

Formación estelar y rayos gamma

1. Introducción

Las estrellas se clasifican de acuerdo a su masa M en masivas ($M \geq 8M_{\odot}$) y poco masivas ($M \leq 8M_{\odot}$). Entre estas últimas podemos incluir, por ejemplo, al Sol cuya masa es $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ ¹. Estas estrellas de baja masa son fáciles de detectar y es por esto que se conoce bastante de su formación y evolución. Sin embargo, no ocurre lo mismo con las estrellas masivas, las cuales se encuentran embebidas en grandes condensaciones de gas y polvo con lo cual la extinción de la luz que emiten es grande y poco llega de ellas a nuestros detectores. Por esta razón el estudio de las estrellas masivas es complejo aunque no por esto menos excitante, siendo la formación de estas estrellas uno de los problemas candentes de la astrofísica actual.

Básicamente existen dos modelos posibles para la formación de estrellas masivas. Uno es el que sugiere un mecanismo similar al que opera en las estrellas de baja masa, y el otro es el que sostiene una formación de tipo jerárquica; esto es, primero se formarían las estrellas de baja masa y luego, por la coalición de algunas de éstas, las estrellas masivas. Observaciones recientes de objetos estelares jóvenes (**YSOs** por *Young Stellar Objects*) cercanos sugieren que el primero sería el mecanismo elegido por la naturaleza para formar las estrellas de gran masa. Esto es, un proceso de condensación de inhomogeneidades en una nube molecular, con la consecuente formación de un disco a través del cual se acreta material de la nube (disco de acreción) y la eyección de materia a través de flujos (*jets*) bipolares, sería la secuencia de hechos en la formación estelar, para todo el espectro de masas.

En este artículo revisaremos la teoría y las observaciones con las que cuentan hoy en día los astrónomos para estudiar la formación de las estrellas masivas y luego veremos las especulaciones teóricas que pueden hacerse a partir de lo que se observa (ver Figura 1) y se conoce. En particular, nos concentraremos en la posible emisión en rayos gamma² de las estrellas masivas en formación.

2. Formación de estrellas de baja masa ($M \leq 8M_{\odot}$)

La formación estelar comienza cuando una nube de gas en el espacio se hace inestable y colapsa bajo la acción de su propia gravedad. Durante el colapso, la nube se fragmenta dando lugar a la formación de pequeños núcleos densos los cuales comienzan a acretar material del medio circundante. Una vez que estos han adquirido una determinada cantidad

¹Los números muy grandes suelen expresarse en forma exponencial en vez de en la forma usual. Por ejemplo el número 1.000.000 se escribe 10^6 en la notación científica.

²El espectro electromagnético se divide en varias bandas de energía: Radio ($10^{-11} < E < 10^{-3} \text{ eV}$), infrarrojo ($10^{-3} < E < 1 \text{ eV}$), visible ($1 < E < 3 \text{ eV}$), ultravioleta ($3 < E < 125 \text{ eV}$), rayos X ($125 < E < 10^5 \text{ eV}$) y rayos gamma ($10^5 < E < 10^{20} \text{ eV}$).

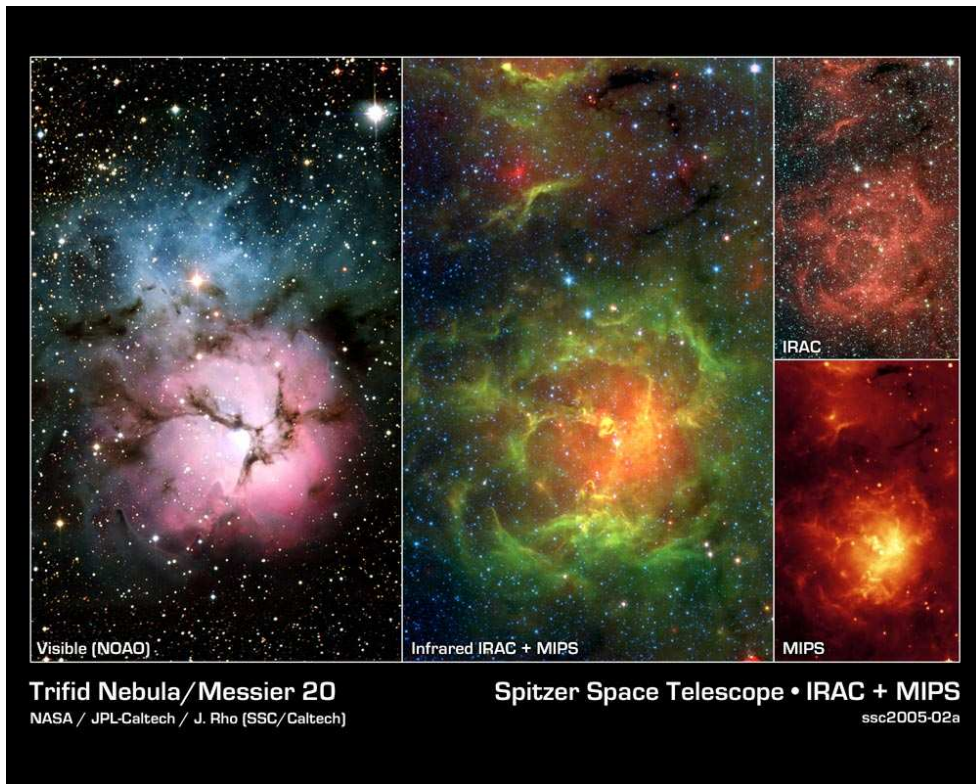


Figura 1: Región de formación estelar masiva. En la figura se muestran las imágenes de esta región en diferentes longitudes de onda tomadas por el telescopio Spitzer.

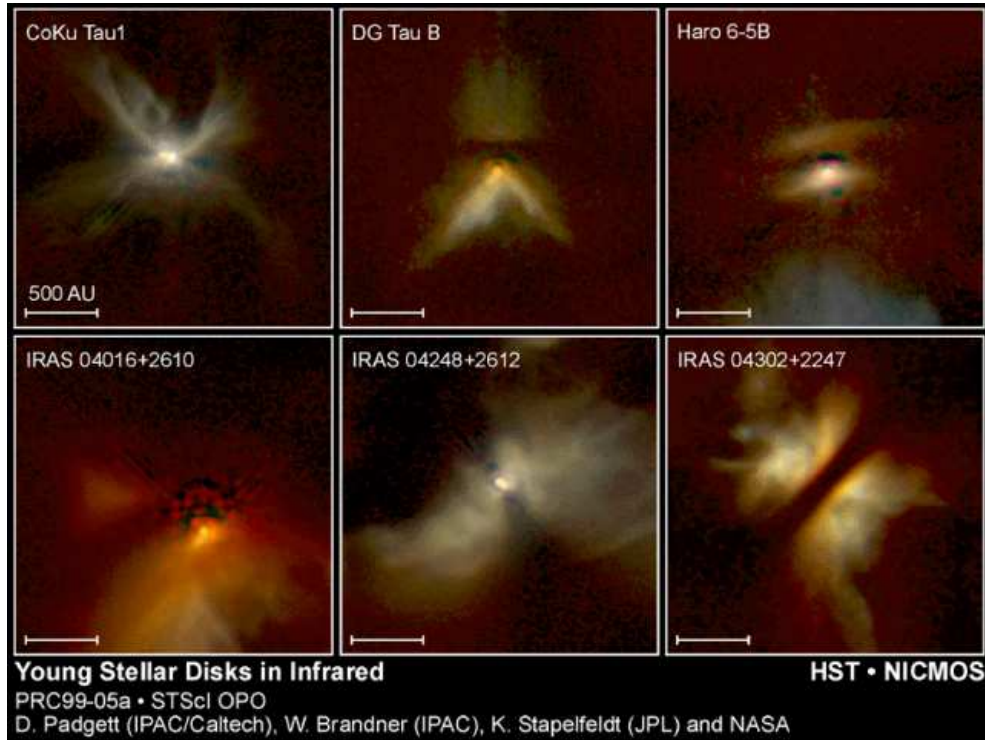


Figura 2: Discos de acreción detectados en diferentes YSOs por el telescopio espacial Hubble.

de masa comienzan a rotar y se forma un disco de acreción alrededor de ellos. A su vez, parte del material es expelido por los polos formando *jets*.

Este mecanismo, que explica muy bien las observaciones, predice cuatro estados evolutivos:

1. Un estado inicial en el cual la región central de los núcleos densos se contrae, aumentando así su campo gravitacional y formando una protoestrella por cada núcleo.
2. Un estado de acreción caracterizado por la formación de un disco alrededor de cada protoestrella y a través del cual la misma acreta materia del medio circundante (ver Figura 2).
3. La fase en la cual se producen los *jets*, por los cuales la protoestrella deposita momento angular y energía cinética en sus alrededores (ver Figura 3).
4. Finalmente, la etapa en la cual la protoestrella comienza a radiar y así se convierte en una estrella.

Estrellas T Tauri: Un tipo especial de protoestrellas de baja masa son las llamadas T Tauri. Estas protoestrellas se encuentran en un estado avanzado de su formación; tienen

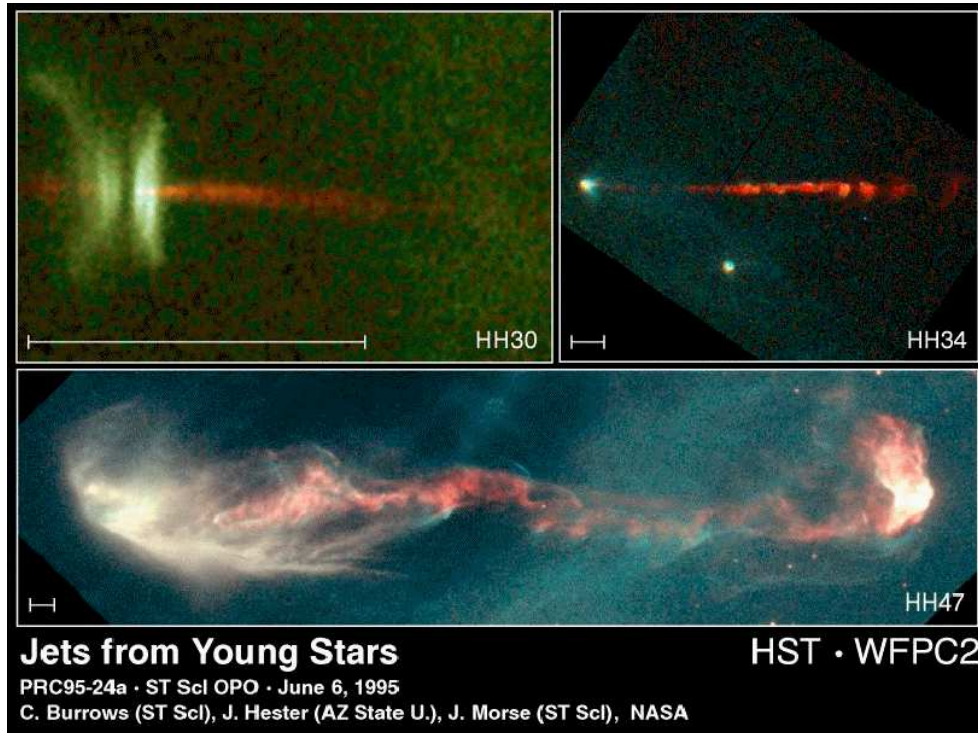


Figura 3: *Jets* detectados en diferentes YSOs por el telescopio espacial Hubble.

edades entre 10^6 y 10^7 años. El disco de acreción es pequeño o ha desaparecido debido a la formación de planetas. Los vientos son fuertes, con velocidades del orden de los 200 km s^{-1} y las pérdidas de masa de $\sim 10^{-7} M_{\odot}$ por año. Se caracterizan por su intensa emisión en rayos X.

Objetos Herbig-Haro: Es actualmente aceptado que los YSOs menos masivos se componen de un objeto central, más un disco de acreción y *outflows* bipolares. Estos últimos, al chocar violentamente con el medio circundante producen los llamados objetos Herbig-Haro (HH). Uno de los objetos HH más estudiados es HH 210, que se encuentra en la nebulosa de Orión³. DE la misma manera que las estrellas T Tauri, los HH son fuertes emisores de rayos X. Por muchos años se creyó que los objetos HH tenían una extensión comprendida entre 0,1 y 1 pc⁴, con velocidades del orden de los 100 km s^{-1} . Sin embargo, en la década pasada, se detectaron algunos flujos HH asociados con estrellas (en formación) masivas. Ejemplos de esto son el complejo HH 80 – 81 y G192,16 – 3,82, con extensiones de algunos parsecs.

³La nebulosa de Orión es la región de formación estelar más estudiada de la galaxia.

⁴1 parsec = $1 \text{ pc} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}$.

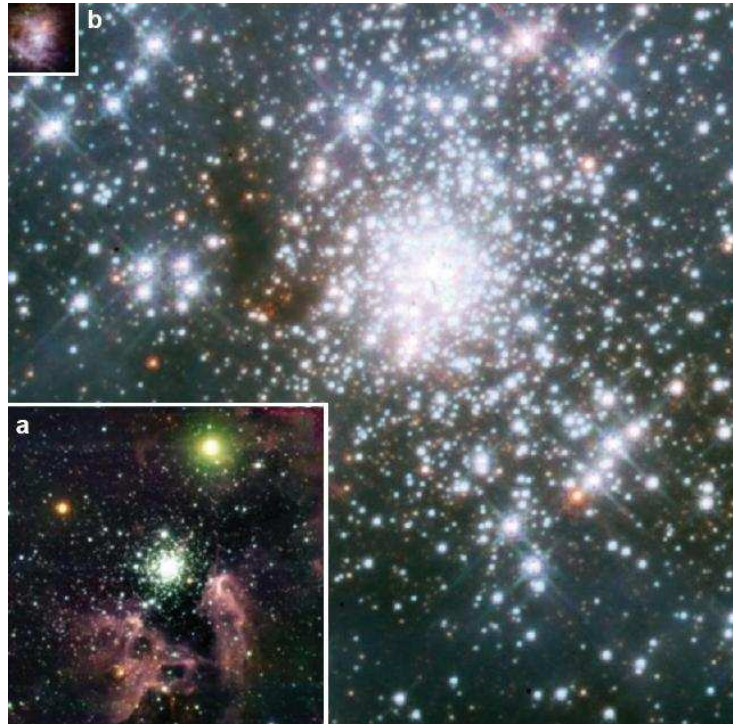


Figura 4: Imagen tomada con el telescopio espacial Hubble de la región de formación estelar masiva conocida como 30 Doradus.

3. Formación de estrellas masivas ($M \geq 8M_{\odot}$)

El primer estado en la formación de estrellas de gran masa es la acreción y fragmentación de la nube molecular gigante, con la consecuente formación en núcleos densos. Hasta aquí el escenario de formación está claro y coincide con la etapa inicial de la formación de las estrellas de baja masa. Sin embargo, de que manera continúa el proceso de formación de estrellas masivas no está del todo establecido aún, aunque muchos resultados observacionales, que se describirán a continuación, parecieran indicar que el mecanismo de formación de estrellas masivas es similar al que opera para formar las estrellas menos masivas.

Cúmulos: Observaciones de regiones de formación estelar masivas de la galaxia muestran que las estrellas de gran masa no se forman aisladas sino en grupos. La densidad típica de estos cúmulos de estrellas jóvenes es de aproximadamente 10^4 estrellas por pc^{-3} y su tamaño es de $\sim 0.2 - 0.4$ pc. Las fuentes más luminosas asociadas con regiones compactas de gas ionizado, muestran una compleja morfología cuando se las observa en las frecuencias de radio, infrarrojo u óptico. Algunos autores sugieren que la presencia de estrellas, embebidas en la región, estarían excitando el gas de la misma y esto produciría la compleja estructura observada. Una de las regiones más estudiadas que contiene decenas de estrellas masivas es 30 Doradus (ver Figura 4)

Discos de acreción: Los discos detectados en regiones de formación de estrellas masivas tienen un diámetro entre 0.1 y 1 pc, y sus masas pueden ir desde las 10 a las 2000 M_{\odot} . Una de las evidencias observacionales más importantes de la existencia de discos circumstelares en regiones de formación estelar masivas es la detección de la emisión de gas y polvo en el infrarrojo.

Jets: La presencia de estos en la formación de estrellas masivas fué determinada recientemente mediante observaciones en las frecuencias de radio. Sobre una muestra de 120 regiones de formación de estrellas masivas, en el 90 % de los casos, se observó gas moviéndose a altas velocidades. Luego, si las elevadas velocidades del gas están asociadas a la presencia de *jets*, puede concluirse que estos son comunes en la formación de las estrellas de alta masa.

Estas evidencias observacionales muestran que los discos de acreción y los *jets* estarían presentes en la formación de estrellas masivas. Estos resultados sugieren que las estrellas masivas se forman de manera similar a las de poca masa, aunque en un medio más denso. Los núcleos que darían lugar a la formación de estrellas de gran masa serían mucho más densos que los respectivos a las estrellas de baja masa. La tasa de acreción de masa estimada para los procesos de formación de estrellas masivas es de $\sim 6 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$ mientras que el asociado a las estrellas de baja masa tiene un valor típico de $\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ y}^{-1}$.

4. *Jets* en YSOs masivos

De acuerdo a lo mencionado en las secciones anteriores, pareciera ser que las eyecciones de materia en forma de flujos bipolares son un fenómeno común en las regiones de formación estelar, cualquiera sea la masa de la estrella que se esté creando. El estudio de los flujos colimados asociados con estrellas jóvenes masivas, es decir, aquellos cuyas extensiones son mayores que 1 pc, ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. Esto se debe a las posibilidades de observar cada vez con mayores resoluciones angulares.

Los campos magnéticos tienen un rol fundamental tanto en la acreción, como en la eyección de la materia. Las partículas que circundan el disco protoplanetario⁵ caen hacia él por la líneas de campo. Esto ocurre hasta que las líneas, debido a la acción de la gravedad, adoptan una configuración tal que la fuerza centrífuga supera a la gravitatoria y entonces las partículas pueden escapar del disco. Esta pérdida de masa es aproximadamente un 10 % de la materia acreta. Por otro lado, los campos magnéticos aseguran la estabilidad de los jets, que viajan a través del medio de la nube molecular a velocidades $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ y cuya densidad es mucho mayor que la del medio que lo rodea (la nube molecular).

Algunas de las propiedades de los *jets* detectados en regiones de formación de estrellas masivas son las siguientes:

- Tienen una masa promedio de $130 M_{\odot}$, aunque en algunos casos pueden alcanzar valores de hasta $4800 M_{\odot}$.
- La pérdida de masa abarca desde las $3 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ hasta las $3 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

⁵Se lo llama así porque luego dará lugar a la formación de planetas.

- La energía cinética toma valores desde 1×10^{46} hasta 6×10^{48} ergs.

Estas cantidades son aproximadamente 100 veces mayores que las correspondientes a los *jets* presentes en la formación de estrellas de baja masa. Luego puede concluirse que los *jets* de alta masa inyectan mayor cantidad de energía al medio circundante que los de baja masa.

5. Emisión de rayos gamma

Los rayos gamma son los fotones más energéticos del espectro electromagnético. Para emitirlos en forma de radiación térmica, es necesario que el sistema tenga una temperatura extremadamente alta, $> 10^{13}$ K, la cual solo es posible en sistemas estrofísicos muy particulares. Es por esto que la emisión de rayos gamma es puramente no térmica, es decir, a través de procesos que involucran interacciones entre partículas relativistas⁶ y campos magnéticos (radiación sincrotrón) o partículas no relativistas (como los átomos de hidrógeno o fotones poco energéticos).

Las partículas (electrones y protones) pueden acelerarse hasta velocidades relativistas a través de un mecanismo que lleva el nombre del físico italiano Enrico Fermi quien propuso este proceso para explicar el origen de los rayos cósmicos. Este mecanismo de Fermi acelera las partículas por cruces sucesivos de estas por el frente de una onda de choque. En YSOs masivos, estos choques pueden producirse cuando el jet es frenado por el medio en el cual se propaga.

Proveniente de YSOs masivos se ha detectado radiación térmica hasta los rayos X y además, en algunas fuentes, radiación no térmica (sincrotrón) en las frecuencias de radio. La detección de emisión sincrotrón proveniente de los lóbulos de los YSOs masivos es una evidencia de la presencia de electrones relativistas en la región donde se produce tal radiación. Estos electrones relativistas, además de interactuar con el campo magnético y producir la radiación sincrotrón observada, pueden interactuar con la materia de la nube molecular o con los fotones emitidos por la protoestrella masiva (a diferencia de las protoestrellas de baja masa, las protoestrellas masivas comienzan a radiar antes de convertirse en estrellas) y producir rayos gamma.

El grupo de astrofísica relativista y radioastronomía (GARRA) del IAR ha estudiado dos de los objetos estelares jóvenes más luminosos detectados al momento: la fuente IRAS 16547 – 4247 y el sistema HH 80-81. Estas fuentes son sistemas triples compuestos por una protoestrella masiva central, jets que emanan de ella y en el lugar donde estos jets son frenados por el material de la nube se detectan lóbulos (ver la Figura 5). Estos lóbulos son las regiones donde se pueden acelerar partículas eficientemente hasta velocidades relativistas. Los resultados obtenidos son que los lobulos de los jets de los YSOs masivos pueden ser eficientes aceleradores de partículas las cuales luego pueden emitir significativamente en rayos gamma por interacciones con el material de la nube. Concluimos que esta radiación

⁶Las partículas relativistas son aquellas que se mueven a una velocidad $> 0.1 c$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

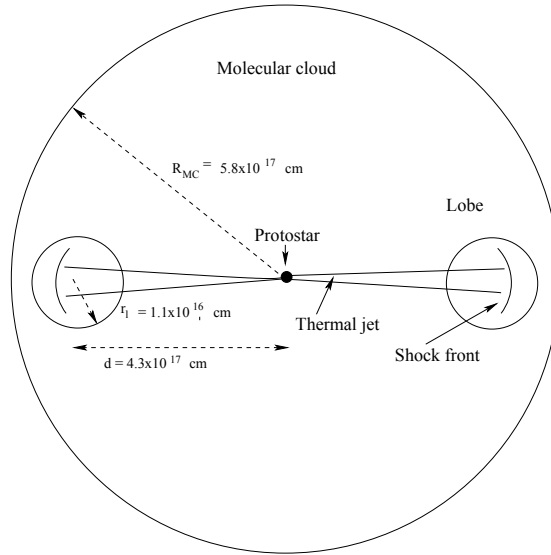


Figura 5: Esquema de un YSO masivo. Se muestran la protoestrella central, los *jets* y los lóbulos ubicados donde los jets son frenados. Todo el sistema se encuentra embebido en una nube molecular.

podría ser detectada por telescopios de rayos gamma de nueva generación, abriendo esto una nueva ventana al estudio de la formación de las estrellas masivas.

6. Resumen y conclusiones

Las estrellas menos masivas se forman por el colapso y fragmentación de una nube molecular. Luego se forman núcleos de mayor densidad, los cuales se contraen por acción de su propia gravedad; que si bien inicialmente es soportada por los campos magnéticos, estos se van debilitando gradualmente via la difusión bipolar, produciendo así un núcleo isotermodinámico inestable con una densidad proporcional a r^{-2} . Finalmente la fuerza gravitatoria predomina sobre la magnética y deviene el colapso. El objeto central acumula materia y entonces comienza a rotar. Como consecuencia de esto la acreción deja de ser esférica y se forma un disco delgado alrededor de la protoestrella a través del cual la materia es acretada. A esto le sigue un estado en el cual el objeto central deposita materia en el medio circundante a través de los *jets* mientras continúa la acreción de masa. Finalmente la protoestrella comienza a radiar y se convierte en estrella. De acuerdo a los resultados observacionales expuestos en la sección 3, el mecanismo someramente descrito anteriormente, sería universal. Es decir, describiría la formación estelar, cualquiera sea la masa de la estrella formada.

Observaciones en las frecuencias de radio muestran que los YSOs masivos tienen una estructura alargada y en cuyos extremos se detecta radiación no térmica en estas longitudes de onda. Esto ha motivado estudios teóricos cuyos resultados muestran que las partículas relativistas que emiten la radiación sincrotrón observada en radio también producirían

rayos gamma. Estos resultados pueden ser contrastables con los datos de instrumentos de nueva generación como por ejemplo el satélite Fermi y los futuros telescopios.

Como conclusión final podría decirse que la formación de los discos de acreción, con la consecuente generación de los jets, está presente en todas las escalas astrofísicas, desde la formación estelar hasta los núcleos galácticos activos, pasando por los microcuásares. En cada caso, el mecanismo físico sería esencialmente el mismo, aunque los valores de los parámetros como acreción de masa, densidad del medio y del jet, intensidad del campo magnético, etc se irían incrementando con la escala del sistema.