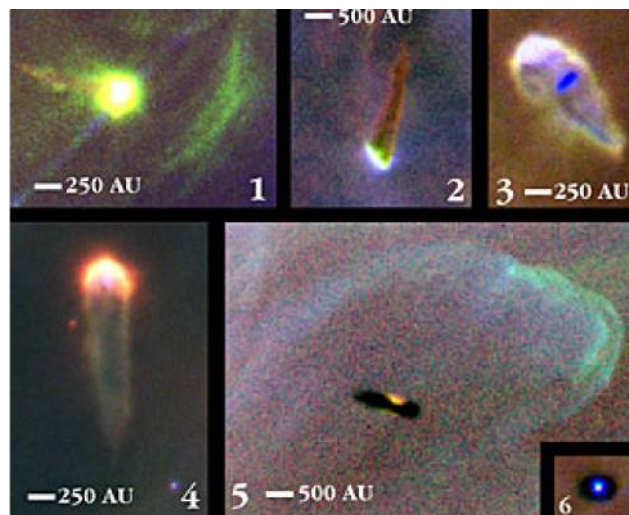


Figura 7: Discos protoplanetarios brillantes (descubiertos con el HST en 1992, y denominados "*proplyds*") son sistemas solares embrionarios que eventualmente forman planetas. El sistema solar se cree que evolucionó a partir de tales discos. La abundancia de esta clase de objetos en la nebulosa de Orion refuerza el argumento de que la formación de planetas es un hecho común en el Universo. Algunos de los *proplyds*, aquellos cercanos a las estrellas del Trapezium en el centro de la nebulosa, están perdiendo una porción de su gas y polvo. La presión de la luz de las estrellas más calientes forma "colas" que actúan como veletas que apuntan en dirección opuesta al Trapezium. Estas colas se forman cuando la luz de las estrellas empuja el gas y el polvo de las capas más lejanas de los *proplyds*. Además de la luminiscencia de los *proplyds*, 7 discos están contorneados sobre el fondo brillante de la nebulosa. Estas imágenes permiten estimar la masa de los discos que es de 0.1 a 730 veces la masa de la Tierra. Crédito: NASA, C.R. O'Dell and S.K. Wong (Rice University).

Conclusión

Las estrellas T Tauri son sistemas físicos complejos, formados principalmente por la estrella central y el disco de acreción. En estos sistemas ocurren una gran cantidad de procesos físicos. Al ser sistemas cercanos y muy abundantes se cuenta con una gran cantidad de observaciones en varias longitudes de onda.

A partir de los discos de estas estrellas se forman sistemas planetarios. Las estrellas T Tauri son de especial interés para el estudio de la evolución de tales discos y en consecuencia para mejorar el entendimiento en el proceso de formación de sistemas planetarios como el sistema solar.

Con el progreso de la astronomía de rayos X en las últimas décadas el entendimiento de muchos de los procesos físicos y de los mecanismos que operan en estos sistemas ha mejorado notablemente. Existen en la actualidad modelos muy complejos que explican la emisión observada de estas estrellas.

Se cree que estos objetos pueden ser emisores de rayos gamma (los fotones más energéticos del espectro electromagnético). Estas estrellas podrían ser fuentes gamma aún no identificadas. Los nuevos instrumentos de rayos gamma podrían detectar e identificar estas fuentes en un futuro cercano. Si esto ocurre, los modelos existentes podrán ser mejorados y ampliados a la región más energética del espectro electromagnético.

(1) La masa del sol es de 1.2×10^{30} kilogramos.

(2) Las estrellas T Tauri deben su nombre al prototipo de esta clase de estrellas, una estrella variable en la constelación de Tauro llamada T Tauri.

(3) Un año luz es una medida de distancia, la distancia que recorre la luz en un año y es de 9.5×10^{12} kilómetros.

(4) La acreción es la agregación de materia a un cuerpo por acción gravitatoria.

(5) La luz visible es absorbida por el gas y el polvo.

(6) Una masa terrestre es aproximadamente 5.98×10^{24} kilogramos.