



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Objetos Herbig-Haro

T E S I S

Que para obtener el Título de

F I S I C O

p r e s e n t a :

Mónica Francisca Benítez Dávila

México, D.F.

1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

CAPITULO 1

MORFOLOGIA Y ENTORNO DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO.

1.1 Morfología	6
1.2 Entorno de los objetos HH.....	12
1.2.1 Nubes moleculares.	
1.2.2 Estrellas T Tauri.	
1.2.3 Jets ópticos.	
1.3 Estudio de la morfología de los objetos HH59 y HH62... 20	

CAPITULO 2

OBSERVACIONES DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO

2.1 Observaciones de los objetos HH en el óptico.....	31
2.1.1 Apariencia.	
2.1.2 Espectro.	
2.1.3 Continuo.	
2.2 Observaciones en el ultravioleta de los objetos HH....	41
2.2.1 Líneas de emisión.	
2.2.2 Continuo.	
2.3 Estudios en el infrarrojo de los objetos HH.....	45

2.4	Observaciones en Radio de los objetos HH y sus alrededores.....	49
2.4.1	Detección de radio continuo de los objetos HH.	
2.4.2	Entorno de los objetos HH en radio.	
	a) Objetos HH y su relación con la nube molecular asociada.	
	b)Flujos detectados en radio del entorno de los objetos HH.	
	c) Máseres de agua.	
2.5	Parámetros físicos de los objetos HH.....	62
2.5.1	Velocidades radiales.	
2.5.2	Velocidades tangenciales.	
2.5.3	Densidad y temperatura.	
2.5.4	Variabilidad.	
2.6	Criterios para identificar la fuente de energía en los objetos HH.....	66

CAPITULO 3

ALGUNOS MODELOS DE OBJETOS HERBIG-HARO

3.1	Introducción.....	69
3.2	Ondas de choque.....	70
3.3	Algunos Modelos de objetos HH	79
3.4	Modelo de Jet dependiente del tiempo.....	83

CONCLUSIONES	97
APENDICE	102
REFERENCIAS	104

INTRODUCCION

Objetos Herbig-Haro.

Los objetos Herbig-Haro fueron descubiertos de manera independiente por el mexicano Guillermo Haro (1950,1952,1953), y por el estadounidense George Herbig (1951,1952).

El Dr.Haro descubrió dichos objetos en el observatorio de Tonantzintla, México, estudiando la región de Orión en las placas fotográficas tomadas con la cámara Schmidt, mientras que el Dr. Herbig los descubrió, en los Estados Unidos de Norteamérica, en una serie de fotografías directas tomadas con el reflector Crossley.

Cerca de la nebulosa NGC 1999 tanto Herbig como Haro notaron unas pequeñas nebulosas, que tenían un espectro peculiar, ya que las líneas prohibidas de [SII] eran muy intensas, presentaban líneas prohibidas con un amplio intervalo de energías de excitación, y en general, los espectros eran distintos a los de las estrellas vecinas.

El Dr. Haro llamó a estos objetos 11a, 10a, y 12a, y Herbig H1, H2, H3; desde 1954 Ambartsumian los llamó objetos Herbig-Haro y actualmente se les designa como: HH1, HH2, HH3. A dichos objetos se les considera como el prototipo de su clase. Hasta ahora se han encontrado alrededor de 180 objetos Herbig-Haro los cuales aparecen listados en el catálogo de Von Hippel (1988). El autor en este catálogo describe algunas características importantes de cada objeto, como son: las coordenadas, movimientos propios, velocidades radiales e información espectral.

Desde su descubrimiento y hasta la fecha nuestro entendimiento de los objetos HH ha avanzado sustancialmente, en particular en las últimas dos décadas, gracias a los estudios observacionales en diferentes longitudes de onda que nos han dado información muy valiosa, y a los diferentes modelos y teorías que han tratado de explicar a los objetos HH. Sin embargo todavía no hay un consenso general sobre su origen y evolución.

La definición de Herbig (1969) de los objetos Herbig-Haro es la siguiente:

Son nebulosidades difusas, pero compactas con un espectro dominado por líneas prohibidas muy intensas de [OI], [NII], [SII], así como líneas de hidrógeno. Algunas veces se aprecia un continuo por debajo de las líneas de emisión. Estos objetos siempre se encuentran proyectados contra complejos de nubes moleculares.

Una definición más reciente de Rodríguez (1989) de los objetos Herbig-Haro es la siguiente:

Los objetos Herbig-Haro son nebulosidades ópticas excitadas por una onda de choque producida por el viento estelar de una estrella joven.

Como se mencionó antes los objetos Herbig-Haro han sido estudiados durante cuarenta años sin llegar hasta ahora a una explicación unánimemente aceptada acerca de su formación y evolución. Sin embargo se han descubierto hechos muy interesantes acerca de éstos: la cercana relación entre los objetos

Herbig-Haro y las estrellas de evolución temprana, los jets ópticos asociados a estas estrellas, las nubes moleculares y sus flujos asociados. Esta relación nos da información muy importante sobre el nacimiento de las estrellas y su evolución temprana.

A pesar de todas las incógnitas del fenómeno de los objetos Herbig-Haro, podemos definir en general sus principales características describiéndolas por medio de una visión global que incorpora tanto a los objetos Herbig-Haro, como al flujo molecular y a los jets ópticos (Rodríguez 1989). Esta visión global consiste en :

1. La presencia de una estrella asociada joven sufriendo una pérdida de masa de aproximadamente $10^{-6} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$ (donde M_{\odot} es la masa solar), dicha pérdida de masa es en forma de viento, el cual presenta velocidades de algunos cientos de km/s.

2. Presencia del gas molecular con alta velocidad. Su geometría es bipolar y su velocidad radial es de algunas décimas de km/s, con escala de minutos de arco.

3. La presencia de un mecanismo de colimación que origina la geometría bipolar casi siempre detectada en los flujos que presenta la nube molecular, los objetos Herbig-Haro y los jets ópticos. El origen de éste mecanismo ha estado sujeto a muchos estudios y sigue siendo un problema abierto. Sin embargo resultados observacionales y consideraciones teóricas coinciden en la presencia de un disco o toroide alrededor de la estrella cuyas características y dimensiones no están claramente establecidas.

4. Presencia de los objetos Herbig-Haro y los jets ópticos en los alrededores de la estrella excitadora. Los jets ópticos se

encuentran más cerca de la estrella excitadora. Los objetos Herbig-Haro están a minutos de arco de la estrella mientras que los jets a segundos de arco. Tanto los objetos HH como los jets ópticos tienen espectro óptico característico de un gas chocado y también tienen velocidades que pueden llegar a tener cientos de km/s.

Los objetos HH están siempre asociados a nubes moleculares, éstas generalmente presentan alto grado de extinción. Debido a esto, observaciones en el infrarrojo y en el radio son de especial interés.

Estos resultados son el producto de muchos años de estudios tanto observacionales como teóricos. Cabe hacer notar que existen nebulosidades similares a los objetos HH asociadas a nebulosas planetarias, sin embargo esta tesis se referirá únicamente a objetos HH que están asociados a estrellas en proceso de formación (como lo indica Rodríguez, 1989).

En el primer capítulo de la tesis se estudiará la morfología de los objetos HH en el óptico, así como las características generales de su entorno (nubes moleculares, jets ópticos y estrellas T Tauri), terminando con un estudio morfológico de las observaciones que se hicieron de los objetos HH59 y HH62 en el observatorio de San Pedro Mártir, México.

En el segundo capítulo se describirá el espectro de los objetos HH en el óptico, ultravioleta, infrarrojo y radio. Posteriormente, se comparan diferentes parámetros físicos de los

objetos HH con regiones HII y remanentes de supernova. Y finalmente se dan diferentes criterios que ayudan a identificar a la estrella excitadora asociada a los objetos HH.

En el último capítulo se hará una revisión de ondas de choque, posteriormente se describirán varios modelos existentes de objetos HH y finalmente se estudiará, de una manera más detallada, un modelo de jet dependiente del tiempo.

CAPITULO 1

MORFOLOGIA Y ENTORNO DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO

En este capítulo se presentará la morfología de los objetos Herbig-Haro inferida a partir de observaciones en el óptico, así como las características generales de su entorno (nubes moleculares, jets ópticos y estrellas T Tauri). Además se presentarán observaciones de los objetos Herbig-Haro 59 y 62.

1.1 MORFOLOGIA.

Los objetos Herbig-Haro (HH), son condensaciones difusas pero compactas. Están conectadas entre sí por nebulosidades más débiles que las condensaciones, éstas presentan las mismas características espectrales que las condensaciones. Cuando se observan en el óptico, los objetos HH tienen aspecto de pequeños cúmulos brillantes cerca de nubes moleculares.

Por convención, la nomenclatura de los objetos HH se otorga en forma ascendente conforme se les ha ido descubriendo, por ejemplo HH1, HH2, HH3 son los primeros objetos descubiertos. Las coordenadas de los objetos HH son medidas en relación al centro de simetría del objeto extendido, aunque también suele incluirse en ciertos catálogos las coordenadas de cada subcondensación de algunos de estos objetos.

Las fotografías 1.1, 1.2 y 1.3 se tomaron del catálogo de Herbig (1974), dicho catálogo consta de 42 objetos Herbig-Haro.

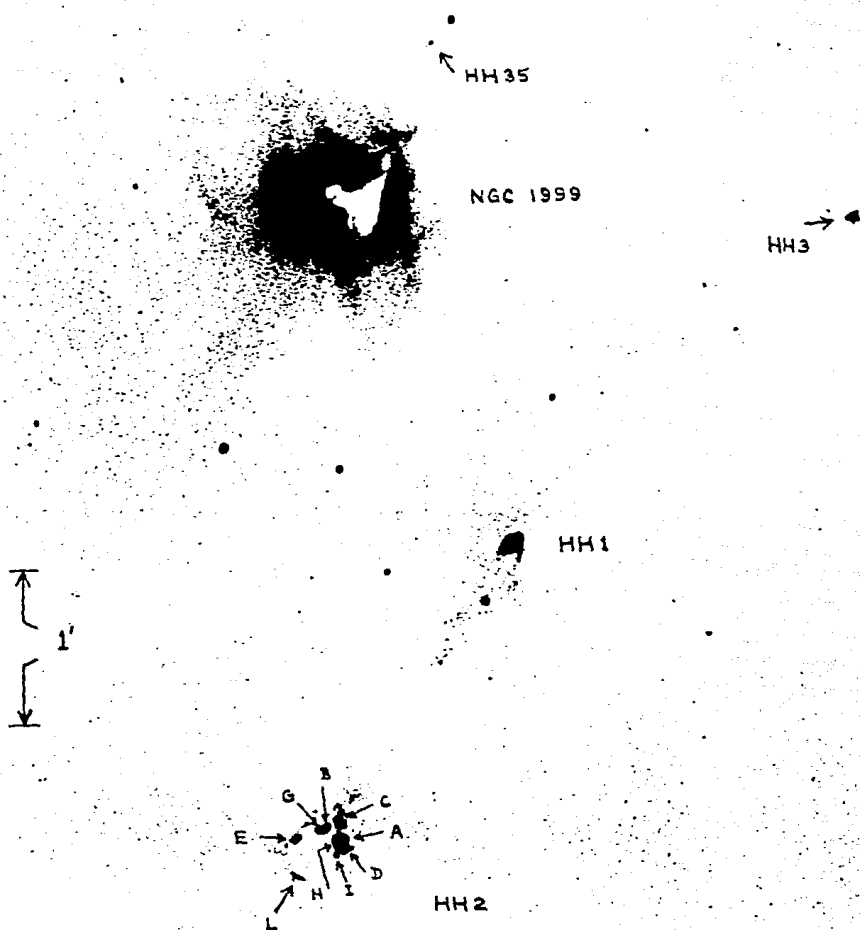


Figura 1.1 Fotografía de algunos objetos HH. Tomada del catálogo de Herbig (1974).

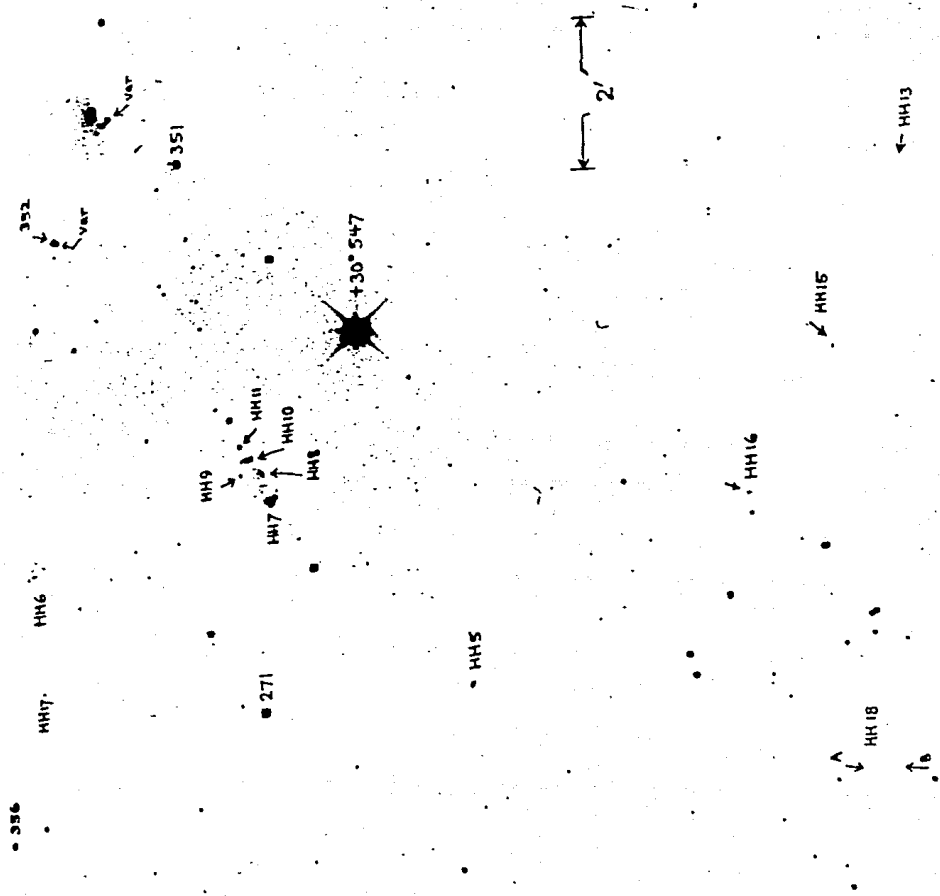


Figura 1.2 Fotografía de algunos objetos HH. Notemos que los objetos HH 7- 11 están alineados entre sí. Tomada del catálogo de Herbig (1974).

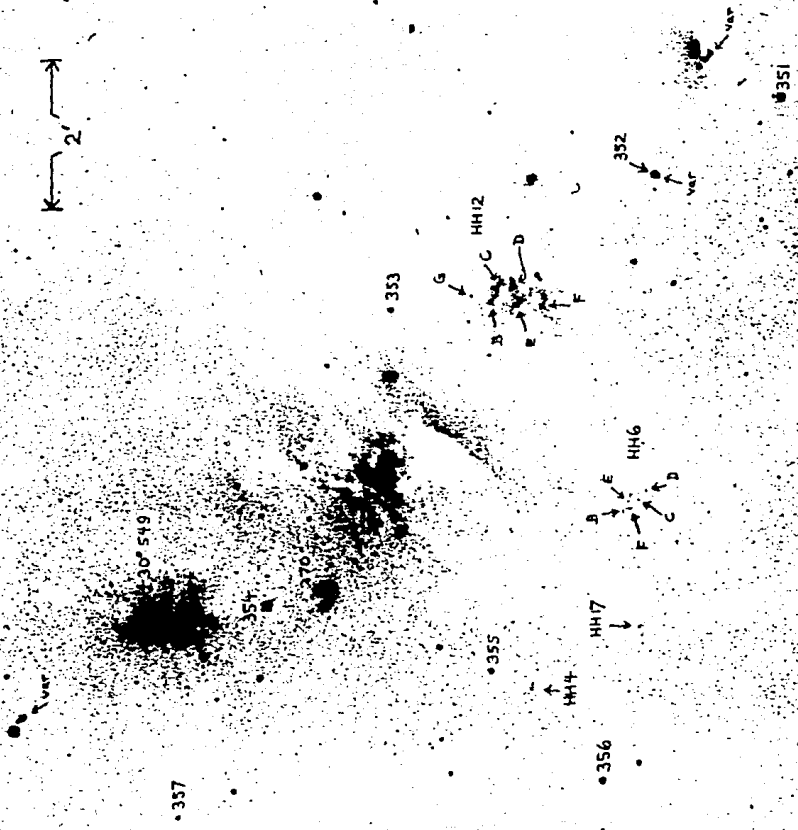


Figura 1.3 Fotografía de algunos objetos HH. Notemos al objeto HH12 que está formado por pequeñas subcondensaciones. Tomada del catálogo de Herbig (1974).

Como podemos observar en las fotografías algunos objetos se encuentran solos (ver en la Fig 1.1 a los objetos HH1 y HH35) y otros son parte de pequeñas agrupaciones, cabe notar que a cada subcondensación de un mismo objeto se le denota con una letra, por ejemplo HH2a, HH2b, (ver en las Figs. 1.1 y 1.3 a los objetos HH2 y HH12) y a veces estas agrupaciones tienen cierta alineación mientras que otras no tienen una forma definida. Cada uno de los objetos HH tiene diferentes formas y algunos están asociados a jets ópticos (Fig 1.4). Otros objetos HH tienen morfologías muy complejas. Ya que la morfología es tan variada, es difícil poder clasificar a los objetos HH y atribuirles un origen común.

Los objetos HH están asociados a nubes interestelares, por ejemplo los objetos HH1, HH2, HH3, HH35, están asociados a la nebulosa NGC 1999 (ver Fig 1.1), y los objetos HH7-11 a NGC 1333.

Cabe notar que actualmente las imágenes directas de los objetos celestes han sido mejoradas debido a los detectores llamados CCD. Se han diseñado detectores CCD cada vez más eficientes para captar luz de diferentes longitudes de onda, así con exposiciones cortas, se pueden obtener imágenes extraordinarias. Con éste tipo de detectores, se han descubierto detalles de especial interés en los objetos HH, por ejemplo:

1) Desde 1978 se conocía una estructura filamentaria asociada a los objetos HH 46/47. A estas estructuras posteriormente se les daría el nombre de jet óptico. Con un detector CCD se encontró la contraparte de dicho jet (Reipurth y Heathote 1990). Dicho jet es muy débil y no se nota en las placas fotográficas. Actualmente a estos jets ópticos se les considera objetos muy importantes ya que

tienen una relación muy estrecha con los objetos HH y con estrellas en proceso de formación. (Ver Figura 1.4).

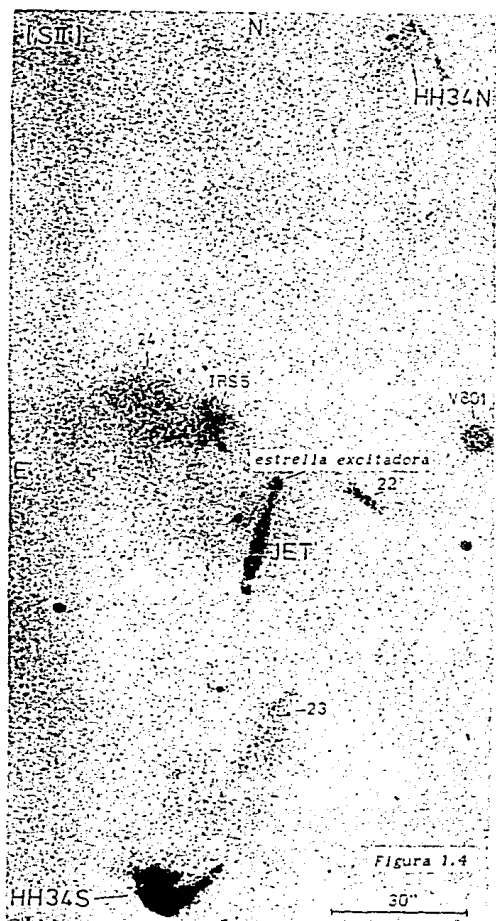


Figura 1.4 Imágen CCD del objeto HH34. Se aprecia que los objetos HH34 N y S, ambos tienen una estructura en forma de arco apuntando sus partes cóncavas hacia la estrella excitadora. El jet apunta hacia la misma dirección del objeto HH34 S (Buhrke et al. 1985).

11) En los objetos HH1 y HH34, se observó con un detector CCD, una estructura en forma de arco, en donde se ve que su parte cóncava apunta hacia la fuente que excita a estos objetos y se nota un chorro pequeño que sale de esta fuente apuntando en esa dirección. (Ver Figura 1.4).

1.2 ENTORNO DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO.

El entorno de los objetos HH es muy importante para entender su origen. Los objetos HH están cercanos a nubes moleculares, estrellas T Tauri, y jets ópticos. A continuación veremos las características principales de dicho entorno.

1.2.1 NUBES MOLECULARES.

Las estrellas se forman a partir del gas y polvo interestelares, en particular las estrellas jóvenes están asociadas a nebulosas, éstas forman parte de grandes concentraciones de gas y polvo que se conocen como nubes interestelares. Las nubes se dividen en nubes difusas y moleculares, se hablará únicamente de las nubes moleculares.

Las nubes moleculares presentan temperaturas entre 8-40 K, densidades de entre 10^2 - 10^5 moléculas por centímetro cúbico, y tienen mayor concentración de gas y polvo que las nubes difusas. El gas está en forma molecular, debido a las altas densidades que favorecen las reacciones químicas que les dan origen. Se han detectado moléculas con un gran número de átomos.

Estudios observacionales han hecho notar que las estrellas recién formadas se encuentran inmersas o en las vecindades inmediatas de las nubes moleculares. Las estrellas se forman en asociaciones y mientras más joven sea un grupo estelar mayor es la cantidad de gas y polvo que las rodea.

A las nubes moleculares que contienen estrellas jóvenes se les llaman regiones de formación estelar activa. A estas regiones las podemos estudiar con detectores infrarrojos y con radiotelescopios únicamente (ya que como las estrellas están embebidas en la nube no se les puede detectar en las otras longitudes de onda). Dichas regiones contienen en su mayoría estrellas T Tauri (ver sección 1.2.2) que están distribuidas en toda la nube; estas estrellas presentan un viento estelar altamente energético que es capaz de excitar y empujar al gas que las rodea mediante ondas de choque.

Se piensa que la molécula más abundante en las nubes moleculares es la del hidrógeno H_2 , dicha molécula es una de las más difíciles de detectar, ya que no puede radiar fácilmente a la temperatura de 10 K. Debido a lo difícil que resulta observar la molécula, la mayor parte de la información sobre el gas molecular se ha obtenido a partir de moléculas menos abundantes como son el monóxido de carbono, CO, y el amoníaco, NH_3 .

La molécula H_2 puede ser excitada térmicamente a temperaturas de 1,000 K y emitir. Las condiciones favorables para detectar su emisión se dan en regiones de formación estelar, ya que los vientos que presentan las estrellas jóvenes calientan y excitan al gas molecular.

A la mayor parte de las nubes moleculares, que se han estudiado asociadas a los objetos HH, se les han detectado flujos de alta velocidad (ver sección 2.4.2, inciso b). Estos flujos son producidos por estrellas muy jóvenes que inyectan energía (por medio de sus vientos) a las nubes asociadas. El gas molecular de alta velocidad es detectable a través de las líneas de emisión del CO.

Las estrellas que están embebidas en las nubes moleculares sólo son visibles en el infrarrojo. Se cree que dichas estrellas están relacionadas a discos o toroides y que debido a ésto, los flujos producidos son bipolares.

1.2.2 ESTRELLAS T TAURI.

Las estrellas T Tauri son estrellas de baja masa que todavía no llegan a la secuencia principal.

El astrónomo norteamericano A. Joy (1945) estudió 11 estrellas que tenían las siguientes características en común:

En todas las estrellas se detectaron: variaciones erráticas y rápidas de luz del orden de 3 magnitudes; tipos espectrales entre FS y GS con líneas de emisión H y K del Ca; también se notó que eran estrellas de baja luminosidad y que estaban asociadas a nebulosidades.

Entre este grupo de estrellas se encontraba la estrella llamada T Tauri y Joy la consideró como el prototipo de este grupo de estrellas.

Se calcula que las estrellas T Tauri (ETT) tienen una edad menor que 10^7 años y una masa de hasta 3 Mo.

Se dice que una estrella pertenece a la familia de las estrellas T Tauri si cumple con las siguientes características:

1. Tener las líneas de hidrógeno y las H y K del CaII en emisión.

2. Tener líneas de FeI en emisión, así como las líneas prohibidas del SII ($\lambda\lambda$ 4068 y 4076) en emisión.

3. Tener una fuerte línea de absorción de LiI en λ 6707.

La radiación visible de las ETT puede cambiar por muchas magnitudes, ésta variabilidad no se ha podido explicar hasta ahora.

Las ETT también se presentan en grupos llamados asociaciones T.

Debido a que las ETT presentan fuertes líneas de emisión y exceso de continuo en el infrarrojo y en el ultravioleta, se piensa que existen enormes envolventes de polvo circumestelar, ya que el polvo absorbe la luz estelar en el visible y luego es reemitido en el infrarrojo. El exceso en el ultravioleta se piensa que se debe a regiones de altas temperaturas externas a las estrellas.

Las ETT radian la mayor parte de su energía en el cercano infrarrojo. Muchas de ellas se detectan como fuentes emisoras en rayos X. La emisión de rayos X depende del período de rotación de las estrellas. Las ETT tienden a rotar más rápido que las estrellas de tipo tardío, por lo que el mapeo de rayos X es un método eficiente para encontrar este tipo de estrellas ya que, con líneas débiles de emisión no hubiera sido fácil encontrarlas por métodos espectroscópicos (eg. Appenzeller y Mundt 1989).

En la mayoría de las ETT se encuentra que las líneas de Balmer y las de CaII tienen perfiles tipo P-Cygni. Dichos perfiles presentan dos componentes: a) uno de emisión (corrida hacia el rojo); b) uno de absorción (corrida hacia el azul). El perfil P-Cygni que se nota en las líneas de las estrellas T Tauri se interpreta como la presencia de vientos que salen de la estrella. Estos vientos presentan velocidades de entre 100-300 km/s y pérdidas de masa de aproximadamente $10^{-8} M_{\odot}/\text{año}$.

Mapas de radio de CO, muestran que hay material que está siendo desplazado hacia afuera, más aún, dicha eyección es bipolar (e.g. Rodríguez 1989); ésto se puede interpretar como debido a la presencia de un disco (el cual está en el plano del ecuador de la estrella) que orbita a la estrella T Tauri, dicho disco bloquea el flujo saliente en la dirección ecuatorial, canalizándose así el flujo (o chorro) hacia los polos.

A algunas de las ETT se les asocian jets supersónicos, que son flujos de gas supersónico que producen ondas de choque al interactuar con sus alrededores.

Varios objetos HH reflejan la luz de la estrella cercana, la cual presenta las mismas características de una estrella T Tauri.

1.2.3 JETS OPTICOS.

Un jet óptico es material eyectado a altas velocidades con una distribución alargada y angosta, se cree que se forma a partir de vientos estelares de estrellas jóvenes tipo T Tauri. Los jets ópticos presentan una buena alineación con la fuente. (Ver Figuras 1.5 y 1.6).

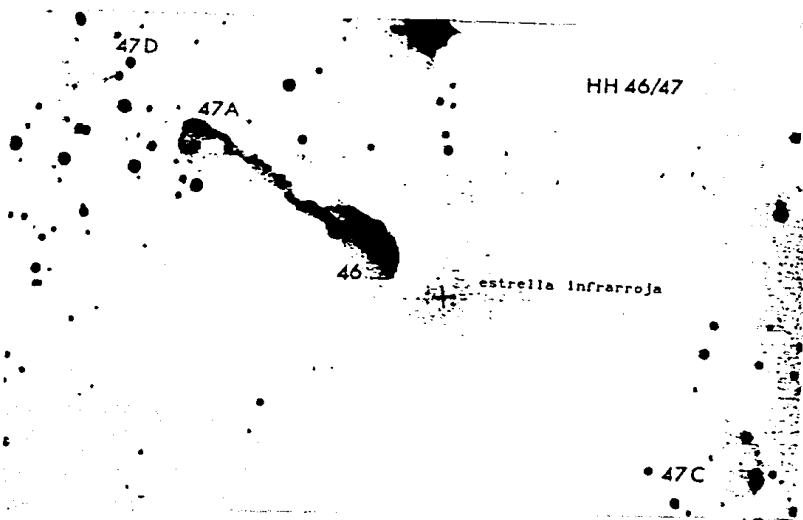


Figura 1.5 Imagen CCD del objeto HH46/47 que emerge de una estrella infrarroja embebida en la nebulosa. La imagen fué tomada utilizando un filtro [SII]. Tomada de Reipurth (1989).

Se conocen alrededor de 20 chorros o jets ópticos, éstos están estrechamente relacionados con los objetos HH, ya que morfológicamente los objetos HH y los jets están conectados entre sí, además el espectro de ambos es muy similar. Los objetos HH más espectaculares que están relacionados con jets ópticos son HH34 y HH111. (Ver Figura 1.6).

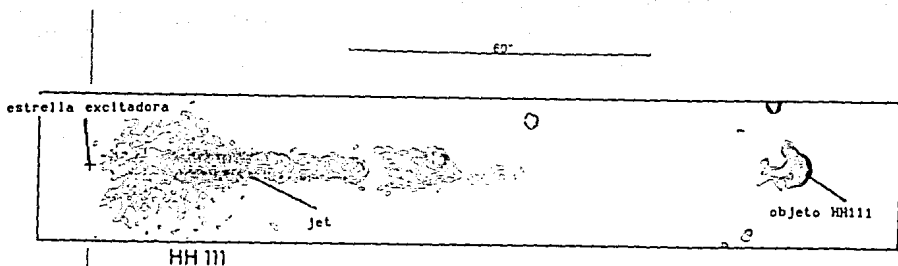
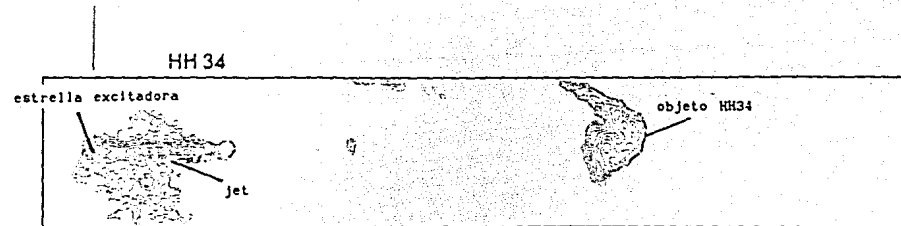


Figura 1.6 Jets de los objetos HH34 y HH111, Ambas son imágenes CCD, tomadas con el filtro [SII]. Si se extiende una línea en sentido opuesto de la estrella excitadora, se puede notar que en esa línea se encuentran los objetos HH. (Reipurth 1989).

En sus estructuras se presentan una serie de nudos brillantes separados por nebulosas mucho más débiles, en el óptico sólo se aprecian unos cuantos nudos. Los nudos a lo largo del jet se interpretan como ondas de choque internas.

En la punta del jet se encuentra el nudo más brillante en forma de arco, se cree que los objetos HH pudieran ser la zona de interacción con el medio ambiente del jet, ya que se han observado objetos HH en forma de arco.

Las características principales de los jets ópticos son que:

- i) Los jets son nudos brillantes que están casi equidistantes.
- ii) Se encuentran alineados con fuentes infrarrojas.
- iii) Los largos de los jets que se han podido determinar están entre 10^{17} - 10^{18} cm.
- iv) Los radios miden alrededor de 10^{15} - 10^{16} cm.
- v) Las velocidades radiales son de aproximadamente 400 km/s.
- vi) Las velocidades tangenciales son de aproximadamente 300 km/s.
- vii) Las temperaturas asociadas a los jets son de alrededor de 10^4 K.
- viii) Las densidades electrónicas de los jets están en el intervalo que va de 10^2 - 10^4 cm^{-3} .
- ix) Las fuentes asociadas a los jets tienen las características de una estrella T Tauri con una luminosidad de entre 1 y 10 L_{\odot} .

Estas tres componentes (nubes moleculares, estrellas T Tauri y jets ópticos) que están relacionadas con los objetos Herbig-Haro se han estudiado en diferentes longitudes de onda, así poco a poco se han ido teniendo ideas más completas acerca del origen de los objetos HH. Ya que estas componentes son fundamentales para el estudio del origen y evolución de los objetos, se mencionarán en los próximos capítulos.

1.3 ESTUDIO DE LA MORFOLOGIA DE LOS OBJETOS HH59 Y HH62.

Los objetos HH59 y HH62 estudiados fueron descubiertos por B.Reipurth y J.A.Graham (1988), junto con otros objetos en la nube molecular de Orión. Los autores tomaron imágenes directas con un detector CCD, utilizaron un filtro de [SII]. Las coordenadas de dichos objetos son:

	Alfa(1950)	Delta(1950)
objeto HH59	5 ^h 29 ^m 52 ^s	-6° 31' 09''
objeto HH62	5 ^h 33 ^m 47 ^s .5	-7° 12' 51''

En febrero de 1990, en el observatorio de San Pedro Mártir con el telescopio de 2-m, el Dr. Claudio Firmani y la M. en C. Julieta Fierro tomaron una serie de imágenes directas de los objetos HH59 y HH62 usando los filtros fotométricos V, I, R con el fin de estudiar la morfología de dichos objetos HH.

Las características de los filtros utilizados son las siguientes:

Banda	$\lambda_{ef}(\text{Å})$	Ancho de banda (Å)
V	5750	1400
R	6340	400
I	8040	1660

Donde λ_{ef} es la longitud de onda efectiva.

Para obtener las imágenes se utilizó un detector CCD de 384 x 576 pixeles.

Las imágenes de los objetos se redujeron parcialmente (es decir, que no se sacaron datos cuantitativos de las observaciones) en una computadora SUN con el programa IRAF. Para dicha reducción parcial se utilizaron los siguientes elementos:

- i) Campos planos para cada uno de los filtros, con diferentes tiempos de exposición (ver Tabla 1.1).
- ii) Imágenes CCD de los objetos HH59 y HH62 con tiempo de exposición de 600 segundos para cada filtro.
- iii) Bias.

Las imágenes digitalizadas que se obtienen directamente de las observaciones están afectadas por las características del CCD. El CCD utilizado no es perfecto. Es decir, todas las imágenes digitalizadas presentan una respuesta no uniforme a diferentes

posiciones de los píxeles. Debido a ésto se tienen que quitar los efectos de inhomogeneidad de respuesta y el ruido intrínseco del detector CCD de las imágenes observadas. Para dicho procedimiento se utilizan los campos planos y el bias.

El campo plano se obtiene tomando una imagen CCD de una pantalla iluminada con luz homogénea. Esto se hace para cada uno de los filtros. Se utiliza para quitar los efectos de inhomogeneidad de respuesta del detector CCD en la imagen que se quiere procesar.

El bias se obtiene tomando una imagen CCD con el detector tapado y con "cero segundos" de exposición. Se utiliza para quitar el ruido intrínseco del detector (como el ruido térmico) en la imagen que nos interesa.

El proceso a seguir para tener imágenes que no estén "afectadas" por el detector es el siguiente:

Primero a cada una de las imágenes y a los campos planos se les resta el bias. Posteriormente se dividen las imágenes pixel por pixel, por los campos planos iluminados uniformemente, tomados con el mismo filtro.

Las mejores imágenes después de la reducción parcial fueron las que se tomaron con el filtro R. Las imágenes tomadas con los filtros I y V eran demasiado débiles; así, el estudio morfológico de los objetos se limitó a las imágenes tomadas con el filtro R.

Aún tomando el mejor filtro, se necesitó hacer un procesamiento sencillo de imágenes para resaltar a los objetos HH. Parte del proceso que se aplicó a las imágenes de los objetos HH59 y HH62 se basó en el proceso de imágenes que hicieron Rodríguez et al. en 1989. Ellos estudiaron algunas placas rojas digitalizadas obtenidas en Monte Palomar. Se dieron cuenta que si a la imagen digitalizada se le suavizaba (convolucionaba con una gaussiana, ver Apéndice 1), revelaba la presencia de dos nebulosidades que morfológicamente se podrían clasificar como objetos Herbig-Haro.

El proceso aplicado a las imágenes de los objetos HH59 y HH62 consistió en lo siguiente:

Primero se convolucionó la imagen con diferentes funciones gaussianas con anchos totales a media altura (FWHM) de 2 a 10 píxeles. Posteriormente, tomando la mejor imagen convolucionada (con una gaussiana de FWHM de 3), se midió la intensidad máxima y mínima del objeto HH.

Por último tomando el límite de la intensidad máxima y mínima del objeto HH, se limitaron los valores de despliegue mejorando la imagen de manera razonable, pero solamente la del objeto HH 59, pues dicho proceso no funcionó para el caso del objeto HH62.

Otro problema importante que apareció en ambas imágenes, fué que se registró un gradiente en el fondo, el cual impidió que el proceso de imágenes fuera más eficiente de lo que se esperaba. El gradiente puede aparecer debido a que únicamente se tenía un campo plano para cada filtro, o a alguna fuente contaminadora de luz. Algunas de las imágenes se muestran a continuación. (Ver Figuras 1.8 y 1.9).

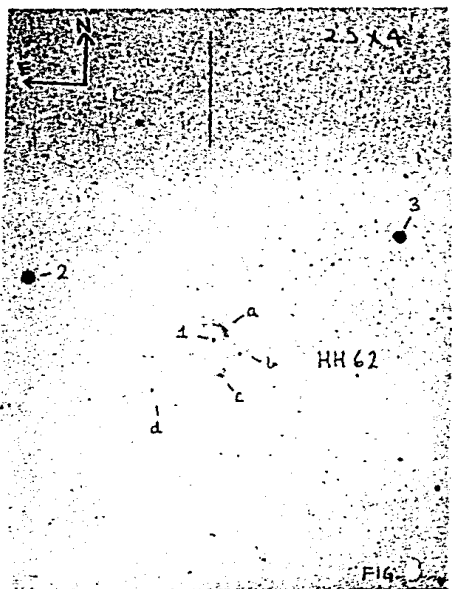
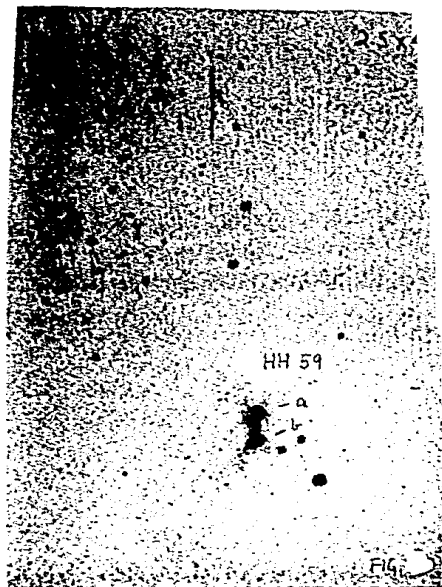
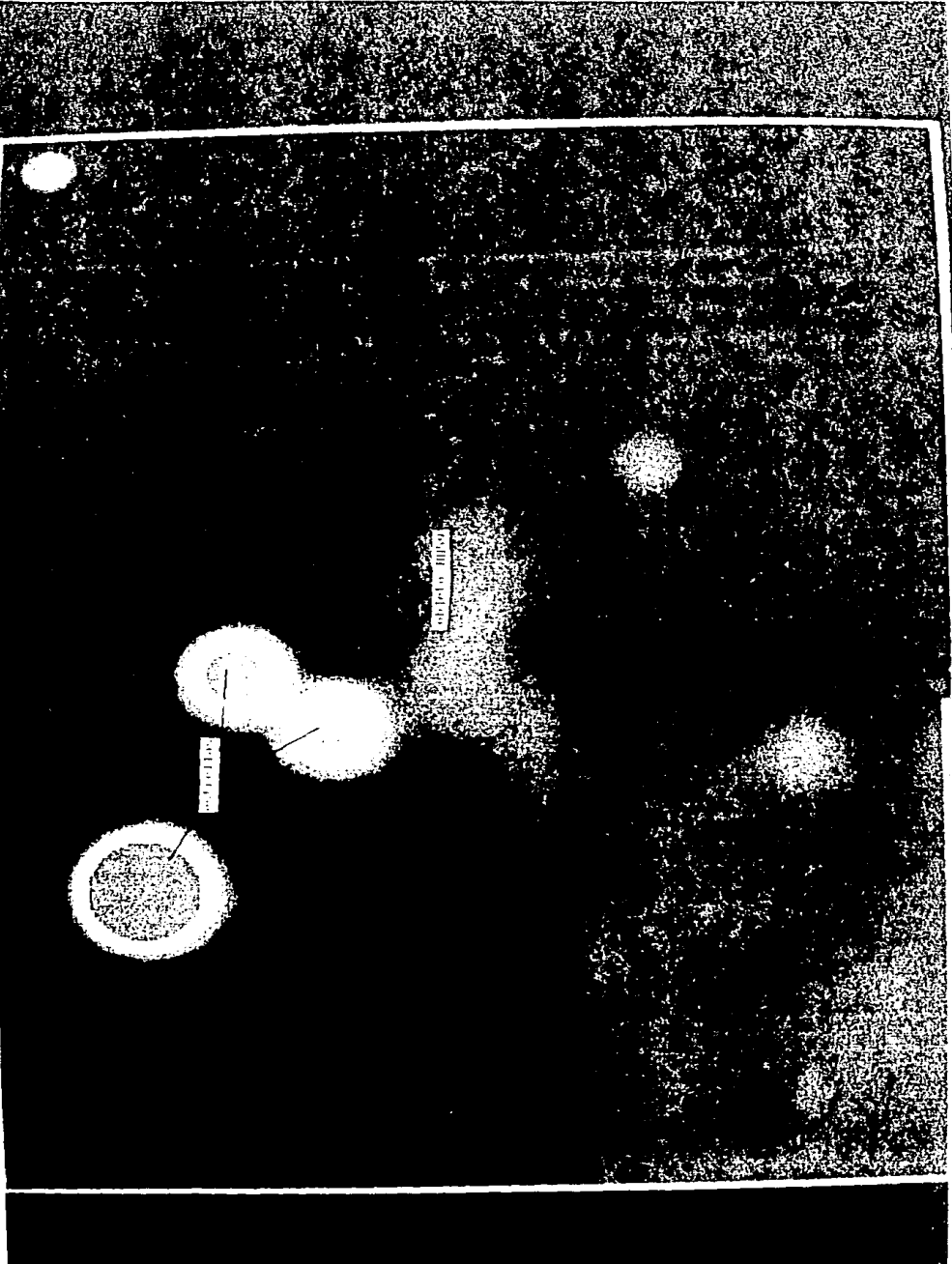
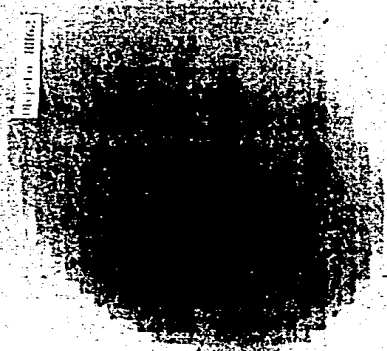


Figura 1.7 Imágenes de los objetos HH59 y HH62, tomados con el filtro [SII]. Reipurth y Graham 1988.



01-11-11

01-11-11



objeto III62



Figura 1.9 Imagen del objeto III62, constituido por pequeñas nubes. Tomada con un filtro R y convolucionada usando una gaussiana de ancho 5 (pixeles).

Comparando las imágenes de los objetos HH hechas por B.Reipurth y J.A.Graham con el filtro [SII] con las imágenes hechas por C. Firmani y J. Fierro con el filtro R (ver Figuras 1.7, 1.8 y 1.9), podemos estudiar su morfología de una manera muy cualitativa. Ver Tabla 1.1.

TABLA 1.1

FILTRO	R ^a	V ^a	I ^a	[SII] ^b	
				HH59	HH62
TIEMPO DE INTEGRACION DE LOS OBJETOS HH59 Y HH62 (en segundos).	600	600	600	900	1500
TIEMPO DE INTREGRACION DE LOS CAMPOS PLANOS (en segundos).	10	4	20	----	----
LINEAS IMPORTANTES QUE CAEN EN EL INTERVALO DE CADA UNO DE LOS FILTROS	[OI] λ6300 λ6363	[OI] λ6300 λ6363 (NII) λ5755	[CaII] λ7291	[SII] λ6717 λ6731	

a- Características de las observaciones hechas en San Pedro Martir en 1990 por Julieta Fierro y Claudio Firmani.

b- Características de las observaciones tomadas de Reipurth y Graham 1988.

El objeto HH59 es un objeto alargado en forma de arco y tiene aproximadamente 0.5' de extensión en la dirección NS de la nube molecular L1641.

Como se puede observar en la Tabla 1.1, el tiempo de exposición de HH59 fué de 900s para el filtro de [SII] y para el filtro R el tiempo fué de 600s. En el filtro R, el objeto HH59 es menor que en el de [SII]. La líneas importantes que caen en el intervalo del filtro [SII] son [SII] $\lambda\lambda$ 6717 y 6731. Las imágenes de mejor calidad fueron las que se tomaron con este filtro. Esto es debido a que el gas chocado emite preferencialmente en éstas longitudes de onda, y los objetos HH son el producto de una onda de choque (ver Cap. 2). Por otro lado, se puede notar que las líneas importantes que caen en el intervalo de los filtros R y V son [OI] $\lambda\lambda$ 6300, 6330 y las imágenes que se obtuvieron con el filtro R son de mejor calidad que las del filtro V. Esto se puede deber a que el tiempo de exposición del campo plano para el filtro V fué únicamente de 4 segundos. Las imágenes que se obtuvieron para el filtro I eran demasiado débiles y no se distinguía el objeto, únicamente se veían estrellas del entorno del objeto HH. Por lo tanto, como ya se había mencionado, el filtro que se utilizó para el simple proceso de imágenes y para comparar su morfología con la imagen tomada con el filtro [SII], se limitó a la imagen tomada con el filtro R.

En la bibliografía no se ha reportado nada adicional desde que el objeto fué descubierto.

El objeto HH62 al igual que HH59 se encuentra en la nube molecular de Orión. Como ya se había mencionado, el estudio de este objeto al igual que el del objeto HH59 se limitó a los filtros R y [SII] con el fin de analizar sus características morfológicas.

Estudiando al objeto observado con el filtro de [SII] con un tiempo de exposición de 1500s, se pueden apreciar cuatro pequeñas nubes irregulares, mientras que las imágenes hechas con el filtro R con un tiempo de exposición de 600s se aprecian solo tres. El tiempo de exposición del objeto HH62 con el filtro R fué mucho menor que con el filtro [SII], estas pequeñas nubes son más débiles que el objeto HH59 por lo que se debería haber aumentado el tiempo de exposición. Asimismo claramente se puede observar que el objeto HH62 emite más fuertemente en el intervalo del filtro [SII] que en el del filtro R. No se ha encontrado más bibliografía desde que se descubrió dicho objeto.

De dicho estudio podemos concluir que debido a que los objetos tienen espectro característico de un gas chocado, el mejor filtro para estudiar la morfología del objeto es el de [SII], y lo ideal es obtener información usando este filtro con diferentes tiempos de exposición.

También es necesario tomar más campos planos de los objetos estudiados y hacer un promedio de éstos, para que las imágenes sean de mejor calidad. Es útil analizar las observaciones hechas con otros filtros , ya que se puede comparar la morfología del objeto en diferentes intervalos de longitud de onda. En este caso, el filtro más "útil" después del de [SII] fué el filtro R. Además observaciones con este filtro podrían ayudar a encontrar a la estrella excitadora.

CAPITULO 2

OBSERVACIONES DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO

Una de las características del estudio de la astronomía es que las observaciones no se pueden manipular como en un experimento en la Tierra; en astronomía siempre se tienen mediciones indirectas de cualquier objeto que querramos estudiar. En ese sentido la astronomía es una ciencia observacional.

Nuestra principal fuente de información proviene del análisis del espectro electromagnético de los objetos celestes, llamado también simplemente espectro. Cada longitud de onda se distingue por su color en la parte visible del espectro. El espectro es la intensidad de radiación en función de la longitud de onda.

La espectroscopia es una de las principales armas con que cuenta la astronomía para analizar y estudiar a los objetos celestes.

Ya que nuestro tema de interés son los objetos Herbig-Haro, se explicarán en este capítulo las observaciones de éstos, en las diferentes longitudes de onda, así como algunos parámetros físicos de los objetos y criterios para identificar a la fuente excitadora de estos objetos.

2.1 OBSERVACIONES DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO EN EL OPTICO.

2.1.1 APARIENCIA.

En el capítulo 1 se expuso la morfología de los objetos HH en el óptico, se presentaron también imágenes directas de los objetos HH59 y HH62 hechas con un detector CCD.

El catálogo más actualizado de los objetos HH es el de Von Hippel (1988). En el cual se presentan alrededor de 180 objetos HH con sus principales características. Sin embargo, cada día, se descubren nuevos objetos HH por diferentes métodos y en diversas longitudes de onda.

2.1.2 ESPECTRO.

El espectro de los objetos HH (eg. Schwartz 1983) está dominado usualmente por líneas de emisión de la serie de Balmer, y presenta líneas de baja, media o alta excitación. En los espectros de emisión de baja excitación se presentan líneas tales como [OI], [SII], [NI], [FeII], en los espectros con emisión moderada se observan, por ejemplo, [OII] y [NII] y en los de alta excitación se presentan líneas fuertes de [OIII]; en muchos casos el continuo es muy débil y a veces indetectable.

El espectro de los objetos HH es muy peculiar y ha sido el criterio para definirlos.

Cualitativamente los objetos HH presentan las mismas propiedades espectrales pero cuantitativamente se dividen en dos grupos (Cantó 1985) que son (ver Tabla 2.1):

- i) Objetos HH de alta excitación; son aquellos cuyo espectro presenta mayor intensidad en las líneas de alta excitación como [OIII].

- ii) Objetos HH de baja excitación; son aquellos cuyo espectro presenta mayor intensidad en las líneas de baja excitación como [OI] y [SII].

En la Tabla 2.1 se muestran las intensidades de los objetos HH1, HH2H y HH2G de alta excitación y los objetos de baja excitación HH7, HH46 y HH120. Dichas intensidades están normalizadas con respecto a H_{α} .

TABLA 2.1
OBJETOS HH DE ALTA Y BAJA EXCITACION

ION	λ	HH1 ^a	HH2H ^a	HH2G ^a	HH7 ^b	HH46 ^c	HH120 ^d
[OI]	6300	43.4	33.9	---	90.3	69.5	101.3
[OI]	6363	17.8	7.1	5.0	7.4	24.2	32.2
[SII]	6717	31.1	8.2	3.2	282.3	101.0	119.6
[SII]	10336	4.4	1.6	1.9	5.9	---	---
[SII]	4069	25.1	12.5	10.3	26.5	10.8	16.2
[OIII]	5007	14.8	26.7	11.0	2.2	0.4	0.3
[CaII]	7291	10.9	7.2	10.2	17.6	23.2	25.6
[NII]	6563	42.9	51.6	7.3	5.2	14.0	15.5
H _{β}	4861	37.6	30.2	20.5	22.3	18.1	14.9
H _{α}	6563	100	100	100	100	100	100

a- Böhm y Siegmund (1976).

b- Böhm (1983).

c- Dopita (1978).

d- Peterson (1984).

En las Figuras 2.1 y 2.2 se presentan ejemplos de espectros de alta y baja excitación de algunos objetos HH.

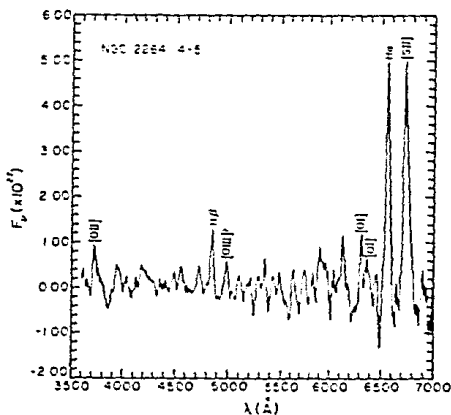


Figura 2.1 Espectro del objeto HH14-5 de baja excitación. (Adams et al 1979).

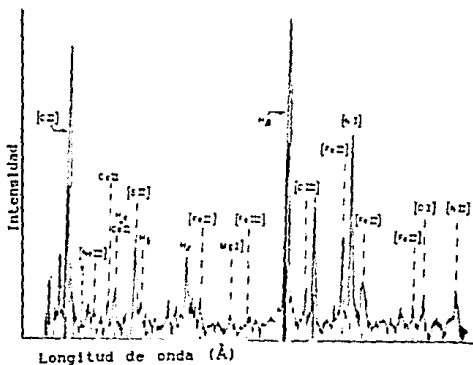


Figura 2.2 Espectro del objeto HH1 de alta excitación. (Schwartz 1976).

Desde que los objetos HH fueron descubiertos, se trató de entender su origen y evolución de diferentes formas, una de ellas fué analizando sus espectros, otra fué comparando sus espectros con los de otros objetos: como estrellas, regiones HII, remanentes de supernova. Como se habían estudiado los espectros de otros objetos, se podría tener una idea más completa sobre el mecanismo de excitación de los objetos HH.

No fué sino hasta 1975, cuando Schwartz (1975), después de que se descartaran varios mecanismos de excitación, como la fotoionización, hizo notar que el espectro de una remanente de supernova era muy similar al de los objetos HH. Este hecho sugiere que la excitación de los objetos HH se debe a choques, como ocurre en las remanentes de supernova, aunque las energías y los procesos involucrados sean muy diferentes. Se piensa que los objetos HH se originan por la interacción del viento estelar supersónico de una estrella joven con el material de su entorno.

En 1979 Shull y Mc Kee (1979), hacen una comparación entre las intensidades observadas de las líneas [OI], [OII], [NI], [NII], [SII] y H_{α} en remanentes de supernova, objetos HH (regiones chocadas) y en regiones HII (regiones fotoionizadas). Esta comparación se puede ver en la Tabla 2.2 y en las Figuras 2.3 a, b y c.

TABLA 2.2

Razones de líneas de emisión en nebulosas. ^a

Líneas	O I	O II	O III	O III	NI	N II	S II	S II	H _α
	6300+	3726+	7320+	4363/ (4959+ 5007)	5195+	6548+	4069+	6717+	6563
	6363	3729	7330		5200	6584	4076	6721	
$n_e(T = 10^4 \text{ K})^b$	1(6)	3(3)	6(6)	7(5)	2(3)	5(4)	4(6)	6(3)	
Regiones fotoionizadas.									
η Car (HII)	1	155	3	0.004	<1	59	<1	24	316
Ori (HII)	1	204	6	0.003	1	95	2	24	282
NGC 7662 (PN)	<1	13	2	0.01	<1	12	1	1	258
posibles regiones chocadas.									
N49 (SNR)	167	648	—	0.05	5.3	108	36	362	296
Cygnus Loop (SNR)	62	1300	52	0.06	—	345	19	234	308
H III ^c	61	186	—	—	4.5	151	67	191	266
HH43S	630	—	—	—	160	184	122	1235	720
Burnham's Nebula	171	171	—	—	22	189	67	277	340
NGC 1502	199	800	40	0.06	20	400	45	201	286
modelo de choque.									
$v_s = 30 \text{ km s}^{-1}$	42 ^d	196	8.4	0.01	34 ^d	123	10 ^d	151 ^d	346
$v_s = 120 \text{ km s}^{-1}$	242	855	41	0.04	170	395	46	601	298

a- Todas las intensidades de líneas están escaladas a $H\beta=100$

b- La supresión por colisiones de la línea es importante arriba de la densidad crítica n_{cr} ; $1(6) = 1 \times 10^6$.

c-[O III] λ 3726 + 3729 y [S II] λ 6716 + 6731 son debilitadas colisionalmente.

d- v_s es la velocidad de la onda de choque. Todas las razones de líneas tienen un mínimo de $v_s=80 \text{ km/s}$.
 $n_e = 10 \text{ cm}^{-3}$.

Tabla 2.2 Tabla comparativa entre regiones chocadas y fotoionizadas. (Shull y Mc Kee 1979).

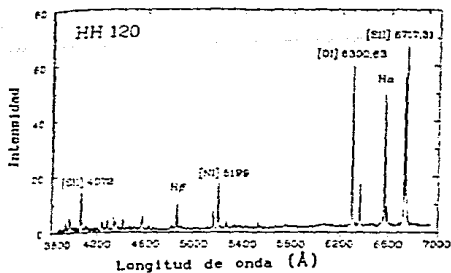


Figura 2.3 a) Espectro de objeto HH de baja excitación. (región chocada).

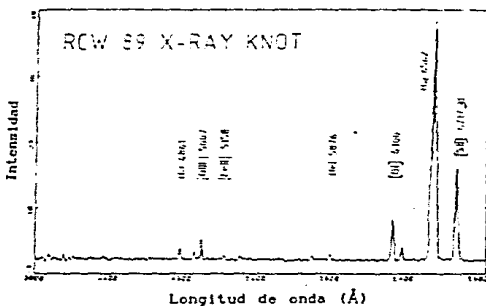


Figura 2.3 b) Espectro de una remanente supernova. (región chocada).

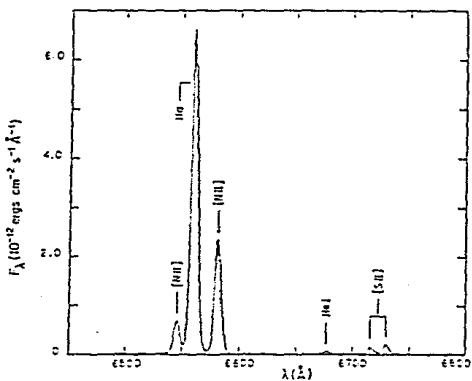


Figura 2.3 c) Espectro de una región HII. (Región fotoionizada). Sánchez y Peimbert (1991).

A partir del análisis de la Tabla 2.2, Shull y Mc Kee hacen notar que las regiones fotoionizadas muestran líneas muy débiles de iones de baja excitación (también ver Figura 2.3 c), como [OI], [OII], [NI], [NII], [SII] y [CaII] (comparado con H α) mientras que en las regiones chocadas dichas líneas son mucho más intensas (ver Figuras 2.3 a y b). También hacen notar que el cociente de las líneas de [OIII] $\lambda 4364 / \lambda 4959 + \lambda 5007$ es aproximadamente cuatro veces mayor en regiones chocadas que en regiones fotoionizadas. Esto es una indicación de altas temperaturas en regiones chocadas. Debido a la gran similitud entre los espectros de remanentes de supernova y objetos HH (ver Fig. 2.3 a y b), el modelo más aceptado para explicar a los objetos HH, es que dichas nebulosas son excitadas colisionalmente por ondas de choque. En el capítulo 3 se dará una explicación más amplia del tema.

2.1.3 CONTINUO.

Herbig (1951), detectó un continuo débil en los objetos HH. Schwartz (1975), sugiere que el continuo en los objetos HH puede ser el producto de luz reflejada de la estrella excitadora, mientras que las líneas pueden ser el resultado de una onda de choque que se origina en los mismos objetos HH.

Más tarde se dan a conocer estudios más refinados en longitudes de onda que están comprendidas entre $3300 < \lambda < 7000 \text{ \AA}$, y se notó que existe un incremento en el flujo del continuo conforme disminuye la longitud de onda en los objetos HH, es

decir, tienen un continuo incrementado del azul al ultravioleta. Dicho estudio desencadenó gran incertidumbre, ya que, el comportamiento del continuo descubierto, no se podía explicar simplemente con la reflexión de la estrella excitadora.

Dopita (1981), nos muestra que este exceso azul-ultravioleta puede ser debido a la emisión de dos fotones (llamada 2q) del hidrógeno excitado colisionalmente más emisión libre-ligado (Balmer y Paschen). En la Figura 2.4 podemos visualizar lo anterior.

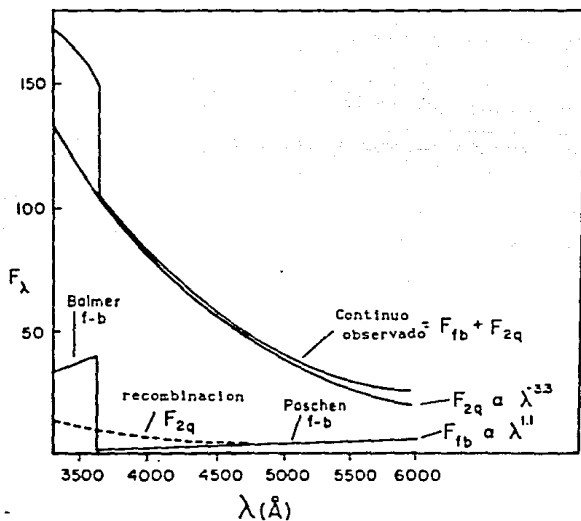


Figura 2.4 Esquema del continuo azul-ultravioleta en objetos HH. (Schwartz 1983).

Recordemos que:

i) La emisión libre-ligado del hidrógeno se da por la recombinación de electrones con iones H^+ , lo que da como resultado átomos de H^0 en el estado base o en estados excitados; ocurriendo en este último caso la subsecuente emisión por decaimiento en cascada.

ii) La emisión de dos fotones del hidrógeno a partir del nivel 2^2S del H^0 , se da mediante la creación de un nivel virtual P cuya energía está entre los niveles 2^2S y 1^2S . Así, se emiten dos fotones con energías bien definidas. El nivel 2^2S es poblado por recombinaciones directas y decaimientos en cascada.

La suma de las energías de los fotones debe cumplir que $h\nu' + h\nu'' = h\nu_{12} = h\nu(L\alpha) = 10.2 \text{ eV}$.

Más tarde, Dopita (1982), nos muestra que los objetos HH de baja excitación, tienen continuos relativamente más intensos en la región azul - ultravioleta, que los objetos de alta excitación.

2.2 OBSERVACIONES EN EL ULTRAVIOLETA DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO.

Orotolani y d'Odorico (1980), descubrieron que los objetos HH radiaban en el ultravioleta. Una de las características más sorprendentes de los objetos HH es que radian en el ultravioleta. Actualmente el International Ultraviolet Explorer (IUE) ha sido una herramienta fundamental en el estudio de los objetos HH en el UV; hasta ahora se han detectado alrededor de 24 objetos en estas frecuencias.

Observacionalmente, los objetos HH en el UV son muy débiles, el objeto más brillante detectado es HH1 y tiene una magnitud visual de alrededor de 15.7. Debido a ésto, el estudio de los objetos HH en el intervalo UV ha sido difícil.

El enrojecimiento interestelar es importante para determinar la distribución de energía observada en el UV. Después de corregir las observaciones por enrojecimiento, el flujo en el UV (continuo y líneas) aumenta considerablemente. Las intensidades obtenidas dependen de los parámetros físicos y del método que se use para la corrección. Brugel (1989), hizo notar, que la descripción física de los objetos HH, llega a depender más de la corrección de enrojecimiento que de las observaciones o de los modelos de ondas de choque. Debido a esto es importante considerar cómo se determina y se aplica la corrección. Existen varios métodos para hacer ésta. Hasta ahora no ha habido un consenso definitivo para saber cual es el mejor método para determinar la corrección por enrojecimiento en los objetos HH.

Hablaremos en la sección 2.2.1 de las líneas de emisión en el

ultravioleta y en la sección 2.2.2 del continuo en los objetos HH en estas longitudes de onda.

2.2.1 LINEAS DE EMISION.

Los objetos HH en el óptico, como ya se ha mencionado, se clasifican en objetos de alta y baja excitación, esta clasificación también es adecuada para las longitudes de onda en el ultravioleta.

La mayoría de las observaciones han sido hechas en el intervalo de longitudes de onda cortas (OC) λ 1200 - 2000 Å. Pero también existen datos en longitudes de ondas largas (OL) que están entre λ 2000 - 3000 Å.

Los objetos HH de alta excitación muestran líneas de CIV 1550 Å, CIII] 1908 Å, CII] 2326 Å y MgII 2800 Å. Por ejemplo los objetos HH1 y HH2 (Ver Figura 2.5).

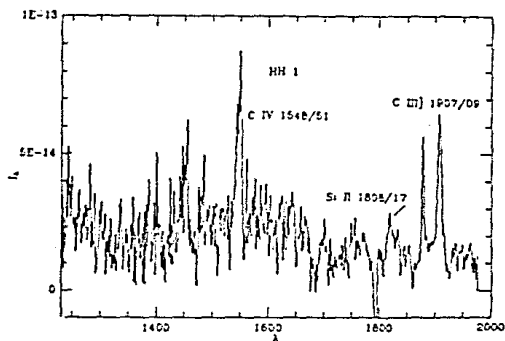


Figura 2.5 Espectro del objeto HH1 en el ultravioleta. (Brugel 1989).

Los objetos HH de baja excitación no muestran líneas atómicas fuertes en el ultravioleta, pero presentan emisión fluorescente de H₂.

Existen objetos HH, muy especiales en estas longitudes de onda. Por ejemplo, después de corregir por enrojecimiento al objeto HH2H, la razón de radiación en UV (continuo y líneas) en 1200-3000 Å, a la emisión en el óptico 3500-11000Å es de 9:1. Estas diferencias se han se pueden deber a diversas razones (eg. Brugel 1989) como:

- i) Que los objetos tengan una fuerte radiación intrínseca en el ultravioleta.
- ii) Que la extinción en el ultravioleta sea mucho menor que en el óptico.
- iii) Que la extinción obtenida sea el resultado del uso de una inapropiada curva de extinción.

Por ejemplo, utilizando una curva no estandar como la de θ Ori, (Böhm et al 1982) obtiene resultados en los que la emisión ultravioleta es menos intensa, pero aún ésta sigue siendo mayor que en el óptico.

2.2.2 CONTINUO.

En el ultravioleta, el continuo presenta un exceso hacia longitudes de onda cortas, este incremento obligó a establecer un mecanismo para explicar esta "anomalía". Como se mencionó anteriormente, existe también un exceso de continuo en la parte azul del espectro óptico, debido muy probablemente a la emisión de dos fotones del hidrógeno neutro excitado colisionalmente, junto con emisión libre-ligado.

También se mencionó que observacionalmente los objetos HH en el ultravioleta son muy débiles, debido a esto se necesita mucho tiempo de observación (hasta 12 horas para los objetos más brillantes) para obtener buenos espectros. La baja razón señal a ruido de dichos espectros, nos impide estudiar de manera exacta el continuo, sin embargo cada vez se obtienen mejores mediciones.

Los estudios de la distribución del continuo en los objetos HH1 y HH2, nos dicen que ambos tienen un pico de intensidad entre 1570 Å y 1580 Å. Debido a esto se cree que el continuo se debe, al menos parcialmente, a la emisión de dos fotones, aunque el pico de intensidad no aparezca en 1410 Å como se espera. (Ver 2.1.3).

Después de grandes esfuerzos para explicar el comportamiento del continuo, se cree que el continuo en el ultravioleta en el intervalo de λ 1200-2000 Å (OC) es probablemente debido a la combinación de emisión de dos fotones de HI con el continuo fluorescente H₂. En el intervalo de λ 2000-3000 Å (OL) el continuo es debido únicamente a la emisión de dos fotones.

2.3 ESTUDIOS EN EL INFRARROJO DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO

En esta sección se estudiará primero a la estrella excitadora de los objetos HH, ya que se detecta en estas longitudes de onda. Posteriormente se discutirá la emisión observada de la molécula de H₂ en algunos de los objetos HH.

La estrella excitadora de los objetos HH siempre ha sido uno de los principales temas de interés en el estudio de estos objetos. En la mayoría de los casos dicha estrella es invisible en el intervalo óptico. Y esto dificultó el entender el origen y evolución de los objetos HH. En 1974, Strom *et al.* (1974) se dieron cuenta que la estrella excitadora de los objetos HH se detectaba en el infrarrojo y casi nunca en el óptico, ya que la estrella sufre una fuerte extinción debida a la nube molecular asociada al sistema.

La estrella excitadora asociada a los objetos HH, no coincide espacialmente con éstos, sino que está desplazada típicamente de 0.1 pc. Esto ha desencadenado problemas para identificar cuál es la estrella excitadora; por esta razón se tienen diferentes criterios para localizar a dicha estrella. Estos criterios los veremos en la sección 2.6.

La primera estrella que se detectó en el infrarrojo (en $5 \mu\text{m}$ y $12.6 \mu\text{m}$) fué la estrella asociada al objeto HH100 que está a 0.01 pc al noreste del objeto. Dicha estrella era consistente con las características de las estrellas T Tauri y presentaba una extinción de 15 magnitudes en el visual debido a que está embebida en una nube molecular.

Generalmente la estrella excitadora asociada a los objetos HH es una estrella tipo T Tauri enrojecida de 20 a 30 magnitudes en el visual. En la Tabla 2.3 se enlistan 15 fuentes de energía de algunos objetos HH con sus respectivas luminosidades y tipos espectrales. Esta lista muestra, a grosso modo, el tipo de estrella que predomina como estrella excitadora. De la Tabla 2.3 podemos darnos cuenta de que las estrellas tipo T Tauri y las estrellas Tipo FUOrí están relacionadas con la excitación de los objetos HH, ambas estrellas son jóvenes y presentan vientos estelares fuertes.

TABLA 2.3*

Objeto HH	Nombre de la fuente	Tipo	L/L_{\odot}	Distancia (pc)
HH 1/2	VLA-1		50	460
HH7-11	SSV 13		115	350
HH28/29	L1551 IRS5	FUOri	36	160
HH 30		T Tau	0.2	160
HH 32	AS 353 A	T Tau	6	300
HH 34			45	460
HH 39	R Mon	pec ^a	755	800
HH46/47		T Tau	24	425
HH 55		T Tau	0.3	250
HH 57		FUOri	288	900
HH 83			10	460
HH100/101		T Tau	6	130
HH 111			25	460
	Th 28	T Tau		140
	Z CMa	FUOri	6800	1150

a- Peculiar

* Tomada de Reipurth (1989).

Las estrellas tipo T Tauri, como ya se mencionó en el Capítulo 1 son estrellas que varían erráticamente e incluyen estrellas tipo espectral G, K y M.

Las estrellas tipo FUOri tienen cambios dramáticos de intensidad que pueden ser repetitivos. A este tipo de evento se le caracteriza por un incremento, en el azul, de más de 6 magnitudes,

en un tiempo de 10^2-10^3 días. Presentan fuertes líneas de LiI λ 6707 y tienen un impresionante estructura P Cygni en H α . En este siglo sólo han habido 5 casos de eventos tipo FUOri por lo que se dificulta su estudio.

La estrella excitadora se encuentra algunas veces alineada al o a los objetos HH asociados a dicha estrella y la mayoría de las fuentes tienen luminosidad de entre 1 y 30 L_{\odot} .

Existen casos como el sistema asociado a los objetos HH28 y HH29, en el cual una luminosidad de 30 L_{\odot} es insuficiente para explicar la magnitud del flujo descubierto en CO (radio), por lo que se sugirió que un evento tipo FUOri pudiera ser el responsable de la formación de algún tipo de objeto HH.

Por otro lado, estudios espectrofotométricos (Elias *et al.* 1980) han revelado la presencia de la molécula H₂ en muchos objetos HH. Generalmente la molécula H₂ se detecta en regiones de formación estelar. En este estudio, también se notó que en la mayoría de los objetos HH de baja excitación se ha detectado a la molécula H₂ en el infrarrojo en la línea a 2.12 μ m. En los alrededores de los objetos existe hidrógeno molecular y carencia de hidrógeno atómico.

2.4 OBSERVACIONES DE RADIO DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO Y SUS ALREDEDORES.

En la sección 2.4.1 se hablará de las observaciones en radio continuo que se han hecho de los objetos HH. Hasta ahora se han podido detectar en radio continuo unicamente a los objetos HH1, HH2, HH80 y HH81 ya que los demás objetos HH son muy débiles en esta longitud de onda.

En la sección 2.4.2 se hablará del entorno de los objetos HH detectados en radio, dicho estudio ha sido muy importante para avanzar en el conocimiento del origen y evolución de los objetos HH.

2.4.1 DETECCION EN RADIO CONTINUO DE LOS OBJETOS HH.

Las medidas de radio continuo pueden ser particularmente interesantes, ya que los objetos HH pueden estar fuertemente oscurecidos en el óptico.

Las primeras observaciones exitosas en radio continuo de los objetos HH fueron llevadas a cabo por Pravdo *et al.* (1985). Ellos hicieron observaciones en radio continuo de los objetos HH1 y HH2 y de su fuente central. Estos objetos fueron detectados en 6 cm y se midieron niveles de flujos de 0.55 ± 0.04 mJy y 1.22 ± 0.04 mJy en HH1 y HH2 respectivamente. Los índices espectrales observados fueron -0.2 ± 0.3 en HH1 y -0.2 ± 0.1 en HH2. Debido a los índices

espectrales que presentaron los objetos se deduce que el mecanismo de radiación en radio de los objetos HH es emisión libre-libre de una región ópticamente delgada.

Rodríguez et al. (1990), observaron el continuo de los objetos HH1, HH2 y el de la radio-fuente asociada al sistema (VLA 1). Al observar con una mayor resolución el sistema HH1 y HH2 notaron que la radio-fuente asociada (la llamaremos fuente para simplificar) presentaba una morfología alargada que apuntaba hacia los objetos HH1 y HH2. (Ver Figura 2.6).

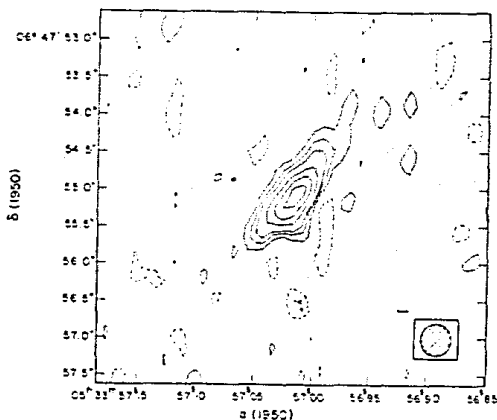


Figura 2.6 Mapa de la radio-fuente central del sistema HH1 y HH2. Mapa del VLA a 6 cm. (Rodríguez et al. 1990).

Rodríguez (1989), definió a los objetos HH clásicos como los que están siendo excitados por estrellas jóvenes tipo solar de baja luminosidad. Los objetos HH1 y HH2 son un ejemplo de los objetos HH clásicos. Estos dos objetos son importantes por varias razones:

- i) Fueron los primeros objetos HH que se descubrieron.
- ii) Son el prototipo de los objetos HH clásicos.
- iii) Son los únicos objetos HH clásicos que se han detectado en radio continuo ya que son muy brillantes.

Los otros objetos HH clásicos son aproximadamente 10 veces más débiles que HH1 y HH2 por lo que es difícil detectarlos en radio continuo.

Los objetos HHS0 y HHS1 son objetos que están siendo excitados por fuentes jóvenes más masivas que los objetos HH clásicos. Se cree que existen más objetos HH de este tipo pero hasta ahora no se ha tenido la certeza de haberlos detectado. Dichos objetos se podrían detectar en radio más fácilmente que los objetos HH clásicos.

Los objetos HHS0 y HHS1 pertenecen a un mismo sistema. Éstos se detectaron en radio continuo en 6 cm por Rodríguez y Reipurth (1989). Por otro lado en el óptico se observó que los objetos tienen anchos de líneas de 700 km/s. En el infrarrojo se observó su fuente asociada llamada IRAS 18162-2048 cuya luminosidad es de $10^4 L_{\odot}$. Dicha estrella coincide con una fuente alargada detectada en radio.

Gracias a las observaciones en radio hechas al sistema HHS0 y HHS1, se notó que la fuente excitadora presenta morfología elongada que apunta hacia los objetos HH. Dicha morfología es muy similar a la fuente asociada de los objetos HH1 y HH2. Sin

embargo, el tamaño angular de la fuente de los objetos HH80 y HH81 es de 2' (aproximadamente 1 pc) mientras que la fuente asociada al sistema HH1 y HH2 tiene solo algunos segundos de arco de tamaño angular (aproximadamente 0.01 pc). La fuente asociada a los objetos HH80 y HH81 se encuentra a 1.7 kpc de distancia mientras que en HH1 y HH2 la fuente está a 460 pc. Los objetos HH80 y HH81 son los objetos más brillantes que se conocen (son intrínsecamente 10 veces más brillantes que los objetos HH1 y HH2).

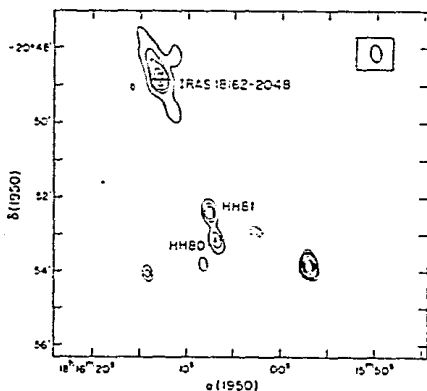


Figura 2.7 Mapa del VLA a 6 cm del sistema HH80 y HH81 y su fuente asociada, IRAS 18162-2048. (Rodríguez 1989).

2.4.2 ENTORNO DEL OBJETOS HH EN RADIO.

El gas molecular se encuentra concentrado en nubes muy masivas, densas y muy frías denominadas nubes moleculares. La distribución de éstas es muy inhomogénea. Las estrellas en formación se encuentran tanto en la periferia de las nubes

moleculares como en el interior de éstas. Ya que las estrellas en formación son opacas a la radiación del visible, debido a que están embebidas en las nubes. Las observaciones en radio de nubes moleculares son particularmente útiles para su estudio. Esta sección se referirá a las estrellas en formación y a las nubes moleculares que están asociadas a los objetos HH.

Se hablará primero de la relación que existe entre los objetos HH y la nube molecular asociada, posteriormente se mencionarán los flujos detectados en radio a diferentes escalas en el entorno de la fuente y de los objetos HH.

Los objetos HH son parte de todo un "sistema" que se encuentra embebido en una nube molecular con densidades inhomogéneas. En las zonas de mayor densidad se encuentran las estrellas en proceso de formación. Las estrellas tienen pérdidas de masa en forma de un viento muy potente (10^{-6} Mo/año). Los vientos de las estrellas en proceso de formación son colimados posiblemente por alguna estructura densa (se cree que es un disco o toroide) que rodea a la estrella. Debido a estos potentes vientos, se cree que se forman los jets ópticos. Por otro lado, conforme los vientos fuertes y colimados se alejan de la estrella interactúan con la nube molecular en la que está embebida; dando origen a los flujos moleculares y a los objetos HH.

a) OBJETOS HH Y SU RELACIÓN CON LA NUBE MOLECULAR ASOCIADA.

Las estrellas en proceso de formación se encuentran en el interior de las nubes moleculares, estas nubes están constituidas de gas y polvo. Por lo que las observaciones en radio son particularmente importantes para estudiar a las estrellas jóvenes.

Como se mencionó antes, las nubes moleculares no tienen densidades homogéneas. Existen varias moléculas que son muy útiles para ayudarnos a estudiar las diferentes densidades de la nube molecular asociada a los objetos HH, como por ejemplo las moléculas de CS (traza regiones de 10^5 moléculas/cm³ aproximadamente), las moléculas de NH₃ (es la molécula con que se traza regiones de aproximadamente 10^4 moléculas/cm³) y las moléculas de CO (traza regiones de aproximadamente 10^2 moléculas/cm³).

Lada *et al.* (1974), observaron regiones que contienen objetos HH con el fin de estudiar sitios de formación estelar en nubes moleculares densas, como la región NGC 1333. Ellos analizaron varias líneas del espectro, como la línea de 1 cm de NH₃, que traza regiones de muy alta densidad, y sugirieron que los objetos HH están asociados a las partes más densas de las nubes moleculares.

Loren *et al.* (1979), estudiaron diferentes objetos HH, comprobando que la fuente IR de éstos tiene asociada una mayor densidad que la de los objetos.

Con una mejor resolución angular que las observaciones previas, Ho y Barret (1980), estudiaron 29 objetos HH, fuentes IR y regiones compactas HII, en la región NGC 1333. Se reportó que hay una relación cercana entre todas las componentes y las zonas de alta densidad en dicha región.

En NGC 1333, como en las demás nubes moleculares, hay fluctuaciones de densidad. Ho y Barret (1980) encontraron que las posiciones de los objetos HH, regiones compactas HII y fuentes IR coinciden con las regiones de alta densidad. Por lo tanto, el hecho de que en el entorno de los objetos HH se hayan detectado líneas de NH_3 , confirma que hay una fuerte conexión entre los objetos HH y las zonas de mayor densidad en la nube molecular asociada.

b) FLUJOS DETECTADOS EN RADIO DEL ENTORNO DE LOS OBJETOS HH.

Rodríguez (1989) hace un análisis de los flujos de gas molecular existentes en las nubes moleculares debidos a la presencia de estrellas en formación. Hace una distinción de 3 regiones principales que nos ayuda a comprender la evolución estelar por medio de estos flujos existentes en la nube. Su división es la siguiente:

1. La primera "región" es la del gas de muy alta velocidad que tiene 100 km/s aproximadamente, es el viento mismo de la estrella, que ha sido acelerado y colimado. Esta colimación es

debida a la presencia de un disco o toroide, que se encuentra alrededor de la estrella y a la nube molecular en la cual la estrella está embebida. Este viento ha sido detectado en HI y CO en la fuente HH7-11.

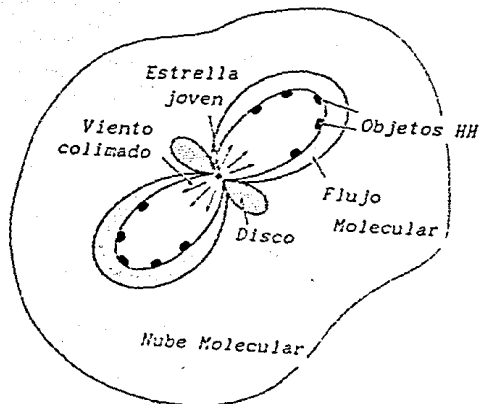


Figura 2.8 Componentes del modelo unificado de Rodríguez (1989).

2. La segunda región la constituyen los gases densos de baja velocidad con dispersiones de alrededor de 1 km/s. Estos movimientos se refieren a los discos o toroides que están rodeando a las estrellas excitadoras de los objetos HH. Estas componentes densas (las llamaremos discos para simplificar) presentan dimensiones de aproximadamente 0.1 pc; los discos nos sugieren que las estrellas asociadas son de formación reciente. Gracias a los discos, existe una fuerte colimación de los vientos de las estrellas. El movimiento de este gas denso se puede medir detectando a las moléculas NH_3 y HCO^+ . Geométricamente esta región

se encuentra perpendicular a la región de muy alta velocidad (primera región).

3. La tercera componente se refiere a la presencia de los gases de alta velocidad de aproximadamente 10 km/s, estos flujos son en general bipolares y se forman a partir del viento estelar de la estrella excitadora. Los flujos se pueden medir en CO. En las orillas de estos flujos se encuentran los objetos HH. En la literatura se les llama flujos bipolares de gas molecular, flujos bipolares de alta velocidad o simplemente flujos bipolares. Posteriormente se hablará de éstos indistintamente.

Ahora ahondaremos más en el análisis de los flujos bipolares de gas molecular, ya que, el estudio más importante inferido por las observaciones en radio del entorno de los objetos HH es quizás el de los flujos bipolares de alta velocidad.

Como se dijo antes, los flujos bipolares de alta velocidad se refieren a gas molecular moviéndose a decenas de km/s, este gas viene de la nube molecular y ha sido acelerado por un viento más rápido y menos masivo que el gas de los flujos.

Los flujos bipolares de gas molecular tienen una velocidad máxima de 45 km/s, un radio de entre 0.03 - 1.2 pc y una masa de entre 0.003 y 23.5 Mo.

Eduards y Snell (1984) hicieron un estudio sistemático para detectar gas molecular moviéndose a altas velocidades cerca de objetos HH. Para detectar dicho flujo usaron la transición

rotacional $J = 1-0$ del CO. Encontraron que el material aparece distribuido en forma bipolar con respecto a la supuesta fuente de energía. Es decir que existe material moviéndose con velocidad negativa (que se acerca al observador) y material moviéndose con velocidad positiva (que se aleja del observador), dicho material aparece en regiones distintas y diametralmente opuestas con respecto a la fuente de energía. Se cree que en general la fuente de energía asociada a estos flujos, es una fuente joven infrarroja de baja luminosidad y baja masa. Aunque también se ha encontrado que existen fuentes jóvenes infrarrojas luminosas y masivas asociadas a este tipo de sistemas, como por ejemplo el sistema asociado a HHS0 y HHS1.

Muchos de los objetos HH se encontraron en los alrededores de los flujos bipolares. El flujo bipolar más conocido es el asociado a L1551 IRS 5, no solo porque es la zona mejor resuelta angularmente, sino también porque las velocidades radiales y las propiedades de movimiento han sido medidas con mayor precisión en esa región. Se encontró que los objetos HH y el gas molecular están moviéndose en el mismo flujo colimado originado por IRS 5 (fuente IR asociada al sistema). En el caso de L1551 IRS 5, las propiedades de movimiento de los objetos HH y el gas molecular de alta velocidad coinciden y ambos son originados por la estrella excitadora del sistema. En las regiones bipolares es impresionante la relación espacial y cinemática entre los objetos. Los objetos HH usualmente están asociados (o se detectan) con el lóbulo que se acerca al observador (debido a la geometría del sistema). (Ver Figura 2.9).

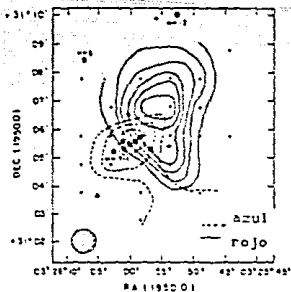


Figura 2.9 Distribución de los lóbulos detectados en CO, de alta velocidad corridos hacia el rojo y el azul. (Snell y Edwards 1981).

Fukui (1989), reporta 144 flujos de alta velocidad de los cuales 120 son bipolares.

Los flujos bipolares y los objetos HH se mueven en la misma dirección. Si se trazan dos líneas en la dirección opuesta a la que los objetos HH se mueven, hasta coincidir con la estrella excitadora, dicha estrella coincide, casi siempre, con el centro de la estructura bipolar. Por lo que se deduce que los flujos bipolares y los objetos HH están estrechamente relacionados.

Rodríguez *et al.* (1989) estudiaron un flujo bipolar detectado en H₁ con el VLA en la región HH7-11.

c) MASERES DE AGUA.

Los máseres de agua se pueden detectar, en regiones donde exista reciente formación estelar. Los máseres de agua necesitan densidades de hidrógeno molecular de 10^7 - 10^{10} cm⁻³ y temperaturas

cinéticas de entre 500-1000 K, estas condiciones se cumplen donde los objetos HH están presentes. Debido a esto, se han hecho mapeos de máseres de agua en diferentes regiones, en dichos estudios se han detectado objetos HH en regiones muy cercanas a máseres de agua, sin coincidir exactamente con éstos. Se notó también que el 15% de los objetos HH están asociados a los máseres de agua.

Existe una correlación entre la molécula NH_3 y el máser de agua ya que ambas requieren altas densidades para existir.

Los primeros en detectar máseres de agua en los alrededores de objetos HH fueron Dickinson, Kojolan y Strom (1974), en los objetos HH 7-11. A partir de ese año y hasta la fecha se han seguido detectando máseres de agua en los alrededores de los objetos HH, lo que ha confirmado que éstos son objetos jóvenes asociados a nubes moleculares densas y por lo tanto a regiones de reciente formación estelar.

Para englobar todas las secciones de este capítulo, se hizo una tabla (Tabla 2.4) que ayuda a tener una visión más general de los objetos Herbig-Haro en relación a los diferentes procesos de emisión en diversas longitudes de onda y su detectabilidad mediante distintas técnicas.

TABLA 2.4

	UV	V	IR	Radio
Å	100	4000	10000	10^6
nm	10^{-18} 10^{-17}	10^{-16}	10^{-15}	10^{-12}
µm			1 10	100
cm			10^{-4}	10^{-1}
m	10^{-9} 10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-3}
Frecuencia (Hz)	10^{16}	10^{15}	10^{13}	10^{10}
Energía (eV)		10	10^{-1}	10^{-2}
Continuo y líneas en objetos HH.	En AE: CIV, CIII], MgII En BE: Fluorescencia H ₂ Cont. aumenta hacia λ cortas	En AE: (OIII] En BE: (SII] Caract. de región chocada. cont. aumenta hacia λ cortas	Presencia de la molécula H ₂ . En 2.12µ	Presencia de radio continuo
tipo de emisión.	OC: cont. de fluorescencia H ₂ y emisión 2 fot. OL: emisión de 2 fot.	cont. debido a: emisión 2 fot y libre-ligado.		emisión libre- libre. oplicamen. delgada.
Detector	IUE	Telescopio CCD	Detector IR	VLA
Ejemplo	HH1 y 2	HH111 y 34	HH1, HH53	HH80

Abreviaturas:

AE: Alta excitación.

BE: Baja excitación.

OC: Longitudes de onda corta.

OL: Longitudes de onda larga.

2 fot: dos fotones.

cont: continuo.

UV: Ultravioleta.

V: Visible.

IR: Infrarrojo.

2.5 PARAMETROS FISICOS DE LOS OBJETOS HERBIG-HARO.

2.5.1 VELOCIDADES RADIALES.

Las velocidades radiales en los objetos HH son grandes y en general negativas, el promedio de dicha velocidad es de -80 km/s o sea que los objetos HH se acercan a nosotros. En la Figura 2.10 se muestra un histograma de velocidades radiales de 46 objetos (Cantó 1984). Se han podido medir muy pocas velocidades radiales positivas, debido a que probablemente la nube molecular impide ver la contraparte de los objetos HH con velocidad radial positiva. El promedio de las velocidades radiales positivas que se ha podido detectar es de 40 km/s.

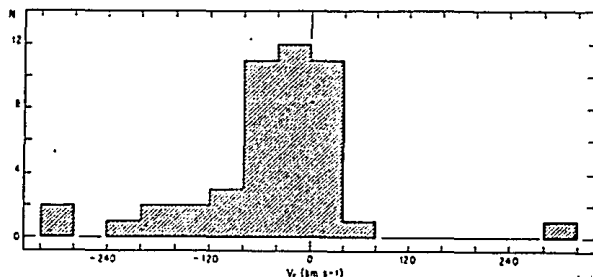


Figura 2.10 Histograma de velocidades radiales de 46 objetos HH. La mayoría de los objetos tienen velocidades radiales negativas. (Cantó 1984).

2.5.2 VELOCIDADES TANGENCIALES

Las velocidades tangenciales en los objetos HH llegan hasta 400 km/s, y en general son mayores que las velocidades radiales, es decir, los objetos HH se mueven, en la mayoría de los casos, sobre el plano del cielo. Otro punto interesante es que los vectores de las velocidades tangenciales de distintas condensaciones de un mismo objeto apuntan, aproximadamente en la misma dirección y están alineados con la estrella excitadora. La Figura 2.11 lo ejemplifica de manera muy clara en el caso de HH1 y HH2.

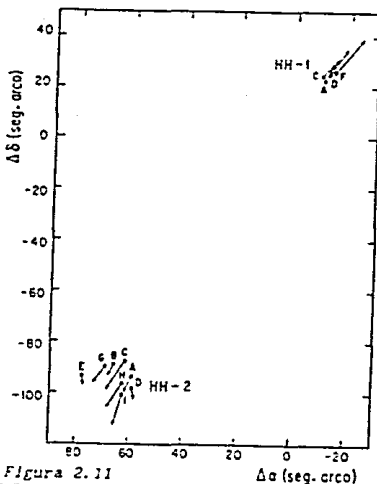


Figura 2.11

$\Delta\alpha$ (seg. arco)

Figura 2.11 Esquema del sistema HH1 y HH2, mostrando los movimientos propios de cada condensación. Los vectores de velocidad de un mismo objeto son casi paralelos. (Cantó 1984).

2.5.3 DENSIDAD Y TEMPERATURA.

En esta sección se hará una tabla comparativa, de la temperatura y densidad entre los objetos HH, regiones HII, y la nebulosa del Cangrejo, la cual es una remanente de supernova. Dichos parámetros se infieren a partir del espectro de los objetos en cuestión.

TABLA 2.5

Objeto	Densidad (cm^{-3})	Temperatura (K)
Regiones HII ^a	$10 - 10^4$	5 000 - 20 000
Nebulosa del Cangrejo ^b	10^3	7 400 - 15 000
Objetos HH ^c	$2 \times 10^3 - 6 \times 10^4$	7500 - 12 000

a y b. Osterbrock 1989.

c. Böhm 1983.

Como podemos observar en la Tabla 2.5, la densidad y la temperatura electrónica en regiones chocadas (nebulosa del cangrejo y objetos HH) son muy similares a aquellas encontradas en regiones fotoionizadas (regiones HII). Sin embargo, los parámetros de las regiones HII tienen un intervalo mucho más amplio, que los de los objetos HH y de la remanente de supernova.

2.5.4 VARIABILIDAD.

Herbig (1973), hizo un monitoreo fotográfico de los objetos HH1 y HH2 para estudiar su variabilidad, Herbig observó variaciones de luz de 2 a 3 órdenes de magnitud en un intervalo de 5 a 10 años en las nubes individuales de los objetos.

En 1976 Böhm y Siegmund hicieron también estudios de variabilidades de los objetos obteniendo resultados importantes como:

Las condensaciones de los objetos HH varían en forma independiente una de otra en un intervalo de 10 años.

Las variaciones de brillo están relacionadas probablemente con las variaciones de los parámetros físicos, como densidad y temperatura de los objetos HH.

2.6. CRITERIOS PARA IDENTIFICAR LA FUENTE DE ENERGIA EN LOS OBJETOS HERBIG-HARO.

Identificar la fuente de energía en los objetos HH ha sido uno de los grandes problemas, ya que la estrella no coincide con los objetos HH, sino que se encuentra en los alrededores de éstos. Debido a dicho problema existen diferentes criterios en distintas longitudes de onda para poder identificar a la fuente de energía. Estos criterios son los siguientes (Cantó 1985):

- i) Proximidad. Se identifica a la estrella más cercana a los objetos HH.
- ii) Movimientos propios. La estrella excitadora coincide con el vector velocidad de los objetos HH si se traza una línea en dirección opuesta a su movimiento.
- iii) Alineamiento. Los objetos HH pueden estar alineados con la posible estrella excitadora.
- iv) Los objetos HH y el flujo bipolar saliente de la estrella tienen una estrecha relación, que puede ser un criterio útil para identificar a la estrella.
- v) En algunos casos los objetos HH presentan polarización en el continuo debido a la reflexión de alguna estrella cercana, dicha estrella puede ser la que excite a los objetos HH. En este tipo de objetos la perpendicular al vector de polarización apunta hacia la estrella excitadora.

vi) Fotografías de los objetos HH en luz de $H\alpha$, [NII] y [SII], revelaron la existencia de filamentos que se extienden del objeto HH, estos filamentos llamados jets altamente colimados, son estructuras útiles, ya que frecuentemente se extienden hasta la posible estrella excitadora.

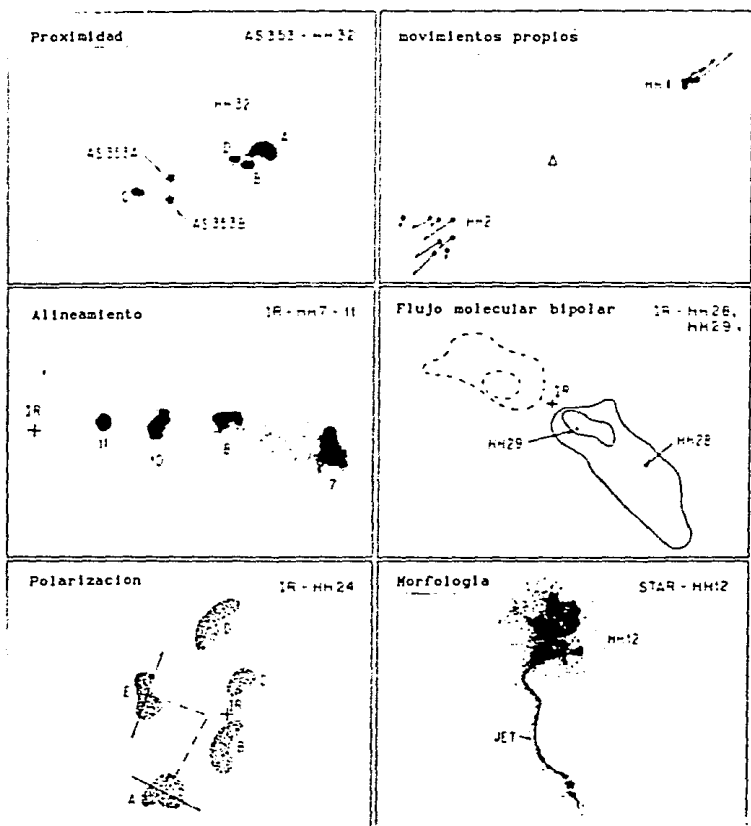


Figura 2.12 Criterios para identificar a la fuente de energía de los objetos HH. (Cantó 1985).

Otro criterio que se ha usado recientemente, es localizar a la fuente de radio continuo asociada al sistema. Dicho criterio fué útil para localizar a la verdadera estrella excitadora del sistema HH1 y HH2 (VLA 1) ya que antes se creía que dicha estrella era la estrella CS. Con este ejemplo, podemos darnos cuenta que no es fácil poder ubicar a la estrella excitadora de los objetos, ya que, a pesar de que el sistema HH1 y HH2 es el más estudiado, 30 años más tarde se detectó a la verdadera estrella.

Estos criterios han sido fundamentales para ubicar a la estrella excitadora; sin embargo hay un gran número de casos en los cuales no existe un concenso general para ubicar a la estrella como a la excitadora de los objetos.

CAPITULO 3

ALGUNOS MODELOS DE OBJETOS HERBIG-HARO

3.1 INTRODUCCION.

Como ya se mencionó en los capítulos anteriores, existen fuertes evidencias de que los objetos HH son el producto de una onda de choque. El principal argumento es la similitud del espectro de los objetos HH con el producido por ondas de choque.

A partir de los años setentas se ha intentado modelar a los objetos HH para explicar los espectros y propiedades descritas en los anteriormente (como son las velocidades radiales y tangenciales, variabilidad, etc). A pesar de que se han desarrollado una gran cantidad de modelos, todavía no existe uno, que pueda englobar a todos los objetos HH y sus propiedades. Debido a ésto Dyson (1987) comenta:

" Los objetos HH deben ser tratados de manera individual y la búsqueda de un modelo universal para todos ellos parece ser una estrategia equivocada."

Así, actualmente en la literatura se encuentran modelos de objetos HH que sólo se ajustan a cierto tipo de objetos (por ejemplo, objetos HH alineados, en forma de proa, jets estelares).

La principal razón de este "problema", es que a los objetos HH se les define de manera espectroscópica (ver Capítulo 2) y por lo tanto cualquier nube chocada puede ser clasificada como objeto HH.

Todos los modelos hasta la fecha coinciden en utilizar ondas de choque como el mecanismo excitador, también consideran a la fuente, que interactúa con el medio circundante para formar a los objetos HH, como una estrella de reciente formación. Los modelos difieren en el mecanismo por el cual el gas que proviene de las estrellas es colimado, así como en la forma y el lugar en que los choques son originados.

Para facilitar el entendimiento de los modelos de los objetos HH se revisarán en la sección 3.2 las principales propiedades de las ondas de choque. Posteriormente en la sección 3.3 se hablará de algunos modelos existentes de objetos HH. Y finalmente en la sección 3.4, se tratará uno con mayor detalle.

3.2 ONDAS DE CHOQUE.

Las ondas de choque se producen cuando se genera una discontinuidad en las propiedades de un fluido. Para que se generen estos brincos o discontinuidades es necesario que el fluido tenga velocidades supersónicas respecto a otro fluido ó a un obstáculo. Los cambios que se producen en las variables del fluido dentro de estas discontinuidades (como temperatura, densidad, etc.) no son reversibles.

Se puede dividir a la onda de choque en tres zonas (ver Figura 3.1):

a) *El frente de choque.* Es la zona en donde las variables del fluido sufren cambios bruscos. Es una zona muy delgada, del orden del camino libre medio entre partículas.

b) *La zona de relajamiento* (también llamada zona de postchoque) es la zona en la que el gas llega poco a poco al equilibrio.

c) *La zona de prechoque.* En esta zona el gas todavía no llega al frente de choque. Este gas se considera que está en equilibrio.

A través del choque:

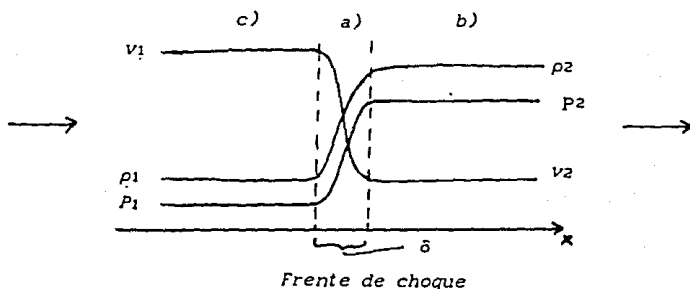


Figura 3.1 Componentes de una onda de choque.

La zona de mayor interés es la zona de relajamiento (b), ya que ahí la temperatura puede subir mucho y se puede ionizar el gas, por lo que esta zona nos da una contribución importante del espectro emitido por el fluido.

Ahora veamos como se comporta un fluido que sufre una perturbación fuerte:

Si nos colocamos en un sistema de referencia en reposo respecto al choque, entonces la densidad, la presión y la temperatura aumentan mucho después del choque, mientras que la velocidad disminuye. Es decir, el gas es frenado, calentado y comprimido al pasar por el choque (ver Figura 3.2).

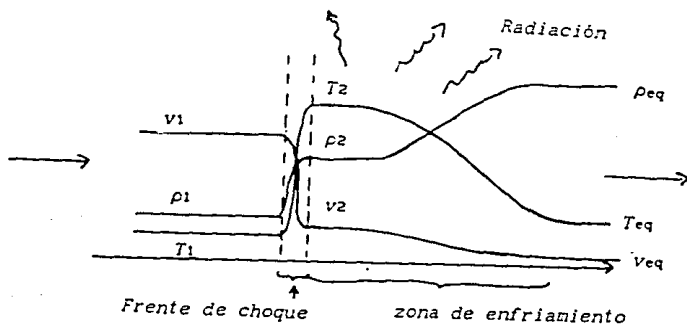


Figura 3.2 Comportamiento de la velocidad, densidad y temperatura al pasar por una onda de choque.

Este comportamiento se deduce analíticamente, si se considera un flujo estacionario, unidimensional y sin pérdidas de energía. Si nos colocamos en un sistema de referencia respecto al choque, entonces se tienen varias cantidades que se conservan.

Las ecuaciones de conservación son las siguientes:

a) Conservación de masa:

$$\rho v = \text{constante.} \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y v la velocidad.

b) Conservación de momento:

$$P + \rho v^2 - \mu \frac{4}{3} \frac{dv}{dx} = \text{constante.} \quad (3.2)$$

Donde P es la presión del fluido, μ es el coeficiente de viscosidad y x es la dirección del fluido.

El primer término de la ecuación 3.2 es el momento térmico, el segundo es el momento cinético y el tercer término es el de la viscosidad, que para ondas de choque es un término importante.

c) Conservación de energía:

$$\rho v \left(h + \frac{1}{2} v^2 \right) - K \frac{dT}{dx} - \frac{4}{3} \mu v \frac{dv}{dx} = \text{constante.} \quad (3.3)$$

Donde

h -- es la entalpía.

K -- es el coeficiente de conducción térmica.

T -- es la temperatura.

ρv -- es el material que circula.

$1/2 \rho v^2 v$ --- es la energía cinética.

El segundo término de la ecuación 3.3 es la conductividad térmica, que depende de el gradiente de la temperatura. El tercer término es la energía de disipación por viscosidad, que depende del gradiente de las velocidades.

Lejos del frente de choque, los gradientes de temperatura y de velocidad son pequeños, entonces las ecuaciones de conservación antes y después del choque son las siguientes:

Conservación de masa:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2. \quad (3.4)$$

Conservación de momento:

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2. \quad (3.5)$$

Conservación de energía:

$$h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} v_2^2. \quad (3.6)$$

El subíndice 1 se refiere a la zona de prechoque, y el 2 a la de postchoque.

Para un gas ideal:

$$h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{kT}{m}. \quad (3.7)$$

Definiendo a:

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ es la razón de calores específicos a presión y volumen constante, que para un gas monoatómico es $\gamma = 5/3$.

m-- es la masa promedio de las partículas.

$M_1 = \frac{v_1}{c_1}$ y $c_1^2 = \gamma \frac{P_1}{\rho_1}$, donde M_1 es el número de Mach, y c_1^2 es la velocidad del sonido adiabático.

Resolviendo las ecuaciones de conservación 3.4, 3.5 y 3.6 y utilizando M_1 y c_1^2 (ya definidas), obtenemos las condiciones de salto a través de ondas de choque de un flujo unidimensional, en estado estacionario y sin pérdidas de energía. (Caso plano-paralelo).

Estas condiciones son las siguientes:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{(\gamma + 1) M_1^2}{(\gamma + 1) + (\gamma - 1)(M_1^2 - 1)}, \quad (3.8)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(\gamma + 1) + 2\gamma(M_1^2 - 1)}{(\gamma + 1)}, \quad (3.9)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{[(\gamma + 1) + 2\gamma(M_1^2 - 1)][(\gamma + 1) + (\gamma - 1)(M_1^2 - 1)]}{(\gamma + 1)^2 M_1^2} \quad (3.10)$$

La importancia de las expresiones 3.8, 3.9 y 3.10 es que la compresión, el aumento de presión y temperatura dependen del número de Mach y del calor específico unicamente.

Analizando casos particulares:

Si $M_1 = 1$ entonces:

$$P_2 = P_1,$$

$$\rho_2 = \rho_1,$$

$$v_2 = v_1 \text{ y}$$

$$T_2 = T_1.$$

En este caso el fluido está en equilibrio antes y después del choque.

Si $M_1 > 1$

$$P_2 > P_1,$$

$$\rho_2 > \rho_1,$$

$$v_2 < v_1 \text{ y}$$

$$T_2 > T_1$$

Entonces hay compresión calentamiento y frenamiento después del choque.

Tomando ahora a $M_1 \gg 1$ y $\gamma = 5/3$ entonces:

$$\rho_2 = 4\rho_1,$$

$$v_2 = v_1/4,$$

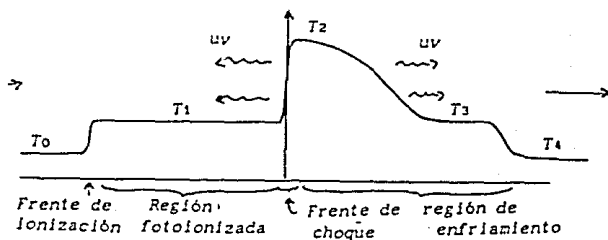
$$T_2 = \frac{2.3 \times 10^5 \text{K}}{1 + \zeta} \left(\frac{V_s}{100 \text{ km/s}} \right)^2, \quad \text{donde } \zeta \text{ es la}$$

fracción de ionización del gas de prechoque y V_s la velocidad del choque.

$$Y \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma}{(\gamma+1)} M_1^2.$$

Luego del choque, el gas alcanza altas temperaturas y puede ionizarse colisionalmente. Detrás del frente de choque la temperatura disminuye debido al enfriamiento y el gas se comprime. Debido a esto, hay recombinación y por lo tanto obtenemos un espectro característico. El tamaño de la zona de emisión y de la zona de enfriamiento depende de la velocidad del choque. Por otro lado, si la velocidad de choque es mayor que 100 km/s (ver Figura 3.3), la zona de enfriamiento genera suficientes fotones ultravioleta para formar una zona de fotoionización frente al choque y para extender la zona de recombinación. Más adelante se vuelve a generar una zona de equilibrio. Cabe hacer notar que la región fotoionizada puede ser muy extendida pero su emisión es aproximadamente 10 veces más débil que la región de enfriamiento.

Esquemáticamente sucede lo siguiente:



$$T_0 = T_4 = 10 - 100 \text{ K.}$$

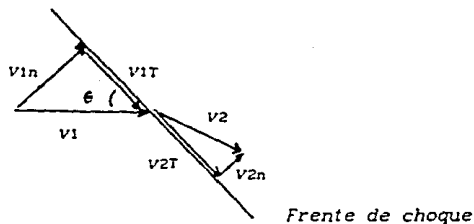
$$T_1 = T_3 = 8 \times 10^3 - 10^4 \text{ K.}$$

$$T_2 = 2 \times 10^5 \text{ K.}$$

Figura 3.3 Comportamiento de la temperatura tomando una velocidad de choque de 100 km/s.

En algunos casos las ondas de choque no son perpendiculares a la dirección del fluido. Estas se llaman ondas de choque oblicuas.

Si se considera una onda de choque oblicua, formando un ángulo θ con respecto a la dirección del fluido, entonces la velocidad del fluido antes del choque, puede ser dividida en una componente tangencial y una normal al choque:



$$v_{2n} < v_{1n} = v_1 \sin \theta = v_s$$

$$v_{2T} = v_{1T} = v_1 \cos \theta$$

Figura 3.4 Componentes de una onda de choque oblicuas.

$$V_T = V_o \cos \theta, \text{ componente tangencial.} \quad (3.11)$$

$$V_n = V_o \sin \theta. \text{ componente normal.} \quad (3.12)$$

A través del choque, la componente tangencial es conservada, entonces la componente tangencial postchoque de la velocidad es $V_T = V_{1T}$.

Si no se tomara en cuenta la componente tangencial de la velocidad a la onda de choque, la región de enfriamiento llegaría a ser idéntica al caso plano paralelo.

Como se vió, la componente normal de postchoque de la velocidad es:

$$V_n = v_0 \sin \theta = v_s. \quad (3.13)$$

Donde v_s es la velocidad del choque.

Por lo que para un fluido con velocidad v_0 (ver ecuación 3.13), es posible obtener ondas de choque con muy diferentes excitaciones postchoque variando el ángulo θ de la onda de choque con respecto a la dirección del fluido. Para choques perpendiculares ($\theta = \pi/2$), se tiene una ionización postchoque determinada completamente por la velocidad total del fluido, mientras que para choques muy oblicuos (θ aprox. cero) se obtiene baja ionización en las regiones de postchoque.

Esta sección está basada principalmente en el curso dado por Jorge Cantó en enero de 1991, en la primera escuela de Astrofísica que se publicará en la revista *Ciencia* en el mismo año. También ver Raga, 1990.

3.3 ALGUNOS MODELOS DE OBJETOS HH.

La mayoría de los modelos de objetos HH se pueden clasificar en tres grupos principalmente:

1. Modelo Explosivo.

Es el modelo propuesto por Gyulbudagyan (1975) y por Dopita (1978). Dicho modelo considera que los objetos HH son

NO DEBE
ESTA TESIS
SALIR DE LA
BIBLIOTECA

el producto de un evento explosivo tipo FUOrí. En este proceso la estrella de baja luminosidad ($10 L_{\odot}$) aumenta su luminosidad de manera muy abrupta hasta alcanzar valores de $10^3 L_{\odot}$ aproximadamente (Fig.3.5). Posteriormente la estrella disminuye su luminosidad rápidamente. Los objetos HH, en este caso, son el resultado de la interacción de material eyectado con el medio circundante. Se han encontrado estrellas tipo FUOrí cerca de HH57.

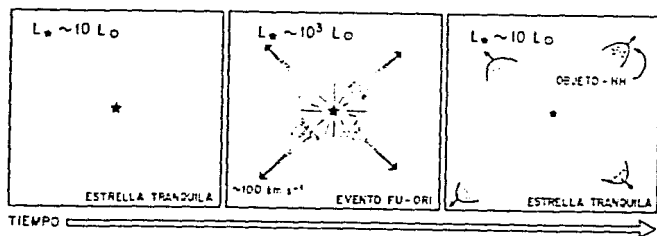


Figura 3.5 Modelo explosivo. Tomada de Cantó (1984).

2. Modelo de Viento Estelar.

a) Modelo de balas interestelares. En este caso se considera una estrella, con un fuerte viento, embebida en un medio molecular inhomogéneo, constituido por pequeñas nubes inmersas en un gas de densidad mucho menor.

El viento de la estrella barre el gas de poca densidad e interacciona con las condensaciones de mayor densidad. Cada condensación representa una onda de choque, todas moviéndose en el mismo medio. Las condensaciones continúan moviéndose y penetran en

la nube molecular circundante. La interacción entre el viento de gas de poca densidad y las nubes ya aceleradas, dan origen a los objetos HH. Este modelo es conocido como el modelo de balas interestelares y fué propuesto por Norman y Silk (1979) y por Rodríguez *et al.* (1980). Un ejemplo es el objeto HH2.

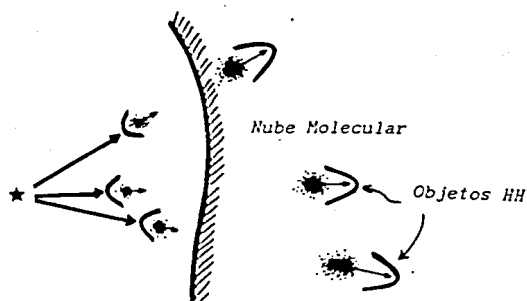


Figura 3.6 Modelo de viento estelar.

b) Modelo de viento canalizado. En este tipo de modelo, se propone que el mecanismo canalizador se forma por la interacción de un viento con un disco denso de material molecular que estuviera rodeando a la estrella.

Ejemplos de este tipo de modelo son el de Cantó (1980), Cantó y Rodríguez (1981). En éstos, se propone un viento originalmente isotrópico interaccionando con un medio no homogéneo, con simetría cilíndrica. La estructura dinámica será elongada en la dirección de menor densidad o presión. El viento es frenado por el disco en su plano, pero escapa libremente por los polos, de esa manera se

forman dos cavidades a los lados opuestos de la estrella. Cuando el gas llega a la frontera de esas cavidades, choca de manera oblicua y se refracta debido a la diferencias de presiones entre la parte interna (debida al choque del viento) y la parte externa (debida a la presión del medio ambiente). Todo el flujo se dirige hacia dos puntos opuestos de la estrella en donde convergen y dan lugar a la formación de los objetos HH.

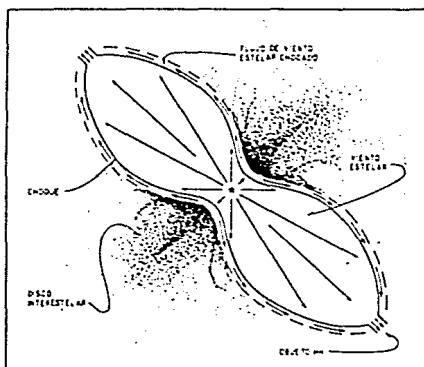


Figura 3.7 Modelo de un viento canalizado. (Cantó 1984).

3. Modelo de Jets.

Como ya se mencionó en el Capítulo 1, existe un grupo de objetos HH llamados jets estelares. Los jets estelares (también conocidos como jets ópticos), muestran una bien organizada estructura lineal que se extiende de la fuente de la estrella, dicha estructura aparentemente desaparece y termina en la llamada "cabeza del Jet", ejemplo HH34. (ver propiedades de jets en el Capítulo 1).

El modelo para explicar este tipo de objetos lo introdujo Königl (1982), en el cual un flujo (jet) estelar continuo y colimado interactúa con el entorno. El resultado de esto es una serie de choques oblicuos internos y una superficie de trabajo.

La cabeza del jet se explica como el resultado de dos choques, uno, el que frena el material del chorro y el otro que acelera el material del medio.

Las estructuras alineadas se explican como resultados de choques oblicuos internos que se originan cuando el material del chorro trata de ajustar su presión con la del medio ambiente. Dando así origen, a estructuras con choques estacionarios y espacios "vacíos" entre ellos que se asemejan a las estructuras observadas como HH34.

Reipurth (1989), observó que en algunos objetos HH, la velocidad radial aumenta conforme aumenta la distancia de la fuente. Esto se puede interpretar como evidencia de variaciones en la velocidad de eyección de la fuente. También se ha observado que algunos jets muestran saltos discontinuos en la velocidad radial y una o varias estructuras en forma de arco. Tales estructuras se pueden interpretar como evidencias de múltiples episodios de flujos provenientes de la fuente del jet.

3.4 MODELO DE JETS CON VELOCIDADES DEPENDIENTES DEL TIEMPO.

Raga *et al.* (1990), para poder explicar las observaciones de Reipurth, hacen un modelo simplificado para jets con velocidades dependientes del tiempo. Esta dependencia de la velocidad con el

tiempo es debida a la variación de eyección de la fuente del jet. Primero describiremos cualitativamente el modelo (a) y posteriormente se describirá más detalladamente dicho modelo (b).

a) En este modelo se encuentra, que las variaciones en la velocidad de eyección de la fuente, inducen la formación de discontinuidades en el jet descritas como "superficies de trabajo internas". Las fuentes con variaciones periódicas producen un jet con una "cabeza" y le siguen una o más superficies de trabajo internas.

Si la densidad del jet es mayor que la del entorno, entonces la cabeza del jet tiene mayor velocidad que la superficie de trabajo interna. Se tendrá entonces, una configuración rápida (cabeza del jet) lejos de la fuente y varias condensaciones con menor velocidad cercana a la fuente. Esta estructura se asemeja al objeto HH 34.

Si el jet se mueve en un entorno de mayor densidad o si las densidades del entorno son iguales a las del jet, entonces las superficies internas se moverán más rápido que la cabeza. Como resultado se tendrá que las superficies de trabajo alcanzarán a la cabeza del jet. Esta estructura se asemeja a HH46/47. Los autores comparan con observaciones de los objetos HH46/47 escogiendo una variabilidad en el tiempo de la velocidad de eyección de la fuente del jet. La teoría explica de manera razonable las observaciones.

También en este artículo, se muestra como las variaciones en la velocidad observada a lo largo del jet, pueden ser usadas para reconstruir la variabilidad de eyección de la fuente en el pasado. El estudio se hace en los objetos HH46/47.

b) Estudiando ahora de manera más detallada el modelo se tiene que tomar en cuenta lo siguiente:

Se considera un jet que está inyectado a una velocidad

$$u_0(t) = U_0 \quad t < 0 \quad (3.14)$$

$$u_0(t) = U_0 + \alpha t \quad t \geq 0 \quad (3.15)$$

donde t es el tiempo, $u_0(t)$ es la velocidad de inyección dependiente del tiempo, $U_0 = u_0(t=0)$ es la velocidad inicial del jet y $\alpha = (du_0/dt)_{t=0}$.

Es decir, el jet va aumentando su velocidad de inyección conforme aumenta el tiempo. El jet empieza con una velocidad U_0 .

Y si se toman las siguientes suposiciones:

Número de Mach del jet muy alto, efectos de las fuerzas de presión a lo largo del jet imperceptibles y el jet se puede aproximar como una descripción balística.

Analizando dicho problema :

Tomemos dos parcelas que son inyectadas a un tiempo $t = 0$ y $t = \delta t$.

Al tiempo $t = 0$ la parcela tendrá una velocidad U_0 .

Al tiempo $t = \delta t$ la parcela tendrá una velocidad $U_0 + \alpha(\delta t)$.

La parcela que salió al tiempo $t + \delta t$ va más rápido y alcanzará a la primera en un tiempo:

$$t_s = U_0/\alpha. \quad (3.16)$$

La distancia de la fuente a la cual las dos parcelas coincidirán es:

$$d_s = \frac{U_0^2}{\alpha} = U_0 \times t_s. \quad (3.17)$$

Es decir, si se tiene un jet con una velocidad inicial constante con una fuente que empieza a incrementar su velocidad, entonces se desarrollará una discontinuidad en un tiempo t_s y a una distancia d_s . Cabe hacer notar que si α es negativa, entonces no se forma la discontinuidad.

La estructura de la discontinuidad se puede estudiar si se considera el caso del jet altamente supersónico, y si se considera que existe balance de presiones, que el jet es isotérmico, que la densidad del jet es igual a la de su entorno y si el jet está caracterizado por una velocidad antes del choque u_1 y una velocidad después del choque u_2 , en donde $u_2 < u_1$. Entonces se formarán dos choques; uno cerca de la fuente y otro lejos de ésta. A esta estructura se le llama superficie de trabajo del jet. (Ver Figura 3.8).

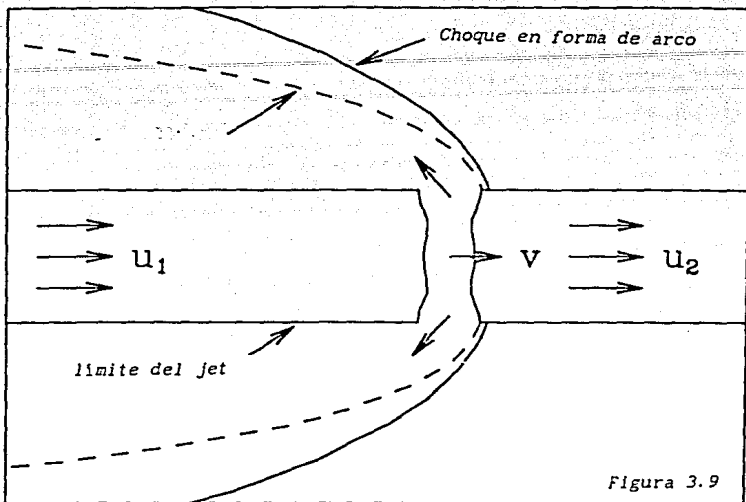


Figura 3.8 Diagrama que muestra el comportamiento de la superficie de trabajo interna. (Raga et al. 1990).

La velocidad de la superficie de trabajo es:

$$v = 1/2 (u_1 + u_2). \quad (3.18)$$

La velocidad del choque (la velocidad del fluido antes del choque con respecto a la superficie de trabajo) es:

$$v_s = v - u_2 = v - u_1 = 1/2 (u_1 - u_2). \quad (3.19)$$

El máximo de presión en la superficie de trabajo es:

$$P_{\text{max}} = \rho \left(\frac{u_1 - u_2}{2} \right)^2 \quad (3.20)$$

Esta presión en la superficie de trabajo hará que se forme una cavidad alrededor del jet, llamada cabeza del jet, a esta cavidad (en forma de arco) se le asocian choques y velocidades mayores que la superficie de trabajo.

Para estudiar la ecuación de movimiento del fluido descrito anteriormente, se utiliza la ecuación de Burger. Dicha ecuación es la siguiente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad , \quad (3.21)$$

donde x es la distancia medida a lo largo del eje de simetría, u es la velocidad y t es el tiempo.

Dicha ecuación nos da la variación de la velocidad del fluido en la distancia y en el tiempo. Esta ecuación permite soluciones discontinuas. Las soluciones discontinuas, muestran velocidades de salto que viajan con una velocidad v dada por:

$$v = 1/2 (u_1 + u_2) \quad (3.22)$$

donde u_1 es la velocidad antes de la discontinuidad y u_2 la de después. (Ver Figura 3.8)

La ecuación de Burger tiene la propiedad de que se le puede encontrar una solución retardada dada por:

$$u(x, t) = u_0(t') \quad , \quad (3.23)$$

con

$$u_0(t') = u(x=0, t') \quad , \quad (3.24)$$

donde

$$t' = t - \frac{x}{u_0(t')}, \text{ es el tiempo retardado.}$$

La velocidad de la parcela del fluido a un tiempo t y a una posición x , es decir $u(x,t)$, es igual a la velocidad en el origen $u_0(t')$ a un tiempo t' cuando la parcela fué eyectada de la fuente. Es posible entonces reconstruir la historia de la variabilidad de la fuente en el pasado.

Se puede obtener la solución analítica de la ecuación de Burger, sólo si se tiene el caso más simple de un jet en el cual, la velocidad de la fuente se incrementa a un tasa constante. Para fuentes con variaciones más complejas, se tendrán que utilizar soluciones numéricas.

En el artículo de Raga *et al.* (1990), se estudian dos ejemplos de jets con variabilidades de eyección periódicas provenientes de la fuente.

Las suposiciones son:

- a) Flujo supersónico.
- b) Jet isotérmico.
- c) Jet dependiente del tiempo.
- d) Equilibrio de presión con el entorno.

Y las condiciones iniciales son:

$$1) u(x, t=0) = 0 \quad (3.25)$$

2) la densidad del jet (ρ_j) es igual a la densidad del entorno (ρ_e), es decir, $\rho_j = \rho_e$.

3) La velocidad de inyección es:

$$u_0 = u(x=0, t) = 1 - \cos(2\pi t). \quad (3.26)$$

El resultado de la integración numérica se muestra en la

Figura 3.9.

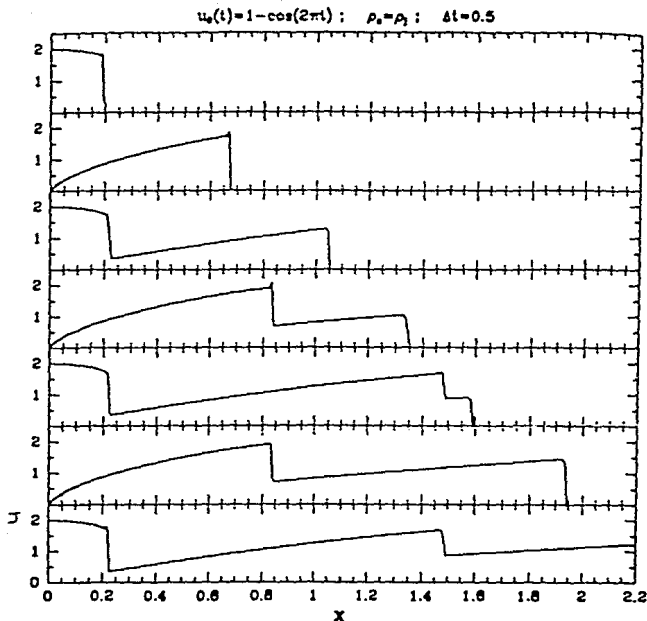


Figura 3.9 Diagrama mostrando el comportamiento de la velocidad como función de la posición para $\rho_0 = \rho_1$. (Raga et al. 1990).

En esta figura podemos notar que se forma la primera discontinuidad, ésta se va alejando de la fuente. Posteriormente se forman nuevas discontinuidades que viajan más rápido que la primera discontinuidad formada. La segunda discontinuidad alcanzará a la primera en un tiempo y a una distancia dada. La primera discontinuidad corresponde a la cabeza del jet. Las otras discontinuidades son las superficies internas de trabajo.

Si se analiza ahora el caso con una velocidad de inyección dado por:

$$u_0(t) = u_0(x=0, t) = 1 + \cos(2\pi t) \text{ y con } \rho_e=0. \quad (3.27)$$

Entonces la cabeza del jet escapa, es decir, la cabeza del jet siempre tiene una velocidad superior que las siguientes superficies de trabajo que se forman. (Ver Figura 3.10).

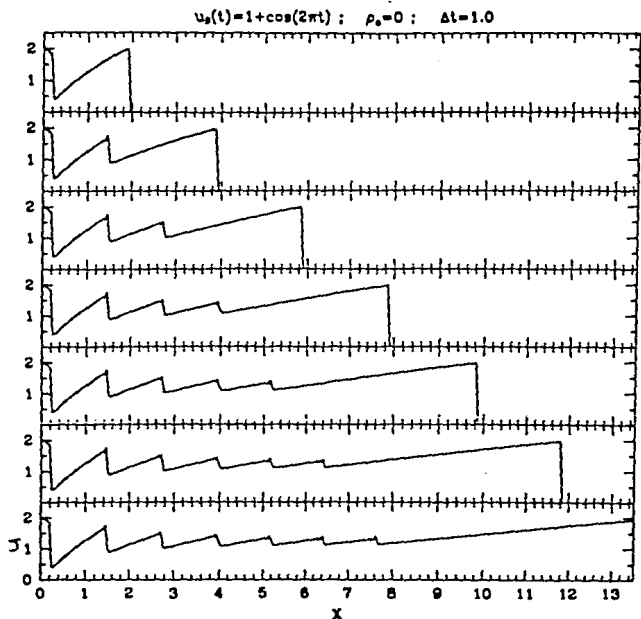


Figura 3.10 Diagrama mostrando el comportamiento de la velocidad como función de la posición para $\rho_e \ll \rho$. (Raga et al, 1990).

Por lo tanto, en un jet con una fuente que se "prende" en un tiempo dado y que su velocidad de inyección es periódica, se desarrollará una cabeza y una o más superficies de trabajo internas alejándose de la fuente, con las siguientes características:

1) Si $\rho_e < \rho_j$, entonces la cabeza del jet desarrollará mayores velocidades que las superficies de trabajo.

2) Si $\rho_e = \rho_j$ ó si $\rho_j > \rho_e$, entonces las superficies de trabajo que se forma se irán más rápido que la cabeza del jet y ésta será atrapada.

Este modelo se comparó con el sistema de los objetos HH46/47 cuyas características son (ver Figura 3.11):

i) Presenta una estructura muy bien alineada.

ii) Presenta principalmente dos condensaciones. La condensación más brillante (HH47a) que está a una distancia de aproximadamente 150" de la fuente y la condensación débil (HH47d) que está a aproximadamente 230" de la fuente.

iii) A distancias < 120" de la fuente, la componente brillante presenta una velocidad radial negativa de aproximadamente 150-200 km/s. La componente débil tiene la mitad de la velocidad que HH47a.

iv) La distancia de la fuente a HH46/47 es de 245 pc.

v) En la parte norte del objeto HH47a, el objeto presenta movimientos propios de 159 km/s.

vi) Entre el eje del sistema y el plano del cielo, existe un ángulo de 38° .

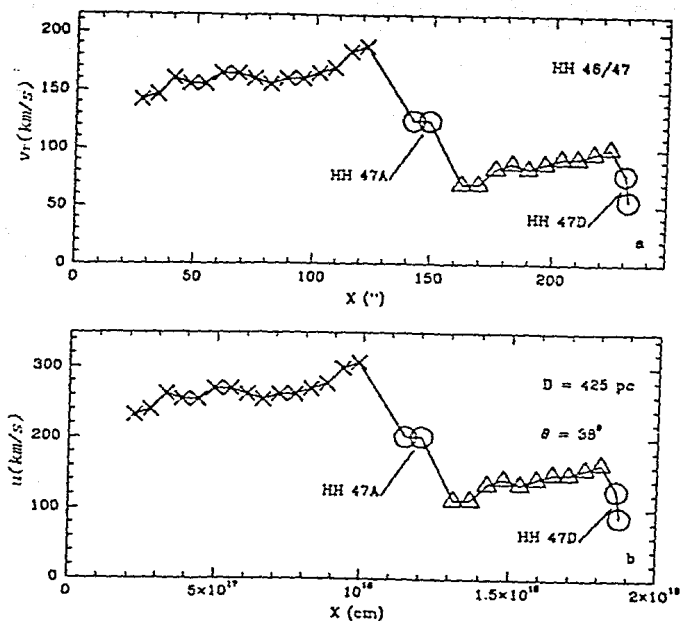


Figura 3.11 Diagrama mostrando el comportamiento de la velocidad como función de la posición para HH46/47 tomados de Reipurth, 1989. (arriba) y corregido por efectos de proyección y distancia (abajo). Los triángulos indican la primera región interpretada como el primer episodio del flujo mientras que las cruces indican el segundo. Los círculos indican la posición de HH47 A y D, los cuales son interpretados como superficies de trabajo internas en el flujo del jet. (Raga et al. 1990).

A partir de estos datos los autores obtienen la velocidad espacial actual del material emitiendo como función de la distancia. Ver Figura 3.12. Esta configuración hace sugerir la existencia de dos episodios de flujos provenientes de la fuente.

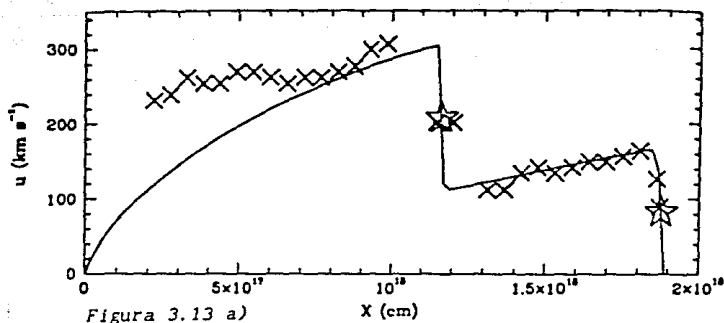


Figura 3.13 a) X (cm)

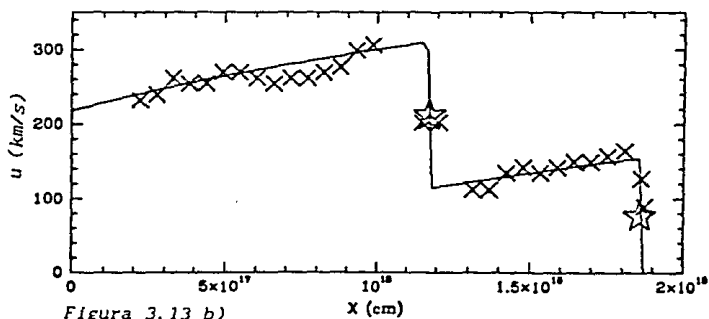


Figura 3.13 b)

Figura 3.12 Comparación entre las predicciones del modelo y la estructura observada. (Raga et al. 1990).

a) El primer episodio pudo haber producido la región de baja luminosidad y se encuentra entre $x = 1.3$ y 1.9×10^8 cm.

b) El segundo episodio pudo haber producido la alta velocidad entre la región de $x < 1.2 \times 10^{18}$ cm.

Para aplicar el modelo se asumió que :

1) Los dos episodios son el incremento de la velocidad

- inicial seguida de un descenso en la velocidad de la fuente.
- ii) La velocidad del jet es constante en el tiempo.
 - iii) La densidad del jet es igual a la de su entorno.
 - iv) La velocidad de la fuente varía como: ley de coseno y como diente de sierra.

Los resultados se muestran en la Figura 3.13, y se puede hacer notar que el modelo de diente de sierra reproduce mejor las observaciones.

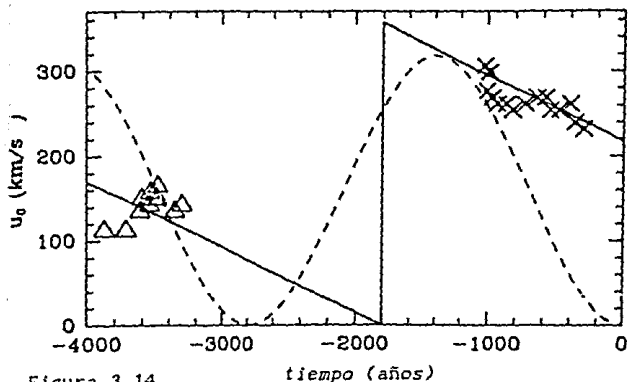


Figura 3.14

Figura 3.13 Variabilidad del tiempo en el pasado de la fuente HH46/47. Los triángulos indican el primer episodio de flujo. Las líneas sólidas y punteadas corresponden a la variabilidad de la velocidad de la fuente usada de los modelos cosenoidal y diente de sierra. El modelo de diente de sierra de ajusta mejor a las observaciones que el modelo cosenoidal. (Raga et al. 1990).

Se usó la solución retardada para obtener la velocidad de la fuente dependiente del tiempo, midiendo:

$t = -x/u$, donde x es la distancia de la fuente y u la velocidad del jet en esa posición. En ese punto la velocidad de la fuente tiene una velocidad de $u_0 = u$. Aplicando el modelo, se dedujeron variaciones en la fuente con un período de aproximadamente 500 años. La última variación ocurrió hace aproximadamente 2000 años.

Por lo tanto de este modelo podemos concluir que, para modelos de jets estelares altamente supersónicos, isotérmicos y en equilibrio de presión con el medio ambiente cuya velocidad de inyección varía con el tiempo, Raga et al. (1990) encontraron que:

- i) Se crean discontinuidades en el jet con una estructura de doble onda de choque.
- ii) Las fuentes con variaciones periódicas producen una "cabeza" seguida de una o más ondas de choque internas que se mueven a lo largo del jet.
- iii) Aplicando el modelo a HH46/47 se dedujeron variaciones en la fuente con períodos de aproximadamente 500 años.

CONCLUSIONES

En el Capítulo 1 se describió como la morfología de los objetos HH es compleja, ya que existen muy diversos tipos. Como los que están alineados, en forma de proa, otros totalmente irregulares y también existen los objetos llamados jets estelares. Asimismo se estudió el entorno de los objetos HH. Se hizo notar que los detectores llamados CCD, han sido y seguirán siendo una herramienta muy importante para el estudio morfológico de los objetos HH.

Finalmente se presentó una reducción parcial de los objetos HH59 y HH62 y un sencillo procesamiento de imágenes aplicado a dichos objetos para estudiar su morfología. Las imágenes se compararon con las observaciones hechas por Reipurth (1989). De dicho estudio se concluyó que debido a que los espectros son característicos de un gas chocado, el mejor filtro para estudiar la morfología de dichos objetos es el de [SII]. Sin embargo, es ideal estudiar las observaciones hechas con otros filtros, ya que se puede comparar la morfología del objeto en diferentes intervalos de longitud de onda. El filtro más "útil" para estudiar a los objetos después del filtro [SII] fué el filtro R. Para obtener una mejor calidad en las imágenes es útil tomar más campos planos en las observaciones y hacer un promedio de éstos.

En el Capítulo 2, se presentaron las observaciones de los objetos HH en el intervalo de longitud de onda que va desde el ultravioleta hasta el radio. También se estudiaron los parámetros

físicos que se deducen a partir del espectro de los objetos, por lo que podemos concluir a grandes rasgos lo siguiente:

Los objetos HH se forman en general por pares, siendo la estrella excitadora el centro de dicho sistema. La mayoría de las estrellas excitadoras son de baja masa de pre-secuencia principal. Dichas fuentes están desplazadas típicamente 0.1 pc de los objetos y generalmente están embebidas en la nube molecular asociada. Es posible localizar y estudiar a la estrella excitadora de los objetos HH estudiándola en el infrarrojo y en el radio, ya que éstos se encuentran en el entorno de las nubes moleculares, por lo que se les asocia a los procesos de formación estelar.

La definición de los objetos HH es espectroscópica. El espectro está dominado por líneas de emisión de la serie de Balmer, y presenta líneas de alta, media y baja excitación. El espectro de líneas está producido en la región de enfriamiento de ondas de choque con velocidades en el intervalo de 40 a 200 km/s y densidades de $50\text{-}300\text{ cm}^{-3}$. El fuerte viento estelar es el responsable de la excitación de los objetos HH. El espectro de estos objetos es muy similar al de remanentes de supernova.

En el ultravioleta, existen objetos de alta y baja excitación. Los objetos de alta excitación presentan en su espectro líneas de CIV, CIII] y Mg II mientras que los de baja excitación presentan fluorescencia de H α . El continuo aumenta hacia las longitudes de onda más cortas. Dicho continuo se debe, para longitudes de onda cortas, a la combinación del continuo de

fluorescencia de H_2 con la emisión de dos fotones. Para longitudes de onda largas, el continuo es debido únicamente a la emisión de dos fotones.

En el óptico, el espectro se puede clasificar en dos: espectro de alta o baja excitación. El espectro de alta excitación presenta mayor intensidad en las líneas de alta excitación (ej. la línea de [OIII]), mientras que en el espectro de baja excitación, las líneas intensas son las de baja excitación (ej. la línea de [SII]). El continuo en el óptico se incrementa hacia longitudes de onda cortas. Esto es debido a la emisión de dos fotones y a la emisión libre-ligado. Los objetos de baja excitación tienen contribuciones mayores en dicho continuo que los de alta excitación. El intervalo óptico de longitudes de onda ha sido el más estudiado.

En radio continuo, se han observado pocos objetos HH, éstos son HH1, HH2, HH80 y HH81. El último par de objetos están excitados por una estrella joven masiva. Los demás objetos (excepto HH1 y HH2) no se detectan, ya que son muy débiles en radio. El mecanismo de radiación en radio continuo es debido a emisión libre-libre de una región ópticamente delgada.

Los flujos de materia detectados en radio existentes en las nubes moleculares, debido a la presencia de estrellas en formación son:

- 1) Gas de muy alta velocidad (100 km/s) es el viento mismo de la estrella.
- ii) Gas de baja velocidad (1 km/s), es el disco o toroide

que se cree que se encuentra alrededor de la estrella.

- iii) Gas denso de alta velocidad (10 km/s), son los llamados flujos bipolares.

En cuanto a los parámetros físicos de los objetos HH, podemos concluir que:

Los objetos HH presentan velocidades radiales en general negativas, movimientos propios y variabilidad así como densidades de entre $2 \times 10^3 - 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ y temperaturas de 7,500 a 12,000 K.

En el Capítulo 3, se revisaron algunos modelos de los objetos HH y la teoría de ondas de choque. Por último se presentó un modelo de jet que depende del tiempo (Raga et al. 1990), así como la comparación con las observaciones. También se mostró que las variaciones de la velocidad observada a lo largo del jet, puede ser usada para reconstruir la variación de la fuente en el pasado.

De éste Capítulo se puede hacer notar lo siguiente:

Existe una gran cantidad de modelos que ha tratado de explicar el origen y evolución de los objetos HH. Todos los modelos coinciden en utilizar a ondas de choque como mecanismo excitador, también consideran a la fuente que interactúa con el medio circundante para formar a los objetos HH como una estrella de reciente formación. Los modelos difieren en el mecanismo por el cual el flujo que proviene de la estrella está colimado, así como en la forma y el lugar en donde los choques se originan. Diversos tipos de modelos explican diferentes características.

Hasta la fecha, no existen modelos que engloben todas las características morfológicas, espectroscópicas, cinemáticas, etc. de los objetos HH. Sin embargo, cada día al avanzar en la búsqueda del origen y evolución de estos objetos, también se profundiza en el conocimiento de los mecanismos relacionados con el proceso de formación estelar, problema aún abierto en la Astronomía.

APENDICE 1

CONVOLUCION

La convolución de dos funciones está definida por:

$$h(x) = \int f(t) g(x-t) dt = g(x) * f(x)$$

Donde $f(x)$ y $g(x)$ son dos funciones localmente integrables.

Para obtener $h(x)$ el procedimiento a seguir es el siguiente:

- i) Transposición, se toma la imagen reflejada de $g(t)$.
- ii) Desplazamiento, se traslada $g(t)$ la cantidad x .
- iii) Multiplicación, se multiplica la función recorrida $g(x-t)$ por $f(t)$.
- iv) Integración del area bajo el producto $g(x-t)$ por $f(t)$.

La convolución $h(x)$ representa el promedio de la función $f(t)$ ponderado por $g(t)$. Si $g(t)$ es suave, como por ejemplo una gaussiana, entonces $h(x)$ se parece a $f(t)$ pero más suavizada. En este caso obtenemos un filtrado.

La Figura A1 es un ejemplo de la convolución de dos funciones.

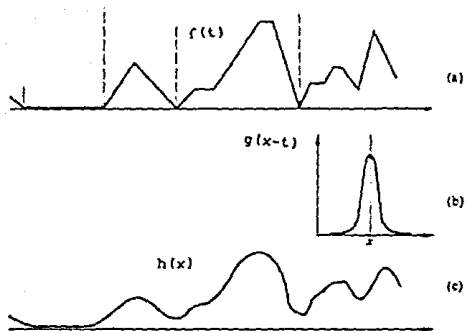


Figura A1. a) función objeto, b) función filtro (gaussiana), c) imagen resultante.

Como podemos observar en la Figura A1 el resultado de la convolución es una función suavizada.

REFERENCIAS

- Adams, M. T., Strom, K. M. y Strom, S. E., 1979, *Ap. J.*, 230, L183-L186.
- Ambartsumian, V. A., 1954, *Com. Burakan. Obs.*, n.12.
- Appenzeller I. y Mundt R., 1989, *Astron. Astroph. review*, 1, 291.
- Böhm, K. H. y Siegmund, W. A., 1976, *Ap. J.*, 203, 399.
- Böhm, K. H., 1978, *Protostars and planets*, (T. Gehrels, ed.) p 632, The University of Arisona Press.
- Böhm, K, H, Böhm-Vitense, E y Cardelli, J, A, 1982, in *advances in Ultraviolet Astronomy*, (Yoji Kondo, J.M. Mead y R. D. Chapman) p 223.
- Böhm, K. H., 1983, *Rev. Mex. Astron. Astrof.*, 7, 55.
- Bok, B. J., 1978, *Pub. Astron. Soc. Pac.* 90, 489.
- Brugel, 1989, *Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence Objets*, ESO, (B. Reipurth ed.) p 311.
- Bührke, T., Mundt, R. y Ray, T. P., 1988, *Astron. Astroph.*, 200, 99.
- Cantó, J., 1980, *Astron. Astroph.*, 86, 327.
- Cantó, J. y Rodriguez, L. F., 1981, *Ap. J.*, 239, 982.
- Cantó, Jorge, 1981, *Investigating the Universe*, ed. Kahn 95.
- Cantó, J., 1984, *Temas Selectos de Astrofisica*, ed. UNAM, comp. M. Peimbert, 117.

- Cantó, J., 1985, *In Nearby Molecular Clouds*, ed. Serra,
Lectures Notes in Physics, 237.
- Dickinson, D. E., Kojoian, G. y Strom, S. E., 1974, *Ap. J.*
Lett. L93.
- Dopita, M. A., 1978a, *Astron. Astroph.*, 63, 237.
- Dopita, M. A., 1978b, *Ap. J. Supl.*, 37, 117.
- Dopita, M. A., 1981, *Investigating the Universe*, ed. Kanh.
- Dopita, M. A., Binette, L. y Schwartz, R. D., 1982, *Ap. J.*
 261, 183.
- Dyson, J. E., 1987, *Circumstellar Matter Symposium, IAU*,
 122, 159.
- Eduards, S., Snell, R. L., 1984, *Ap. J.* 281, 237.
- Elias, J.H., 1980, *Ap. J.*, 241, 728.
- Fukui Y. B., 1989, *Low Mass Star Formation and Pre-Main*
Secuence Objets, ESO, (ed. B. Reipurth).
- Garching Bei München, 1989, *Low Mass Star Formation and*
Pre-Main Secuence Objets, ESO, (ed. B. Reipurth), 11.
- Gyulbudaghyan, A. L., 1975, *Astrofizika*, 11, 511.
- Haro, G., 1950, comunicación privada el 31 de mayo de 1950 a
 los Drs. Shapley y Minkowsky.
- Haro, G., 1952, *Ap. J.* 115, 572.
- Haro, G., 1953, *Ap. J.* 117, 73.
- Herbig, G., 1951, *Ap. J.* 113, 697.
- Herbig, G., 1952, *J. Roy. Astr. Soc. Canada*, 46, 222.
- Herbig, G. 1969, *Non-Periodic Phenomena in Variable Stars*,
 (ed. L. Detre), 75.
- Herbig, G., 1974, *Lick Obs. Bull.* 658.

- Ho, P. T. P. y Barret, A. H., 1980, *Ap. J.* 281, 237.
- Joy, A. H., 1945, *Ap. J.*, 102, 168.
- Knapp, G. R., Kuiper, T. B. H., Knapp, S. L. y Brown, R. L.,
1976, *Ap. J.* 206, 443.
- Konigl, A., 1982, *Ap. J.* 261, 115.
- Lada, C. J., Gottlieb, C. A., Litvak, M. M. y Lilley, A. E.,
1974, *Ap. J.* 194, 609.
- Loren, R. B., Evans, R. J. y Knapp, G. R., 1979, *Ap. J.* 234,
932.
- Norman, C. y Silk, J., 1979, *Ap. J.* 228, 197.
- Ortolani, S. y d'Ordorico, S., 1980, *Astr. Astroph.* 83, L8.
- Osterbrock, D. E., 1958, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 70, 399.
- Peterson, 1984, *Astron. Astroph.*, 34, 135.
- Pravdo, S. H., Rodríguez, L. F., Cantó, J., Torrelles, J. M.,
Becker, R. H. y Selgren, K. M., 1985, *Ap. J. Letters*,
293, L35.
- Raga, A.C., 1989, *Low Mass Star Formation and Pre-main
sequence objects*, ESO, (ed. B. Reipurth), 281.
- Raga, A. C., Cantó, J., Binette, L., Calvet, N., 1990,
Ap. J., 364, 601.
- Reipurth, B., Graham, J. A., 1988, *Astron. Astroph.*, 202,
209.
- Reipurth, B., 1989, *Low Mass Star Formation and Pre-main
Sequence objects*, ESO, (ed. B. Reipurth), 247.
- Reipurth, B. y Heathcote, S., 1990, en preparación.
- Rodríguez, L. F., Morán, J. M., Ho, P. T. P., y Gottlieb, E.
W., 1980, *Ap. J.*, 235, 845.

- Rodríguez, L. F., Cantó, J., Moreno, M. A., López, J.A.,
1989, *Rev. Mex. Astron. Astrof.*, 17, 111.
- Rodríguez, L. F. y Reipurth, B., *Rev. Mex. Astron. Astrof.*,
1989, 17, 19.
- Rodríguez, L. F., 1989, *Rev. Mex. Astron. Astrof.* 18, 45.
- Rodríguez, L. F., Ho, P. T. P., Tórelles, J. M., Curiel, S. y
Cantó, J., 1990, *Ap. J.* 352, 645.
- Sánchez, L. J. y Peimbert, M., 1991, a publicarse en la
Rev. Mex. Astron. Astrof.
- Schwartz, R. D., 1975, *Ap. J.* 195, 631.
- Schwartz, R. D., 1976, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 88, 159.
- Schwartz, R. D., 1983, *Ann. Rev. Astron. Astroph.* 21, 209.
- Shull, J. M. y Mc. Kee, C. F., 1979, *Ap. J.* 227, 131.
- Snell, R. L. y Eduards, S., 1981, *Ap. J.*, 251, 103.
- Strom S. E., Grasdalen, G. K. y Strom K., 1974, *Ap. J.* 119,
111.
- Von Hippel, 1988, *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 74, 431.