

BORRADOR PRELIMINAR DE LA TESIS:
Un catálogo de choques de proa estacionarios en la
Nebulosa de Orión

Luis Angel Gutiérrez Soto
Tesis de Maestría, Posgrado de Astrofísica, UNAM
Asesor: Dr. William Henney, CRyA, UNAM
Morelia Michoacán, México

7 de noviembre de 2014

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Orión y la formación estelar	1
1.1.1	Estrellas masivas en Orión	2
1.1.2	Formación estelar en Orión	2
1.1.3	El papel de las estrellas masivas en la formación estelar	6
1.2	Proplyds	7
1.2.1	Descubrimiento	7
1.2.2	Modelo estandar de los proplyds	10
1.2.3	Choques de proa asociados a proplyds	11
1.3	Objetos LL en la Nebulosa de Orión	11
1.3.1	Naturaleza de los arcos de proa LL	14
1.4	Choques de proa estacionarios en la Nebulosa de Orión	15
1.4.1	Choques de proa producidos por Objetos HH y su relación con los Objetos LL	15
1.4.2	Notación de los objetos LL y de los proplyds	18
1.5	Estructura de la tesis	18
2	Descripción de las observaciones empleadas	20
2.1	La cámara ACS-WFC, El programa GO-9825 y el filtro F658N	22
2.2	Programa Treasury del Telescopio Espacial Hubble	24
2.3	Otras observaciones de la cámara WFPC2: viejos mosaicos	27
3	Metodología observacional	28
3.1	Formas de los arcos	28
3.2	Estimación de los parámetros. D , R_0 , R_c y h_0	29
3.3	Estimación y calibración final del flujo-líneas de emisión en las imágenes del ACS y WFPC2	31
3.3.1	Determinación de los valores de la emisión en las imágenes del ACS y WFPC2	31
3.3.2	Estimación de las constantes de calibración	33
3.3.3	Corrección por extinción	35
3.3.4	Comparación entre los brillos superficiales de WFPC2-F656N ($H\alpha$) y de ACS-F658N ($H\alpha+[N II]$)	35
3.3.5	Verificaciones de las calibraciones del brillo superficial para WFPC2 .	37
4	Resultados empíricos	38
4.1	Resultados empíricos	38
4.1.1	Catálogo: Imágenes de los arcos de proa estacionarios	38
4.1.2	Más sobre las observaciones: Pocisiones, distancias, formas y tamaños	39
4.2	Discusión	51

5 Resultados astrófisicos	55
5.1 Derivación de los parámetros físicos	55
5.1.1 Densidad en la cáscara chocada	55
5.1.2 Presión Térmica en la cáscara chocada	58
5.1.3 Interacción de dos vientos	59
5.2 Resultados físicos: cálculo de las propiedades físicas	61
5.2.1 Densidad promedio en la cáscara	61
5.2.2 Relación y diferencia entre la presión térmica en la cáscara y la presión hidrodinámica en los vientos	63
5.2.3 Flujo de momento interno: $\dot{M}_w V_w$	63
6 Conclusiones	66

Resumen

En esta tesis presentamos una lista completa de todos los arcos estacionarios de líneas de emisión (objetos LL y choques de proa de los proplyds) encontrados en unos archivos de unas imágenes del Telescopio Espacial Hubble (HST por sus siglas en inglés) de la Nebulosa de Orión. El número total de objetos detectado es de 73, de los cuales 20 no han sido reportados previamente en la literatura. Clasificamos la forma de los arcos radiactivos, mediante el ajuste de secciones cónicas en los límites internos y externos de la cáscara chocada y calculamos el brillo superficial de $H\alpha$ corregido por el fondo para cada objeto. Encontramos diferencias significativas en la forma de las cáscaras entre los objetos que se encuentran más cerca de las estrellas ionizantes y los que están más lejos. El grupo cercano, que constituyen auténticas interacciones de los proplyds con el viento estelar hipersónico, tienen formas relativamente cerradas, mientras que el grupo más lejano, que se origina debido a la interacción con el transónico flujo de champaña de gas ionizado en la nebulosa, son más abierto e hiperbólicos. Aunque algunos de estos últimos son también proplyds conocidos, muchos no lo son, los arcos más grandes y más brillantes tienden a estar asociados con luminosas estrellas jóvenes, lo que sugiere que el viento intrínseco del disco de las estrellas T-Tauri podrían jugar un papel importante. La orientación de los arcos, junto con las presiones de estancamiento estimadas a partir del brillo superficial, permiten que el campo de velocidades interno de la región HII sean probados. También encontramos que el flujo del núcleo de la nebulosa es aproximadamente radial y por tanto domina sobre un flujo turbulento y desordenado.

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo es el resultado de la identificación y detección de arcos de emisión en los alrededores de θ^1 Ori C (O7 V) en la Nebulosa de Orión. Dichos arcos radiativos pueden ser interpretados como choques de proa que se producen por la interacción de dos vientos, esta interacción provoca que se forme una estructura con un doble choque y que la cáscara chocada esté en equilibrio, es así que se puede considerar que los arcos son estacionarios. Por otro lado se tiene que en el interior de la Nebulosa de Orión; los arcos están asociados a proplyds, mientras que en regiones más externas y lejanas del grupo de las estrellas masivas llamado el Trapecio, los arcos están asociados a estrellas jóvenes de baja masa (estrellas T-Tauri). Por tanto uno de los objetivos de esta tesis, además de hacer un catálogo de choques de proa, es plantear características diferenciadoras entre los choques de los proplyds cerca de θ^1 Ori C, con los choques ubicados en las afueras de la Nebulosa de Orión, usando parámetros observacionales para estudiar sus formas y tamaños y parámetros astrofísicos para estudiar la naturaleza de la cáscara chocada de los objetos, de la región HII y de los flujos que colisionan en ambas regiones de la nebulosa.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, vemos varios componentes involucrados en la formación de los arcos de proa en la Nebulosa de Orión, por tanto en este primer capítulo exploraremos un poco sobre la formación estelar en Orión, la población de estrellas masivas en esta región y su papel e importancia en la formación de los choques y la subsecuente formación de estrellas. Se hablan de los proplyds y su naturaleza, de sus flujos de gas ionizados provenientes de su frente de ionización y de la interacción de este con el viento estelar para formar los choques. Por último, se menciona en detalle la naturaleza de los arcos de emisión, donde se distinguen dos grupos; un primer grupo, que corresponde a los choques de proa de los clásicos proplyds y un segundo grupo, que son los arcos hiperbólicos LL en las regiones más alejadas de la nebulosa, donde se sugiere que los choques se forman por la interacción de un viento de una estrella T-Tauri con el transónico flujo de champaña del núcleo de la nebulosa. En los demás capítulos de la tesis estas suposiciones son probadas.

1.1 Orión y la formación estelar

Orión es la región de formación estelar más estudiada, debido a que las estrellas jóvenes y el gas nos proporcionan señales claras sobre la física en los procesos de formación estelar, la formación, evolución y destrucción de las nubes en las que se forman las estrellas, además nos dan pistas claves y sutiles de la dinámica del medio interestelar y del papel que cumplen las estrellas de alta masa y las asociaciones OB en los ciclos del gas entre las distintas fases del medio interestelar.

1.1.1 Estrellas masivas en Orión

Primero hablemos de la **Vecindad Solar** que es un caso particular donde es posible el estudio de los movimientos y distribuciones de las estrellas jóvenes relacionadas con el gas, que nos permiten trazar la historia de la formación estelar y la del medio interestelar. Como hay estrellas masivas, se crean regiones H II y estas junto a estrellas T-Tauri de baja masa trazan los sitios más recientes de formación estelar con edades entre 3 y 5 Myr (Bally, 2008), de la misma manera las asociaciones OB pueden trazar la historia de la formación estelar. Las asociaciones OB son las estrellas más masivas de la región, con ellas se pueden identificar lugares donde se han formado estrellas hace 40 Myr. Es así que las posiciones, velocidades, edades y masas de estrellas jóvenes y las propiedades del gas relacionadas con las asociaciones OB, son claves para entender la historia de la formación de estrellas y el origen, evolución y destrucción de las nubes moleculares en los últimos 100 años, logrando con esto desentrañar la naturaleza y la reciente historia del medio interestelar vinculada al nacimiento de las estrellas en esta región de la Vía Láctea.

Como el objetivo de nuestro estudio está centrado en la formación de estrellas jóvenes de baja masa, asociadas a estrellas masivas y regiones HII particularmente en **Orión**, entonces nos concentraremos en esta región. Las asociaciones OB en Orión consiste en un grupo de estrellas de diferentes edades que están parcialmente superpuestas a lo largo de nuestra línea de visión, dentro de estas regiones existen varios de estos subgrupos OB integradas por este tipo de estrellas masivas. Por ejemplo tenemos el grupo OB1a, del cual muchos trabajos coinciden de que se trata del grupo de estrellas masivas más viejo de esta región, se encuentra ubicado en el noroeste del *Cinturón de Orión* y su edad oscila entre 8 y 12 Myr (Blaauw, 1991; Brown et al., 1994) dentro de este grupo hay un subgrupo conocido como el grupo 25 Orionis (25 Orionis group en inglés). El subgrupo OB1b, está centrado en el cinturón y se ha estimado que su edad comprende un rango entre 1.7 y 8 Myr, esto último es incosistente con la presencia de las tres estrellas gigantes (ζ Orionis, ϵ Orionis y δ Orionis) puesto que deberían ser al menos 5 Myr más viejas, de acuerdo lo que dicen sus masas (Bally, 2008).

En esta región se encuentra el subgrupo OB1c con edades entre 2 a 6 Myr, consiste básicamente en estrellas que se encuentran en *Orion's Sword* por su nombre en inglés, justamente frente de la Nebulosa de Orión. Este subgrupo contiene dos cúmulos, NGC 1980 ubicado en el extremo sur de *Sword* y NGC 1981 situada en el extremo norte (ver figura 1.2). Las estrellas más viejas en el *Sword* se superponen con poblaciones de estrellas mucho más jóvenes asociadas a la Nebulosa de Orión, M43, NGC 1977, OMC1 y 3 regiones en el *Integral Shaped Filament* en el extremo norte de la nube molecular Orión A. Por otro lado tenemos a OB1d, que está formado por las estrellas de el cúmulo de la Nebulosa de Orión (ONC por sus siglas en inglés) situada en la nube molecular Orión A y por NGC 2024 ubicada en la nube molecular Orión B, son los dos cúmulos más grandes de este grupo que además resulta ser joven, es decir con edades que van desde 2 Myr (Muench et al., 2008). Es difícil separar estos dos tipos de poblaciones estelares, puesto que no es claro aún si estos dos subgrupos (1c y 1d) representan diferentes poblaciones o más bien son grupos estelares jóvenes y viejos que se formaron en la nube Orión A en diferentes épocas, que desde luego han emigrado.

1.1.2 Formación estelar en Orión

Es bien sabido que la formación estelar ocurre cuando grandes nubes moleculares como Orión colapsan debido a su propia gravedad, es en ese momento cuando se desencadena la formación de estrellas de alta y baja masa. Como ya se dijo; en Orión tales fenómenos están presentes. Por ejemplo el subgrupo OB1d además de contener; el cúmulo de la nebulosa de Orión (ONC) y a NGC 2024 como se describió arriba, contiene una docena de pequeños cúmulos y una distribución de estrellas en el fondo que están mas o menos aisladas, que se han formado en núcleos a lo largo de nubes moleculares en Orión, es el caso de las estrellas

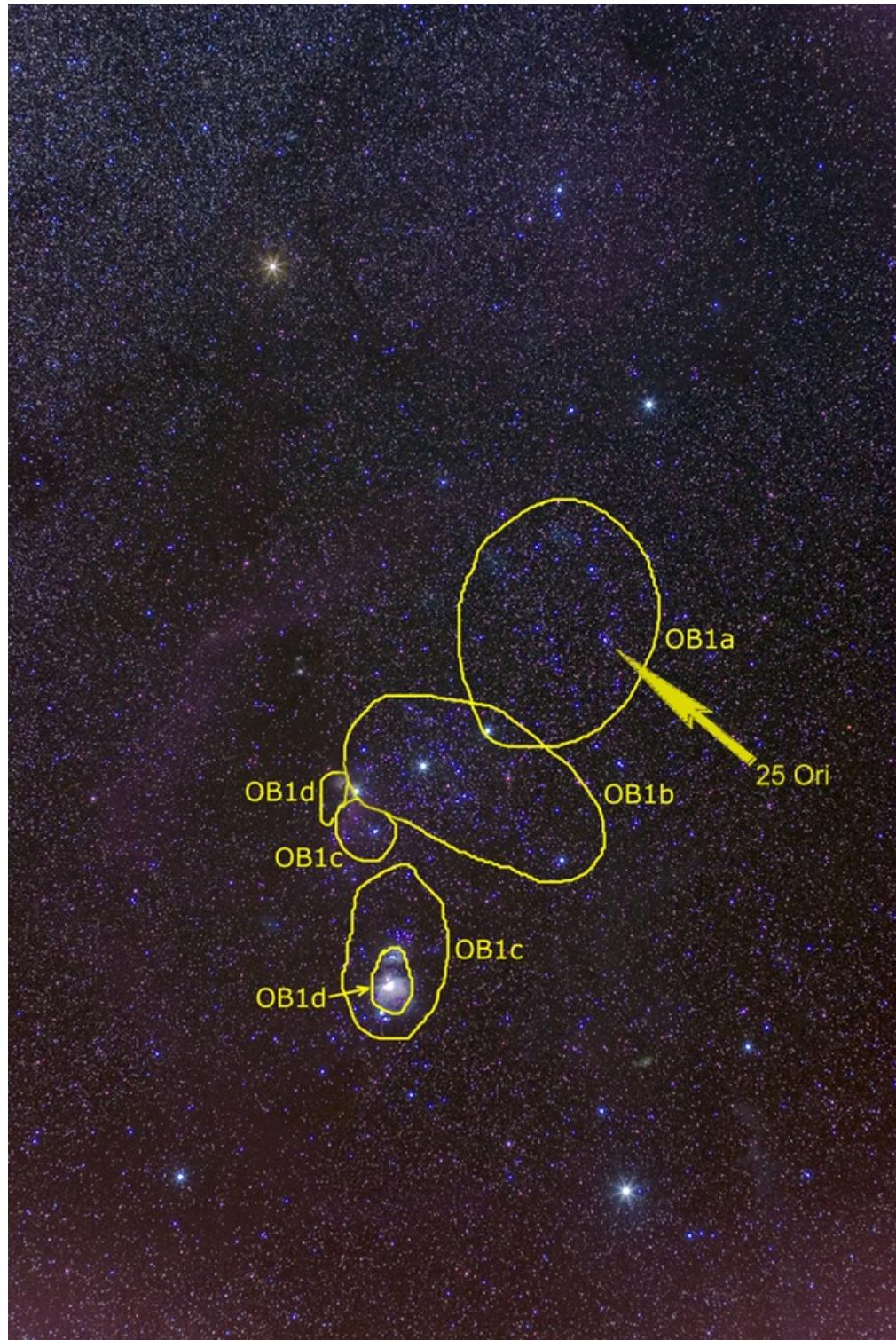


Figura 1.1: Campo amplio de la región de Orión, que muestra los diferentes sub-grupos formados por las asociaciones OB. Tomado de wikipedia.org.

formadas en NGC 2068 y NGC 2071 en Orión. Varios miles de estrellas en su mayoría de baja masa, miembros del subgrupo 1d fueron formadas a partir de la *Integral Shaped Filament* (Bally et al., 1987) en la parte Norte de la nube molecular Orión A, que contiene como ya sabemos a la Nebulosa de Orión (Johnstone & Bally, 1999). Entonces cerca de 2000 estrellas de baja masa con edades menores a 10^6 años están concentradas alrededor de un cúmulo de estrellas masivas denominado el Trapecio en la misma Nebulosa de Orión (Hillenbrand, 1997) ubicada esta última a una distancia de 436 ± 20 pc (O'Dell & Henney, 2008). Hay que subrayar que cientos se están formando en el núcleo denso de OMC2 y en 3 núcleos situados en la parte norte de la Nebulosa de Orión. Hay que decir, que hay otro tipo de objetos que se han formado bajo estas circunstancias (proplyds y objetos LL) de los cuales hablaremos más adelante. A pesar de que no se sabe con certeza acerca de todos los miembros de la asociación OB, es probable que entre 5000 y 20000 estrellas se han formado en la región de Orión en los últimos 15 Myr. No obstante las edades y ubicaciones de varios subgrupos en Orión indican que la formación de estrellas, ha sido propagada a través de la nube de Orión de una forma secuencial (Bally, 2008).

Ya desde hace muchos años se tiene conocimiento de que las estrellas fugitivas son comúnmente las estrellas O, raramente se da entre estrellas B y es inexistente en las estrellas de tipo espectral posteriores a las ya mencionadas (Gies & Bolton, 1986; Gies, 1987), en este sentido Orión es una fuente de varias estrellas fugitivas, dentro de esta se incluyen a AE Auriga que tiene una velocidad de 150 km s^{-1} y a μ Columbae con una velocidad de 117 km s^{-1} moviéndose exactamente en la dirección opuesta (Blaauw, 1991). Ahora datos de Hipparcos sobre movimientos propios han mostrado que estas dos estrellas y la colisión de vientos de la binaria de rayos-x ι Orionis, estaban ubicadas en la misma posición en el cielo hace más o menos 2.6 Myr (Hoogerwerf et al., 2001), algunos científicos han argumentado que estas dos estrellas (AE Auriga y μ Columbae) junto a ι Orionis experimentaron una interacción de cuatro cuerpos que los llevó a sufrir cambios significativos, de tal manera que las estrellas más masivas se volvieron la binaria ι Orionis, mientras que para las estrellas menos masivas la suerte fue otra, puesto que la energía gravitacional liberada durante el encuentro lanzó a estas dos estrella fuera de la región a muy altas velocidades (Gualandris et al., 2004).

Tenemos que los movimientos propios en el cúmulo de la Nebulosa de Orión la sitúan en la interacción de los cuatro cuerpos aproximadamente, hace 2.6 Myr. Es así que la presencia de algunas de las estrellas viejas en el cúmulo de la Nebulosa de Orión; advierten que ha ocurrido formación estelar en esta región, sin embargo el número de estrellas viejas indican que la formación estelar en el gas para formar la ONC era más suave hace 2.6 Myr. No obstante, hay que resaltar que la tasa de formación estelar se ha ido acelerando con el tiempo, culminando recientemente con la formación de un grupo de estrellas masivas conocidas como el Trapecio y este proceso aún continua hasta el día de hoy.

Si se asume que NGC 1980¹ comparte su movimiento a través del espacio con ι Orionis, este cúmulo podría haber estado situado en el mismo lugar que el material, del cual más tarde se formaría la Nebulosa de Orión. Esto lleva a pensar que el material del cual se formaron la Nebulosa de Orión y la ONC estaba aparentemente cerca de NGC 1980 hace varios millones de años, sugiriendo que la formación de las mismas estaría desencadenado por las estrellas viejas del cúmulo NGC 1980. Ahora si esto es verdad, las estrellas más viejas de la ONC pueden ser miembros de NGC 1980 y del sub-grupo OB1c.

Bally (2008) dice que las ubicaciones y las edades de los grupos estelares en Orión, indican que la formación estelar puede propagarse a través de una nube de una forma no lineal. No obstante, una primera generación de estrellas desencadena el nacimiento de las posteriores generaciones. Es así que en Orión al parecer el subgrupo 1a fueron las primeras

¹NGC 1980 ha sido asociado con el subgrupo 1c de la asociación OB ubicada justamente en frente de la Nebulosa de Orión y también con la nube molecular Orión A (ver figura 1.2).

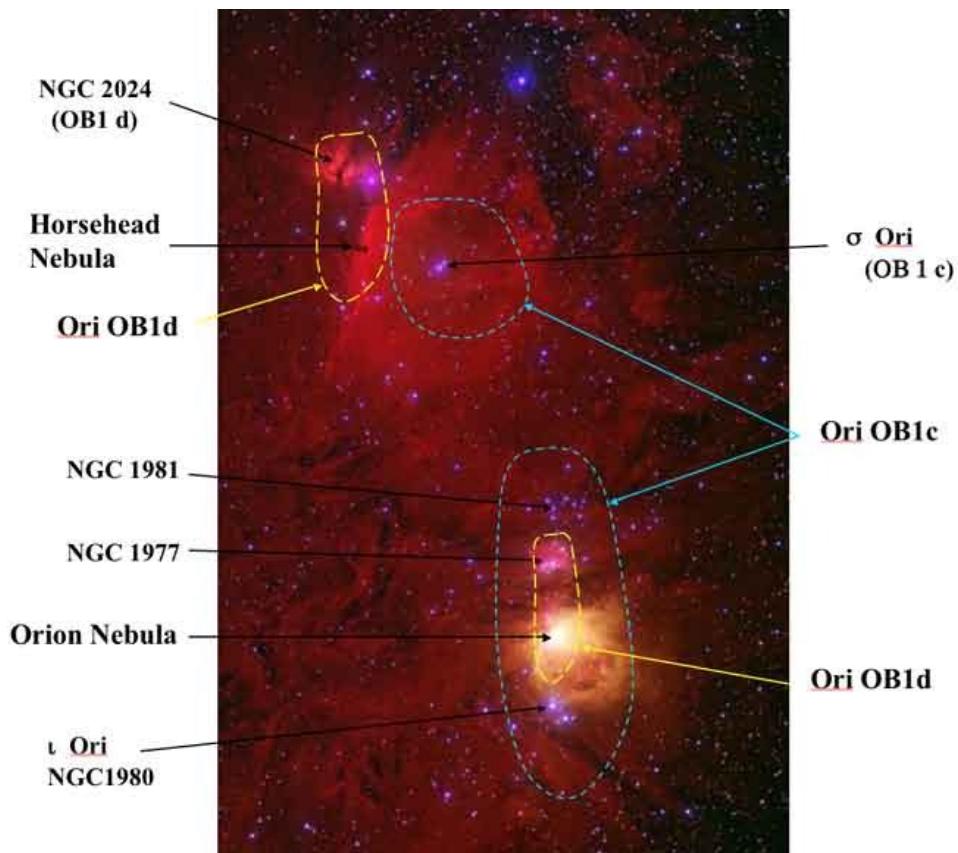


Figura 1.2: Parte sur de Orión que contiene los subgrupos OB1c y OB1d de las asociaciones OB1 de Orión. También se logra apreciar que el subgrupo OB1c parece estar directamente en frente del subgrupo más joven OB1d (Bally, 2008). Otros cúmulos son marcados.

estrellas en formarse, consecuentemente estas estrella masiva contribuyeron al nacimiento de las 25 Ori y del subgrupo 1b. Posteriormente estas activaron la formación estelar en *Orion's Sword* al sur, σ Ori en el sureste, y posiblemente λ Ori en el norte, por tanto en los últimos Myr se ha propagado la formación estelar dentro de *Filament Integral Shaped* en la nube molecular Orión A, para formar la Nebulosa de Orión, M43, OMC2, OMC3 y NGC 1977.

1.1.3 El papel de las estrellas masivas en la formación estelar

Las estrellas masivas inyectan energía en el medio interestelar a través de su radiación del continuo de Lyman (EUV), de sus vientos estelares y a través de la explosión de supernovas (SN). Ahora, si se usa la función de masa estandar (IMF), entonces la población estimada de estrellas jóvenes en Orión indica que entre 30 y 100 estrellas más masivas que $8 M_{\odot}$, se han formado en esta región en los últimos 12 Myr, muchas de estas estrella han alcanzado la secuencia principal y posteriormente han explotado. Usando la relación edad-masa $\tau(M) \propto M^{-\beta}$, con $\beta = 1.6 \pm 0.15$ en un rango de masas de 8 a $80 M_{\odot}$ (Shull & Saken, 1995), ha mostrado que estrellas en el subgrupo 1a más masivas que $13 M_{\odot}$ han explotado. En los subgrupos 1b y 1c, estrellas con edades promedio de 6 Myr y con masas mayores a $20 M_{\odot}$, todo parece indicar que también han corrido con la misma suerte. Es así que han habido entre 10 y 20 explosiones de supernovas en la región de Orión en los últimos 12 Myr. Como consecuencia esta energía cinética liberada ($> 10^{52}$ ergs) ha formado una enorme burbuja de gas de emisión de rayos-x, que se ha extendido creando una cáscara masiva de gas y polvo, conocida como la superburbuja Orión/Eridanus.

La estructura del medio interestelar en la burbuja Orion/Eridanus proporcionan evidencias de que la energía liberada por estrellas de alta masa ha alterado profundamente la cinemática, la forma y la estructura del gas en esta región, debido a que la radiación de las asociaciones OB han probocado que la burbuja se haya inflado un poco más. La emisión de H α traza la ubicación actual del frente de ionización en Orión, además estas bajas densidades del gas se están expandiendo con una velocidad promedio cerca de 10 a 60 Km s^{-1} hacia altas latitudes galáctica y hacia nosotros, este gas se puede ver en absorción y especialmente en el UV.

Por otro lado si somos más exigentes y nos situamos en determinadas regiones, por ejemplo donde se situa a la ONC, tenemos que la ionización está dominada por θ^1 Ori C que es una de las estrellas masivas y jóvenes que forman el ya mencionado Trapecio. La densidad del gas ionizado decrece desde un pico de densidad electrónica de unos 10^4 cm^{-3} en el frente de ionización, puesto que el gas se acelera lejos del frente (Henney et al., 2005). En la parte más brillante de la nebulosa es decir, en el oeste del Trapecio la capa que emite es delgada ($< 0.05 \text{ pc}$), mientras que la región que emite en el este de la nebulosa es mucho más gruesa ($\simeq 0.3 \text{ pc}$), y esto puede relacionarse fácilmente con la extensión lateral y la distancia de θ^1 Ori C al frente de ionización. Por otro lado los choques estacionarios que se forman en el frente de los Proplyds cerca de la estrella ionizante (Bally et al., 2000), son un indicativo de que hay una cavidad formada por los vientos de alta velocidad que vienen de esta estrella luminosa, además la presencia de líneas de He I en absorción en el espectro de las estrellas del Trapecio (O'dell et al., 1993; Baldwin et al., 1991) indican que hay baja densidad en las regiones que se encuentran en la vencidad del centro del cúmulo de la Nebulosa de Orión.

En resumidas cuentas, se tiene que la presencia de estrellas másivas dispara el nacimiento de futuras generaciones de estrellas, como ha ocurrido en la región de Orión. Por otro lado hemos aprendido que los vientos estelares que son básicamente un flujo de partículas cargadas, que vienen de las estrella másivas OB, o en el caso particular de θ^1 Ori C del grupo del Trapecio en el Cúmulo de la Nebulosa de Orión crean zonas de baja densidad. Además estos vientos estelares interaccionan con el gas de la Nebulosa para formar las ondas

de choques, también se da el caso que chocan con otros flujos de gas provenientes de los proplyds en las cercanías de la estrella ionizadora formando los ya mencionados choques estacionarios y con estrellas T Tauri segÃºn sea el caso en las partes más alejadas para formar los arcos de emisión. Dichos choques compactan el gas en la nebulosa y crean densidades no homogéneas que provocan el colapso gravitacional de la nube.

1.2 Proplyds

Hasta el momento ya es de nuestro conocimiento, que la Nebulosa de Orión alberga un conjunto de *Objetos Estelares Jóvenes* (YSOs por sus siglas en inglés). Por tanto esta nebulosa nos brinda la posibilidad de estudiar las estrellas, que aún están siendo rodeadas por su material primordial. En primera instancia una oportunidad de estudiarlas surge cuando estos objetos son iluminados por una estrella ionizante, en este contexto por θ^1 Ori C, de tal manera que el gas que rodea a las estrellas será ionizado y como consecuencia este material será visible en las mismas líneas de emisión que la nebulosa. Por otro lado es posible ver la componente del polvo en extinción contra la emisión de la nebulosa, dado que la mayoría de la emisión de la nebulosa viene del fondo como ha argumentado O'Dell et al. (2008). Pero no todo termina aquí, puesto que la iluminación de la estrella masiva sobre estos YSOs, no sólo permite verlos, sino que además en el proceso parcial o total de la fotoionización de los mismos, genera un excedente de presión que provoca que el material sea expulsado a través del mecanismo de la fotoevaporación y en este sentido habrá como resultado una destrucción inevitable de sus envolventes. Estas estrellas jóvenes que tienen esa particularidad, es decir características especiales locales de su entorno, se han etiquetado como una subclase dentro de los YSOs y han sido llamados proplyds (un acrónimo para “disco protoplanetario”) (O'dell & Wen, 1994).

Siendo más rigurosos un proplyd puede ser definido como una estrella de baja masa presecuencia principal, envuelta en un disco protoplanetario que está siendo fotoevaporado por los fotones ultravioletas (UV) de una estrella masiva. En la Nebulosa de Orión los proplyds son vistos en líneas de emisión como se dijo arriba, con una forma alargada donde uno de sus extremos que es más ancho que el otro (cabeza del proplyd), apunta en dirección a la estrella θ^1 Ori C.

1.2.1 Descubrimiento

El primero de estos objetos descubierto y posteriormente identificado como proplyd fue LV 2 (167-317) y fue visto en la cercanías del Trapecio. En trabajos posteriores se identificaron un conjunto de seis líneas de emisión no resueltas, es decir estrellas; en las cercanías del Trapecio (Laques & Vidal, 1979). Hasta el momento no se conocía de manera clara la naturaleza de los proplyds, pero dado que son fuentes de radio compactas de emisión térmica, fueron descubiertos en estudios llevados a cabo por el *Very Large Array* realizadas en el interior de la región de Huygens (Garay et al., 1987), por tanto con las interpretaciones de las radio fuentes, dió paso hacer una correcta identificación de los mismos (Churchwell et al., 1987). Con la intervención del *Telescopio Espacial Hubble (HST)* se pudo establecer la verdadera naturaleza de los proplyds, ya que con la cámara WFPC2 (O'dell & Wen, 1994) se pudieron obtener imágenes más claras y puras de esta región, como se puede ver en la figura 1.4. En dichas imágenes se pueden apreciar unos objetos cerca de la estrella ionizadora, con una estrella central de baja masa y en algunas ocasiones con una región oscura en el centro.

Como los proplyds emiten radiación, en las mismas líneas que la nebulosa, se obtuvo su espectro corregido por la contribución de la radiación provenientes del fondo. Entonces con las primeras observaciones terrestres tomadas con el Fabry-Perot (de La Fuente et al., 2003) y del espectrómetro Manchester Echelle Spectrometer del telescopio Isaac Newton

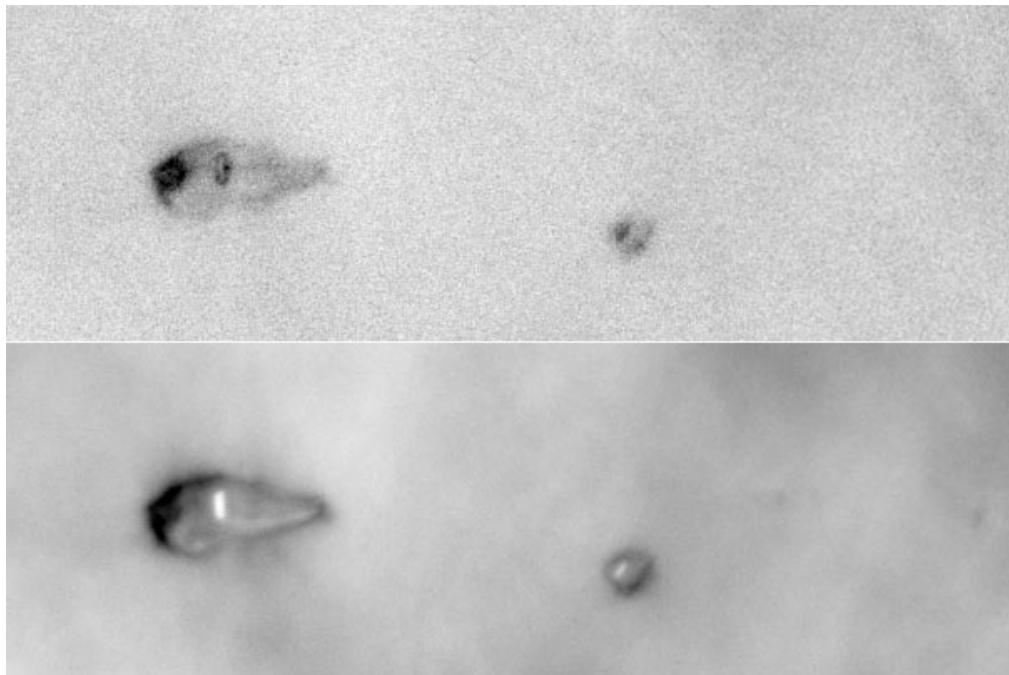


Figura 1.3: Imagen de los proplyds 182-413 (izquierda) y 183-419 (derecha). Son observaciones del *Telescopio Espacial Hubble (HST)*. La imagen de arriba corresponde a emisión de [O I] 6300 Å y la de abajo a emisión de H α . En ambos proplyds sobresale lo que parece ser un disco circunestelar muy brillante en [O I] (Bally et al., 2000). La emisión de [O I] cerca del frente de ionización es producido por la excitación por colisión. El campo de visión en cada marco es de $4.55'' \times 13.65''$.

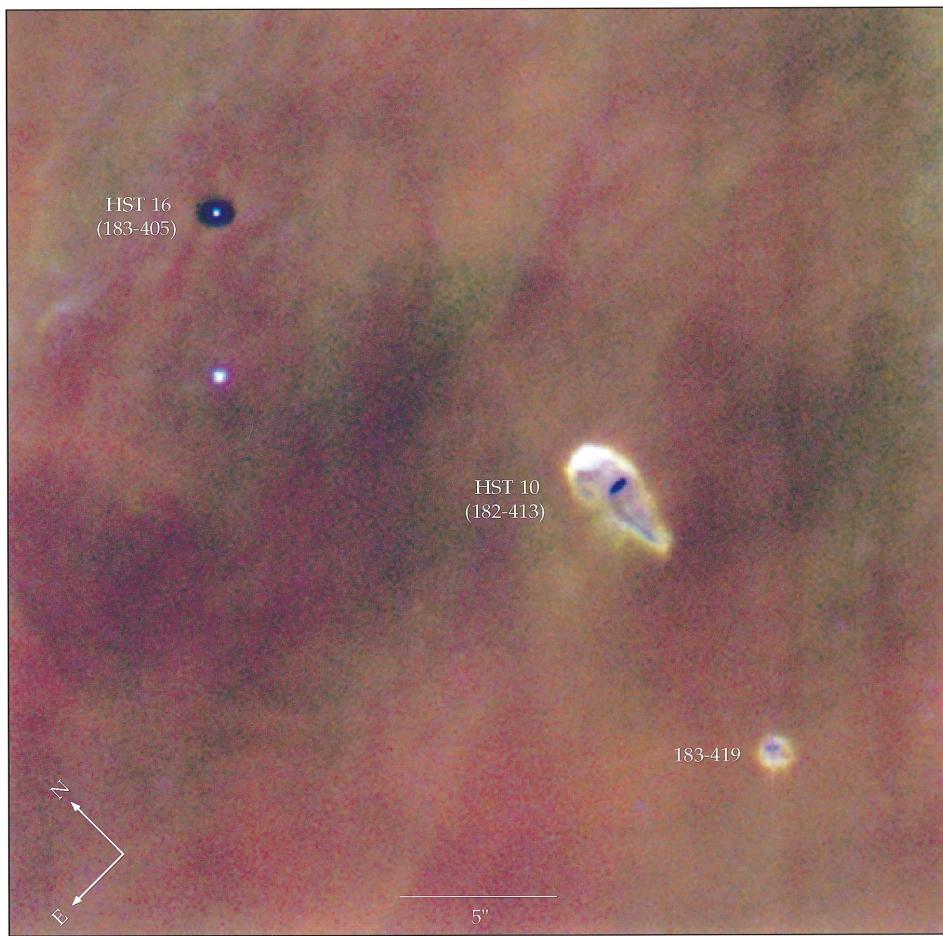


Figura 1.4: Imagen tomada con la Cámara Planetaria (PC) WFPC2-*HST*. Los colores indican las líneas de emisión o filtros usados; verde = $\text{H}\alpha \lambda 6563$, rojo = $[\text{N II}] \lambda 6584$ y azul = $[\text{O III}] \lambda 5007$ (Bally et al., 1998). En la imagen son perceptibles los proplyds 183-405 y 182-413, además se observa un objeto con emisión algo débil llamado 183-419.

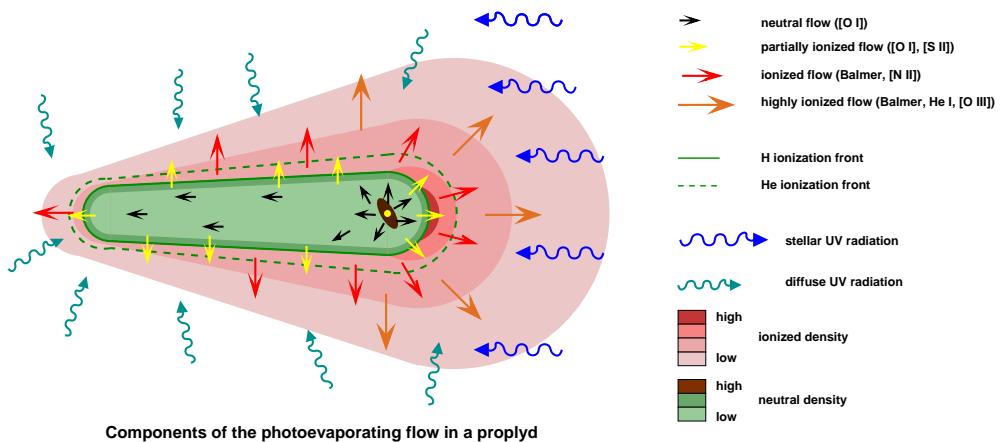


Figura 1.5: Modelo ampliamente aceptado para los proplyds, que básicamente representa un flujo fotoevaporado. Se tiene que el disco protoplanetario de una estrella joven de baja masa es afectado por los fotones estelares FUV y EUV. En este sentido la radiación FUV penetra en la superficie del disco de acreción generando una tasa de pérdida de masa, implicando con ello que se forme un flujo lento de gas neutro. Este gas neutro funciona como una capa protectora, pues absorbe la radiación EUV y es así como se forma un frente de ionización que apunta en la dirección de la estrella ionizadora, entonces este frente de ionización no es más que la cabeza del proplyd. La cola del proplyd se forma debido a la fotoevopación de la parte trasera del disco, por la radiación difusa UV. No obstante el campo de ionización difuso, que es el resultado de la recombinación del hidrógeno a su estado base (Henney & O'Dell, 1999), influyen de manera importante en el flujo ionizado de la cola. Claramente se puede ver que un proplyd es semejante a un cometa, aunque su cola no se debe al arrastrado por la presión de radiación como ocurre en los cometas reales.

(Henney et al., 1997) se lograron obtener espectros muy útiles, pero no se tenía mucha confianza en estos espectros debido a la alta corrección que se había hecho. Más tarde con espectrografía echelle de telescopios terrestres más grandes se produjeron mejores espectros a partir de líneas más fuertes de cuatro proplyds: 170-337 (HST 2), 177-341 (HST 1), 182-413 (HST 10) y 244-440 (Henney & O'Dell, 1999). Posteriormente se obtuvieron observaciones espectroscópicas con una alta resolución espacial del proplyd 167-317 (LV 2) (Vasconcelos et al., 2005). Los objetos 158-327 (LV 6) y 159-350 (HST 3) fueron estudiados con una buena resoluciónpectral en unas imágenes de la Faint Object Camera por su nombre en inglés del *HST* (Bally et al., 1998). No obstante el más completo estudio realizado sobre LV 2 a una alta resolución, vienen de unas observaciones (Henney et al., 2002) del doblete a 1907-1909 Å de [C III], usando el espectrómetro del *HST/STIS*, este análisis estuvo centrado en el microjet que sale del frente de ionización del proplyd.

1.2.2 Modelo estandar de los proplyds

En la sección anterior se ha dicho que la verdadera naturaleza de los proplyds en la ONC fue revelada por observaciones de alta resolución del *HST*, aunque ya anteriormente Churchwell et al. (1987) había escudriñado en su naturaleza con observaciones en el radio. Al comienzo se pensó que la cabeza del proplyd, se formaba por la interacción de un viento suave proveniente del disco de acreción estelar, con el viento rápido de θ^1 Ori C. Como a veces suele suceder en la ciencia, este modelo se dejó a un lado, puesto que se estableció que esta parte brillante del proplyd (cabeza), no eran más que frentes de ionización locales (O'dell & Wen, 1994), en los cuales su brillo superficial disminuía como es de esperarse con la distancia a θ^1 Ori C.

Es así que el modelo estandar y ampliamente aceptado postula la existencia de un disco de acreción interno de material molecular que está rodeando una estrella jóven de baja masa presecuencia principal, que a su vez está siendo fotoevaporado por los fotones ultravioletas de una estrella masiva (Johnstone et al., 1998; Henney & Arthur, 1998). Este disco sólo es afectado por la radiación externa Ultravioleta Lejano (FUV, $\lambda > 912 \text{ \AA}$), es decir radiación con energía menor a los 13.6eV necesarios para fotoionizar el hidrógeno (ver figura 1.5). Esto ocurre porque la fotodisociación de gas molecular que es calentado y suavemente expulsado a partes externas del disco forma una atmósfera extendida que es ópticamente gruesa a la radiación del continuo Lyman (EUV, $h\nu > 13.6 \text{ eV}$; $\lambda < 912 \text{ \AA}$), en otras palabras los fotones FUV son los responsables de disociar las moléculas y de calentar el gas de la región de fotodisociación (PDR) a $T \sim 100 - 1000 \text{ K}$ dejando como resultado una estela de material neutro (Johnstone et al., 1998). Lo anteriormente dicho implica que esta atmósfera interna está siendo rodeada por un frente de ionización local, que es más brillante en la dirección en la que se encuentra la estrella ionizante dominante, también tiene una zona con un brillo más débil que tiene la forma de la cola de un cometa, debido a la fotoinización del material por la radiación difusa del continuo de Lyman.

1.2.3 Choques de proa asociados a proplyds

Los proplyds que están situados cerca de la estrella masiva $\theta^1 \text{ Ori C}$ están acompañados por arcos débiles, que son visibles por la emisión de [O III] y de H α . También se pueden ver por la emisión de polvo de silicato, es decir en el infrarrojo a $11.7 \mu\text{m}$ (García-Arredondo et al., 2001; Hayward et al., 1994). A partir de unas imágenes de H α +[N II] del *HST* donde se observan los arcos en estas líneas de emisión, Bally et al. (1998) propone que estos arcos trazan la estructura de choques de proa formados por la interacción del viento estelar proveniente de $\theta^1 \text{ Ori C}$, con el flujo de material fotoevaporado del frente de ionización de los proplyds. La figura 1.6 es una región de la Nebulosa de Orión centrada en el Trapecio, que contiene los primeros objetos descubiertos por Laques & Vidal (1979). Cerca de una docena de proplyds iluminados externamente son visibles en esta imagen, además se logra apreciar que algunos tienen arcos radiativos y que todos tienen un frente muy brillante por las líneas de emisión en dirección a $\theta^1 \text{ Ori C}$.

1.3 Objetos LL en la Nebulosa de Orión

Los típicos Objetos LL llamados así por la primera versión de estrellas LL orionis descubierta en la Nebulosa de Orión, son básicamente arcos de emisión (vistos en líneas de emisión) asociados a estrellas jóvenes de baja masa presecuencia principal situadas en regiones externas de la Nebulosa de Orión (Henney et al., 2013) (ver figura 1.7). El prototipo de estos objetos es la estrella T Tauri LL Ori cuyo arco de emisión fue descubierto hace 36 años (Gull & Sofia, 1979). Posteriormente se identificaron seis objetos más, con características similares (Bally & Reipurth, 2001) y fueron denotados empezando desde LL1 hasta LL7, donde el primero de estos corresponde a LL Ori. La lista de Objetos LL detectados siguió en aumento, puesto que gracias a datos de líneas de emisión en el óptico (H α 6563 \AA , [N II] 6584 \AA y [SII] 6716, 6731 \AA) del Telescopio Espacial Huble (HST) (Bally et al., 2000, 2006) se han identificado cerca de 20 objetos. No obstante muchos de estos objetos tienen jets muy coliminados que se originan en la estrella T Tauri, que de alguno u otra forma alteran la morfología de los arcos de emisión. Es el caso de LL1 quien poseó un jet hipersónico del tipo Herbig Haro conocido como HH 888.

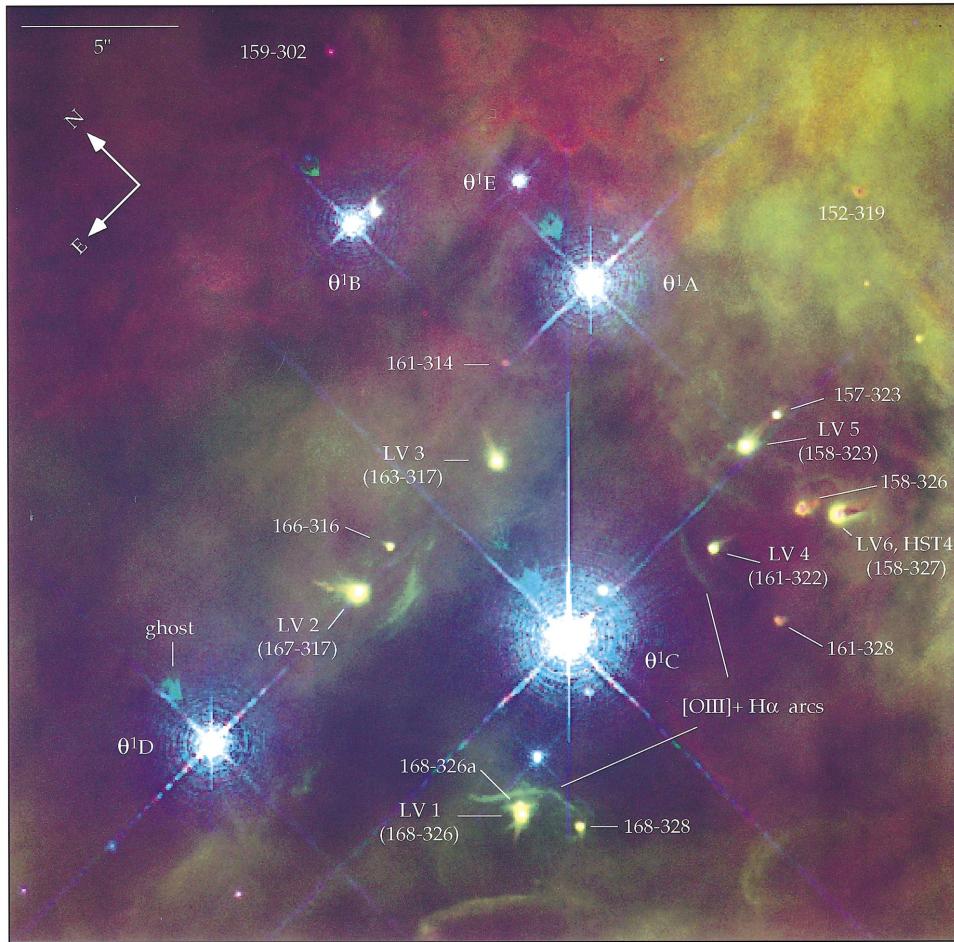


Figura 1.6: Región de la Nebulosa de Orión centrada en el Trapecio, como el resultado de un mosaico de imágenes de la Cámara Planetaria; WFPC2 del *HST* tomadas durante el ciclo 4 en unas observaciones de la Nebulosa de Orión, usando unos filtros de banda angosta. Los colores indican; verde es $\text{H}\alpha$, rojo es $[\text{N II}]$ y azul es $[\text{O I}]$. Imagen tomada del artículo de Bally et al. (1998).

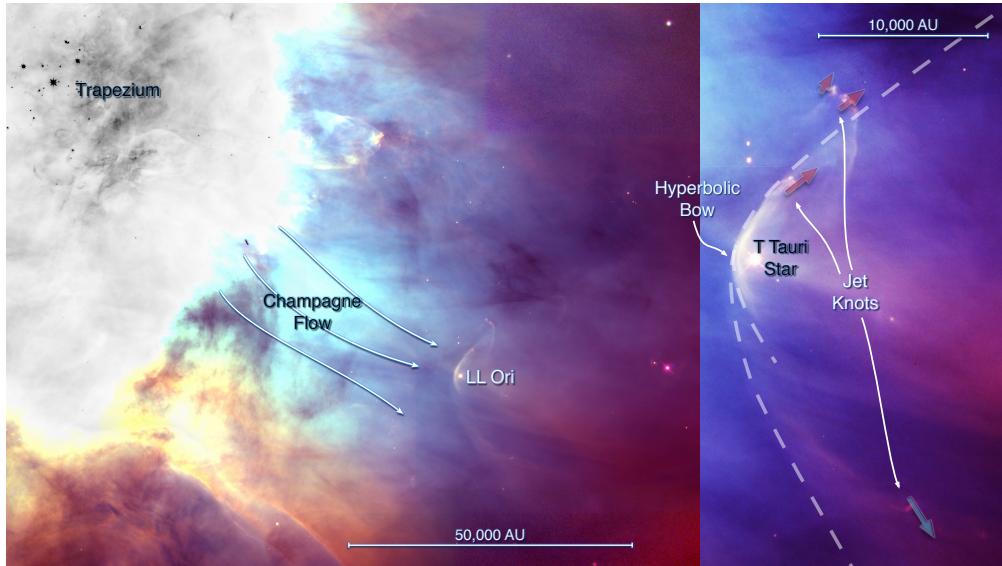


Figura 1.7: *Izquierda.* Ubicación de LL Ori en el suroeste de la Nebulosa de Orión. Esta imagen es el resultado de la combinación de observaciones del HST-WFPC2 (O'dell & Wong, 1996) con los filtros: H α λ 6563 (verde), [N II] λ 6584 (rojo) y [O III] λ 5007 (azul). Hay una región de saturación en el Trapecio y esta aparece en color blanco siendo una imagen superpuesta de H α . *Derecha.* Es una ampliación de la zona donde se encuentra LL Ori. Se puede ver el hiperbólico choque de proa, que se forma debido a la interacción de un viento de una estrella T Tauri, con el flujo de champaña de gas ionizado proveniente del núcleo de la Nebulosa de Orión. También se puede apreciar un objeto HH (jet) asociada a la estrella T Tauri, en el cual el choque de este tiene movimientos propios (Henney et al., 2013) y una velocidad radial (flecha de color). Las velocidad de las alas del choque es de $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$, mientras que la velocidad del jet es muy superior ($60 - 120 \text{ km s}^{-1}$). Imagen de William Henney.

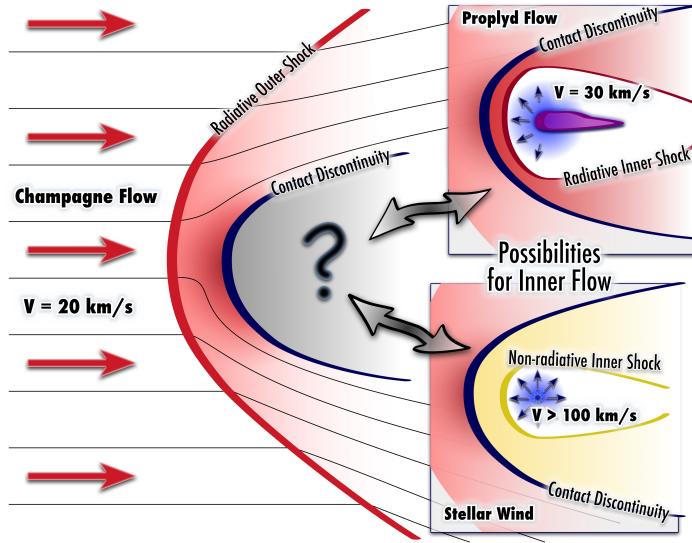


Figura 1.8: Esquema general de los Objetos LL

1.3.1 Naturaleza de los arcos de proa LL

Los objetos LL Orionis pueden ser interpretados como la interacción supersónica de un viento interno de una estrella T-Tauri, con el flujo ambiental de la Nebulosa, aunque es apresurado pensar en una típica estrella T Tauri como el objeto que proporciona el viento interno, puesto que aún no se conoce con certeza la naturaleza del viento interno, debido a que el flujo fotoevaporado proveniente del disco protoplanetario de un proplyd también es un candidato muy fuerte para el viento interno (en esta tesis se intentarán aclarar estos argumentos). En una escala más grande el viento externo parece ser originario de la región H II en el núcleo de la Nebulosa de Orión. Esto es debido a que cuando un frente de ionización envuelve un objeto muy denso, se forma un flujo fotoevaporado de gas ionizado con un frente D-crítico (Dyson, 1968). Entonces, a este flujo de ahora en adelante lo llamaremos flujo de champaña y como han indicado Mellema et al. (2006); Arthur et al. (2011); Ercolano et al. (2012), este flujo surge durante los procesos de evolución de una región H II dentro de una nube molecular turbulenta.

Esquema general de los Objetos LL. La figura 1.8 nos muestra un esquema general de los choques de proa en la Nebulosa de Orión, es así que los arcos hiperbólicos de los objetos LL se forman, debido a que el flujo de Champaña (izquierda), que entre otras cosas es ligeramente supersónico ($M \simeq 2$) choca con un obstáculo (derecha), que en este caso es un flujo también supersónico asociado a una estrella joven de baja masa, no obstante el choque externo es muy radiativo proporcionando con esto, un arco de emisión brillante, es decir muy visible. La naturaleza del obstáculo aún no es clara; puesto que es posible que sea el flujo suave de un gas ionizado proveniente del frente de ionización del Proplyd (arriba) o podría ser el viento de una estrella T Tauri (abajo).

1.4 Choques de proa estacionarios en la Nebulosa de Orión

La zona chocada. En general se dice que los choques de proa de los objetos LL y de los proplyds son estacionarios, debido a que no se les han detectado movimientos propios y además muestran pequeñas velocidades radiales. Por otro lado, la región chocada es ancha debido a que la interacción de dos viento, provoca que se forme un doble choque, entonces tenemos un arco interno y un arco externo separados cierta anchura. Ahora sí unos de estos choques es fuertemente radiativo será visible un arco de emisión. Si este el caso, el choque podría considerarse isotérmico, puesto que la zona de enfriamiento en el choque es muy pequeña cuando el flujo es medianamente supersónico ($20 - 60 \text{ km s}^{-1}$) y la densidad es alta (mayor a unos cientos cm^{-3}). Este fenómeno es comparable a lo descrito por Henney (2002) en la interacción de los vientos de dos proplyds; cuando la temperatura del gas en la cáscara chocada se eleva por la termalización de la energía cinética pre-choque, dando como resultado un aumento en las emisiones, puesto que la energía térmica se irradia y el gas retorna nuevamente a su estado de equilibrio. En el caso particular de LL1, la emisión en la cáscara chocada en equilibrio está dominada por líneas de recombinação tales como $\text{H}\alpha$, mientras que para las líneas excitadas colisionalmente dominan las de [O III] en los objetos cerca del Trapecio y las líneas de [N II] en los arcos LL donde las líneas de [O III] son débiles.

Dos poblaciones de choques de proa. Los choques de este contexto se han dividido en dos grupos; el primer grupo corresponde a los clásicos choques de proa de los proplyds (Roberto et al., 2005; Bally et al., 1998), de estos objetos se ha hablado con más detalle en §1.2.3 y el segundo grupo corresponde a los típicos arcos hiperbólicos LL (ver figura 1.9). En el caso de los proplyds que están situados en las proximidades del Trapecio, el choque de proa externo no es visible porque este se produce por la interacción con un viento muy rápido y de baja densidad ($n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$) de una estrella O, dando como resultado que la cáscara externa sea no-radiativa. No obstante el arco interno si es visible, dado que el choque interno se forma a partir de un flujo de gas muy denso ($10^3 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$) y ligeramente supersónico ($M \simeq 3$) proveniente del frente de ionización del proplyd. En el caso de los arcos hiperbólicos, se tiene que están ubicados en regiones externas de la nebulosa, es decir están mucho más lejos del Trapecio, incurriendo en el hecho de que el arco exterior de la región chocada sea radiativo, por tanto en este domina la emisión. Otra característica diferenciadora de sus semejantes los proplyds, es que los arcos de estos tienden a hacer más abiertos.

1.4.1 Choques de proa producidos por Objetos HH y su relación con los Objetos LL

La importancia de hablar de los jets Herbig Haro en este trabajo radica en dos particularidades: primero, no confundir los choques de proa de los objetos LL con los choques de proa producidos por los jets HH. Se tiene que los choques de los objetos Herbig Haro a diferencia de los arcos LL, son producidos por la interacción de un jet colimado de material que se mueve a altas velocidades², con el ambiente de gas nebuloso (O'dell & Wen, 1994). Además de eso los choques HH muestran grandes movimientos propios y altas velocidades radiales. Segundo, varios objetos LL tienen jets muy colimados, lo cual a primera vista, sugiere que estos le dan la forma a los arcos LL, pero recientes estudios han mostrado que en el caso de LL1, la cinemática del choque de proa y del jet Herbig Haro (HH 888) no coincide, puesto que la del choque es simétrica y la del jet es asimétrica. Mientras para LL2 la asimetría cinemática del jet HH 505 es totalmente opuesta al del choque de proa del objeto LL en cuestión (Ver figura 1.7 y figura 1.11 arriba izquierda). Esto parece indicar que los choques

²Estos jets probablemente se originan en un objeto estelar joven.

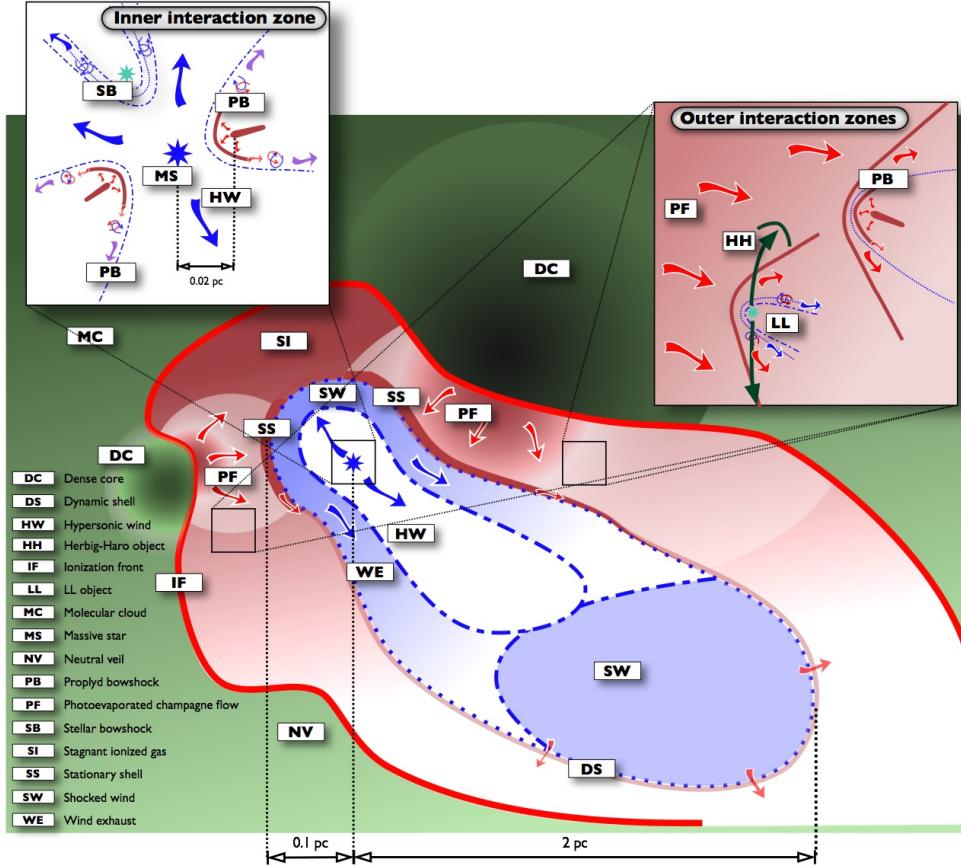


Figura 1.9: Esquema de la interacción de los vientos en la Nebulosa de Orión. la región de color verde corresponde a gas molecular neutro cuya temperatura oscila entre los 50 y los 1000 K; la zona roja es el gas fotoionizado, ahí la temperatura es de aproximadamente 10^4 K y las densidades van de 10^2 a 10^4 cm^{-3} y por último el color azul representa el material del viento estelar con $T \geq 10^6$ K y $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$. Las flechas hacen referencia al flujo de gas transónico y supersónico, por otro lado los choques de proa radiativos son ilustrados por las líneas rojas oscuras y gruesas, mientras que los choques no-radiativos son ilustrados por la línea discontinua azul y la línea de puntos también azul indica la discontinuidad de contacto. Los choques de proa ocurren en dos regiones de la nebulosa: una zona interna de interacción (cuadro izquierda arriba), donde los choques de proa externos se producen debido al viento hipersónico de una estrella másiva ($V \sim 1000 \text{ km s}^{-1}$) y una zona externa de interacción (cuadro derecha arriba), donde los choques externos se forman debido al flujo ligeramente supersónico y photoevaporado de champaña ($V \sim 20 \text{ km s}^{-1}$). El choque externo es no-radiativo en la zona interna de interacción pero radiativo en la zona externa de interacción. Esto sugiere que el choque de proa interno es radiativo cuando el viento interno es un flujo de gas photoevaporado de un proplyd. (Imagen de William Henney).

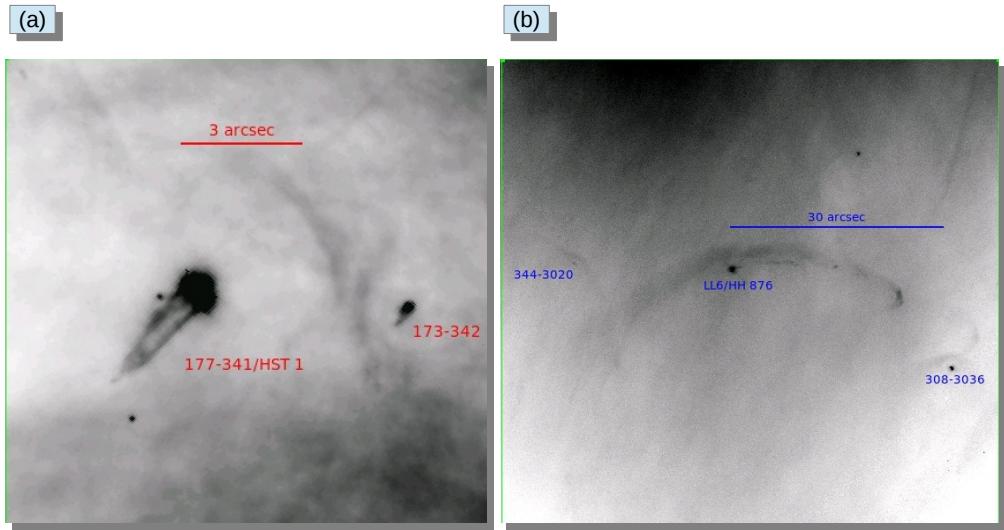


Figura 1.10: Tipos de choques estacionarios en la Nebulosa de Orión. (a) Choques de proas asociados a proplyds; el choque se forma por la interacción de un flujo de gas fotoevaporado que viene del proplyd a una velocidad entre $30\text{--}40\text{ km s}^{-1}$, con un viento que viaja a una alta velocidad ($> 1000\text{ km s}^{-1}$) desde una estrella masiva del Trapecio. En la imagen aparecen los proplyds 177-341 y 173-342. También se observa un choque formado por la interacción de los vientos de dos proplyds.(b) Arcos hiperbólicos LL; el choque se forma debido a la interacción de un flujo de champaña de baja velocidad ($\simeq 20\text{ km s}^{-1}$) con un viento estelar que viene de una estrella T-Tauri o de un proplyd. Estas imágenes son tomadas de las observaciones del HST-ACS usando el filtro f658n, es decir de $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ y se observan los objetos; LL 6 con su respectivo jet HH 876, 308-3036 y 344-320.

hiperbólicos son independientes de los jets Herbig Haro (Henney et al., 2013). Aunque también puede darse el caso de que las alas de los arcos pueden estar asociadas a los jets HH, como parece ser el caso de LL 6 en la figura 1.10, donde no se sabe si las alas de su arco son generadas por el jet o por el contrario no lo son.

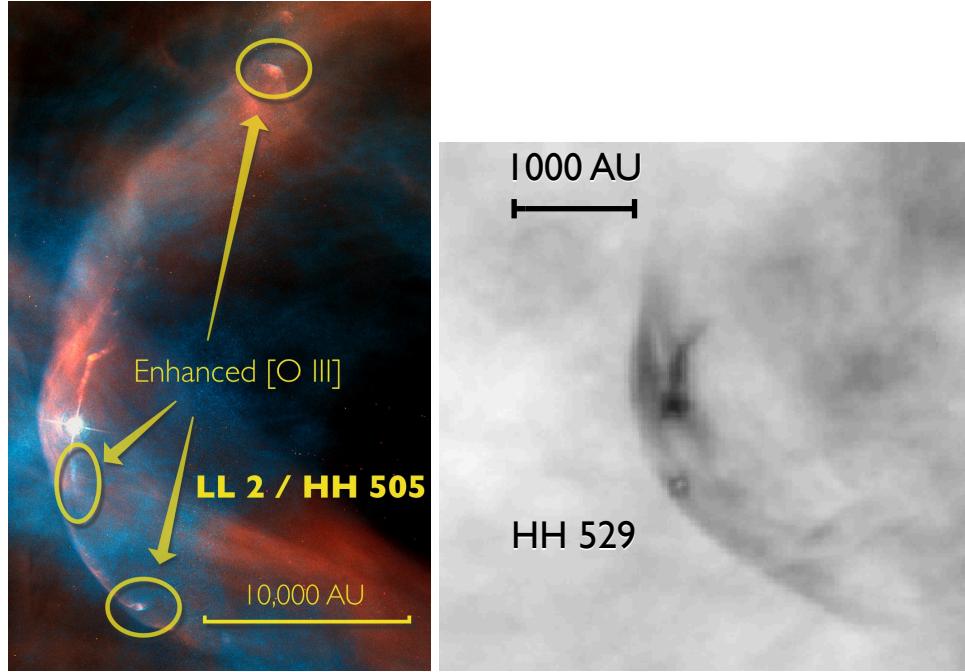
1.4.2 Notación de los objetos LL y de los proplyds

Como ya se ha sugerido anteriormente, O'dell & Wen (1994) estudiaron muy a fondo los proplyds y junto a ello idearon una nomenclatura para nombrarlos, dicha notación está basada en la posición de la estrella en el cielo. En este sentido, las coordenadas en ascención recta y declinación de la estrella central son las piezas clave para la designación del proplyd. Si tenemos el proplyd con las coordenadas (A.R., DEC) = (5:35:17.67, -5:23:41.0), entonces este tendrá por nombre 177-341. En este orden de ideas la notación de los objetos LL y proplyds descritos en este estudio se basa en la configuración ya mencionada, además hemos utilizado este procedimiento para designar la nomenclatura de los arcos LL o choques de proa de proplyds que hemos identificados (nuevos) en la Nebulosa de Orión, que entre otras cosas 20 de estos objetos de 73 no han sido reportados previamente en la literatura.

1.5 Estructura de la tesis

La estructura de la tesis está organizada de la siguiente forma. En el capítulo 2 presentamos una descripción de las observaciones empleadas en este trabajo, por tanto se discuten sobre las características de las cámaras ACS y WFPC2 al bordo del *HST*. En el capítulo 3 se describen las mediciones de las formas de los choques de proa, las mediciones de los valores del brillo superficial y las calibraciones del flujo de H α y [N II]. En el capítulo 5 se muestra un tratamiento teórico de este trabajo, que son procedimientos matemáticos para describir los choques de proa estacionarios. En el capítulo 4 presentamos los resultados de las modelaciones de las observaciones, donde se muestran las formas de los choques y demás parámetros obsevacionales, tambien se ilustran los resultados astrofísicos, en los cuales se muestra la naturaleza de las colisiones del viento de las estrellas masivas del Trapecio con el viento de estrellas T-Tauri o con el flujo de gas ionizado de proplyds o de la interacción de estas últimas con el flujo de champaña del núcleo de la nebulosa en diferentes regiones de la Nebulosa de Orión. Por último, el capítulo 6 es un compendio de las conclusiones a las que hemos llegado sobre el tratamiento de los choques de proa estacionarios, formados por la interacción de dos flujos.

(a)



(b)

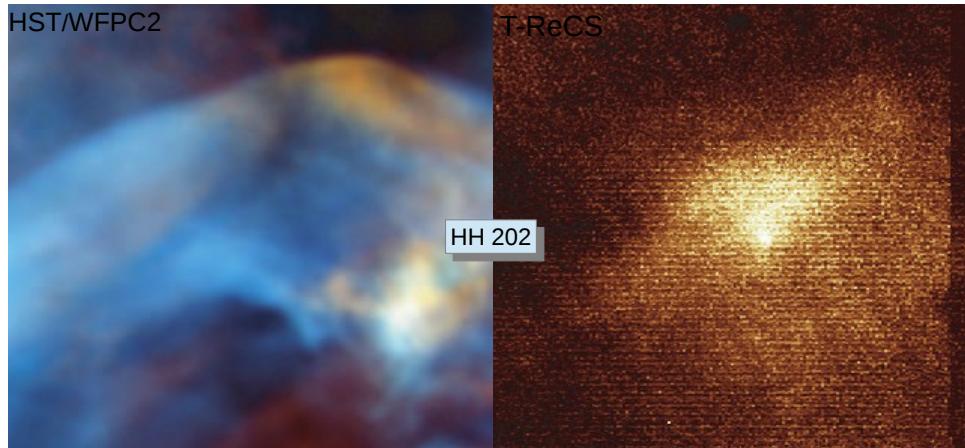


Figura 1.11: (a) *Izquierda.* En la imagen se observa otro de los ya estudiados objetos LL en Orión. Es básicamente la estrella T-Tauri IX Ori ubicada en una región lejana en el oeste de la Nebulosa de Orión, con su choque de proa asociado (LL1) y su jet bipolar HH 505. También son visibles regiones de emisión de [O III]. *Derecha.* Superficie de trabajo producida por un jet hipersónico muy colimado conocido como HH 529. Tienen altas velocidades radiales ($50 - 100 \text{ km s}^{-1}$) y también altos movimientos propios perpendiculares al arco (Imágenes de Henney). (b) Choque de proa de un objeto HH conocido como HH 202, (izquierda) del HST-WFPC2 y (derecha) a 11.7μ (T-ReCS). Se tiene que en la imagen del HST los colores indican; verde H α , rojo [N II] y azul [O III] (Smith et al., 2005).

Capítulo 2

Descripción de las observaciones empleadas

Para este estudio se usaron observaciones de unos archivos del *Telescopio Espacial Hubble (HST)*, debido a que este nos brinda unas imágenes con una excelente resolución angular permitiéndonos estudiar de manera efectiva una gran cantidad de objetos estelares, tales como los objetos LL y los arcos de los proplyds en la Nebulosa de Orión, los cuales presentan fuertes líneas de emisión de $\text{H}\alpha \lambda 6563$ y $[\text{O III}] \lambda 5007$. Es así que en las imágenes tomadas por el *HST* los choques de proa resultan ser muy visibles en el óptico que en cualquier otras líneas de emisión, puesto que en la cáscara chocada domina la emisión de líneas de recombinación tales como $\text{H}\alpha$ y para el caso de líneas generadas a partir de la excitación por colisión dominan esencialmente las de $[\text{O III}]$.

Por tanto en este trabajo se han usado las imágenes de la cámara *Advanced Camera Survey* a bordo del *Telescopio Espacial Hubble (HST)* por sus siglas en inglés) como parte del Programa GO-9825 con investigador principal Bally et al. (2006), para identificar los objetos LL y trazar la forma de los choques de proa. Esta cámara cuenta con el filtro F658N lo que indica que son imágenes de $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$. La importancia de utilizar estas observaciones radica en que estas imágenes tienen una buena señal a ruido, debido a que manifiestan grandes tiempos de exposición, permitiéndonos analizar óptimamente las fuentes que se desean estudiar. No obstante una de las desventajas de estas observaciones; es que no tienen una cobertura completa de la Nebulosa de Orión, por ejemplo los objetos LL7 y 4285-458 quedan por fuera de estas imágenes. Otra desventaja palpable de las observaciones del ACS-F658N; es que dichas imágenes están contaminadas por las líneas de $[\text{N II}] \lambda 6584$.

Para solucionar el problema de la falta de cobertura en las imágenes de Bally, se cuentan con unas observaciones de Robberto et al. (2013) las cuales también son de la cámara *Advanced Camera Survey* en su canal *Wide field Channel* (ACS-WFC) (las siglas WFC utilizadas para referirse al canal de la cámara ACS no se debe confundir con WFC del WFPC2, puesto que en este caso significa *Wide Field Camera*), pero con la diferencia de que estas hacen parte del programa Treasury, estas imágenes si tienen una cobertura completa de la Nebulosa de Orión y además presentan una alta señal a ruido. Para solucionar el problema de la contaminación por $[\text{N II}]$, como veremos en este capítulo contamos con unas observaciones de la cámara *Wide Field and Planetary Camera 2* (WFPC2) también de Robberto. La resolución de las imágenes de esta cámara es muy baja, los pixeles de los detectores son más grandes por un factor de ~ 2 en comparación al ACS pero el “point-spread function” (PSF) queda igual, entonces no es mostrada adecuadamente en los pixeles del WF del WFPC2 y esto implica un problema a la hora de sustraer la PFS de un objeto del fondo mucho más débil, además la eficiencia del instrumento en comparación al ACS es mucho más baja. Pero albergan la ventaja de que tiene el filtro F656N que sólo deja pasar las líneas de $\text{H}\alpha$ con

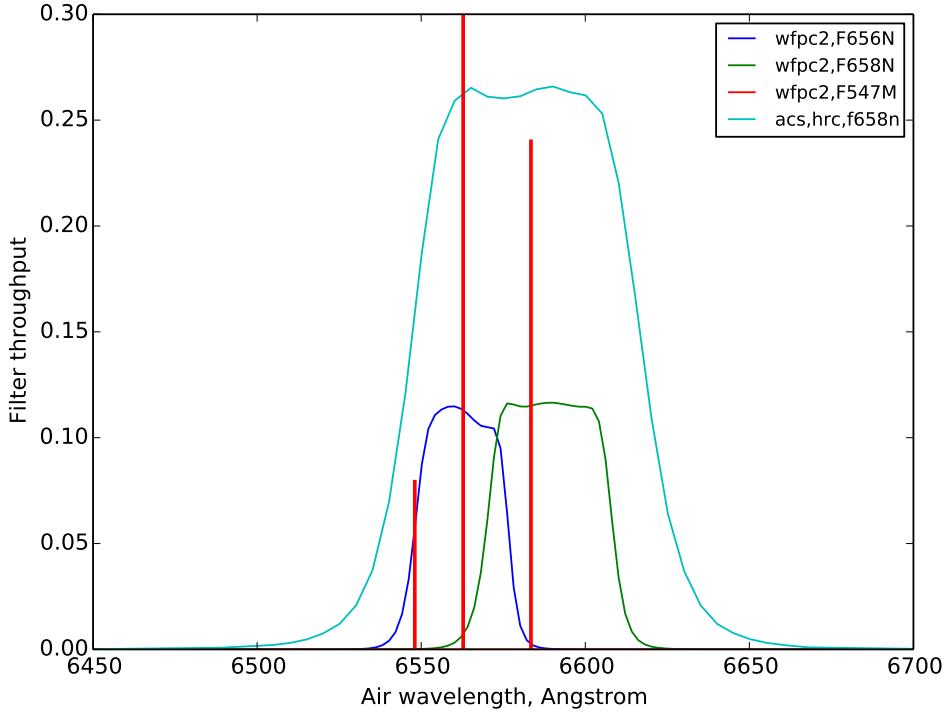


Figura 2.1: Curvas de transmisión de los filtros; F656N y F658N de la cámara WFPC2 y del filtro F658N de la cámara ACS. Las líneas verticales de color rojo representan en el mismo orden las líneas de emisión de: [N II] 6548 Å, H α 6563 Å, [N II] 6583 Å.

una contaminación mínima de la línea de [N II] como se puede ver en la figura 2.1. Entonces se usarán estas observaciones para separar las líneas de H α de las líneas de [N II] en la observaciones de Bally. Puesto que necesitaremos el brillo superficial de H α , para determinar la densidad electrónica y presión térmica en la cáscara chocada de los objetos LL y proplyds.

Por último, contamos con las observaciones de unos viejos mosaicos de la cámara WFPC2 como parte del programa GTO-5085. Además de las desventajas de esta cámara mostradas arriba, otra desventaja que tienen estas observaciones es que la cobertura es mas restringida, particularmente las observaciones del PC que solo cubren el centro de la nebulosa con radio menor a medio minuto de arco aproximadamente. Pero estas tienen la ventaja que con la implementación de los filtros f656n y f658n en este programa, se obtuvieron imágenes de H α y [N II] separadamente, útiles para la verificación de la calibración del flujo. En este programa se tomaron imágenes del continuo usando el filtro f547m, útil en nuestro caso para hacer la corrección del brillo superficial por la contribución del continuo. Finalmente, tenemos un mosaico de unas imágenes de [O III], obtenidas mediante el uso del filtro f502n durante las visitas del *HST*, estas imágenes nos van a permitir ver los objetos de alta ionización en las regiones cercanas del Trapecio donde las estrellas son más débiles comparadas con los arcos vistas con este filtro. Otra utilidad de usar estos datos más antiguos es que nos permite distinguir entre los arcos estacionarios y los ecos de objetos HH por su movimiento propio. A continuación daremos una descripción más detallada del juego de observaciones utilizadas en esta tesis.

Cuadro 2.1: Observaciones de las cámara ACS y WFPC2

Instrumento	Filtro	Programa	Línea de emisión	Tiempo de exposición (s)
ACS-WFC	F658N (Banda ancha)	GO-9825	H α + [N II]	500
ACS-WFC	F658N (Banda ancha)	Treasury	H α + [N II]	340
WFPC2	F656N (Banda angosta)	Treasury	H α	400
WFPC2	f658n	GTO-5085	[N II]	500
WFPC2	f656n	GTO-5085	H α	200
WFPC2	f502n	GTO-5085	[O III]	200
WFPC2	f547m	GTO-5085	Continuo	50

2.1 La cámara ACS-WFC, El programa GO-9825 y el filtro F658N

La cámara ACS-WFC está basada en un masaico de dos detectores CCD de 2048×4096 pixel. La óptica del instrumento ofrece una escala espacial de aproximadamente 50 mas pixel $^{-1}$, correspondiendo a un campo de visión de $202'' \times 200''$. Con esta cámara se cuenta con la presencia del filtro F658N (H α + [N II]), el cual está destinado al mapeo del material circunestelar de las estrellas con la más alta resolución posible, sobre todo para discriminar fuentes extendidas y evaluar la presencia de emisión circunestelar (Robberto et al., 2013).

En primer lugar hemos trabajado con las imágenes de Bally et al. (2006), las cuales son observaciones que han sido obtenidas con la cámara *Wide Field Channel* (WFC) del ACS abordo del *HST*, durante el ciclo 12 del programa GO-9825, donde se obtuvieron 26 imágenes que cubren gran parte de la Nebulosa de Orión, cada imagen fue tomada durante una órbita del *HST*. Las áreas cubierta fueron observadas usando el filtro F658N (H α +[N II]) y tiempos de exposición de 500 s por punto observado en la nebulosa. Dos posiciones, separadas por $96''.8$ en el eje-y de los detectores del ACS fueron observados durante cada órbita (Bally et al., 2006), correspondiendo a un campo de visión de aproximadamente $200'' \times 300''$ para cada imagen resultante (Bally et al., 2006). En este sentido las distintas imágenes de la Nebulosa de Orión tomadas durante las 26 órbitas cubrieron un área total de aproximadamente 415 arcmin 2 . La figura 2.2 muestra la ubicación de cada uno de los 26 campos (visitas) del ACS, donde se han superpuesto en una imagen de [S II] tomada por el telescopio reflector Mayall ubicado en Kitt Peak cerca de Tucson, para mayor información hechar un vistazo al artículo de Bally & Reipurth (2001). Cada rectángulo representa un campo de cada visita del *HST*.

La importancia de utilizar las imágenes de Bally radica en que la señal a ruido es muy buena, debido a que tienen tiempos más largos de exposición, con esto lograron que el detector CCD recojiera el mayor número de fotones posibles por pixel, implicando que la señal sea muy alta en comparación al ruido. Para nuestro trabajo vamos a utilizar estas imágenes para trazar la forma de los arcos de proa radiativos de las estrellas LL Ori, puesto que en estas imágenes se logran ver de manera clara los límites de la cáscara chocada.

Por otro lado, como ya se dijo arriba esta cámara (ACS) contiene el filtro F658N, el cual es un filtro de banda ancha (50\AA), que permite obtener imágenes de H α + [N II], donde principalmente domina las líneas de H α y en menor grado las líneas de [N II]. Sin embargo, la desventaja de utilizar estas observaciones es que no tiene una cobertura completa de la Nebulosa de Orión¹ y además estas observaciones están contaminadas por líneas de [N II].

¹Los objetos, LL7 y 4285-458 quedan por fuera de los campos de Bally.

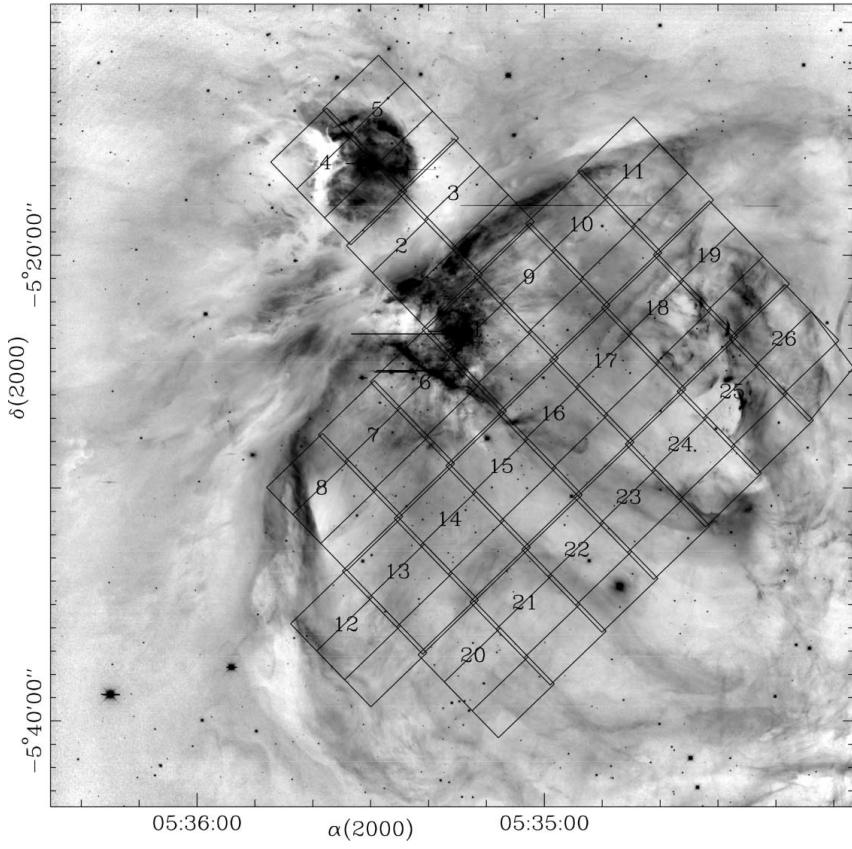


Figura 2.2: Posiciones de los 26 campos del ACS observadas con el *HST* durante el ciclo 12 del programa GO-9825, superpuestas en una imagen de [S II] obtenida con un mosaico de detectores CCD del telescopio reflector Mayall situado en Kitt Peak, Arizona. Los rectángulos representan las imágenes CCD del ACS con un tamaño de 2046×4096 pixel cada uno. Esta imagen es tomada de Bally et al. (2006).

Por último es importante señalar que de los 26 campos del ACS-F658N que mapean la región, nuestros objetos se encuentran distribuidos en los campos: 01, 02, 06, 07, 08, 09, 14, 16, 17 y 24. En la figura 2.3 se muestra como es la apariencia de uno de estos campos (visita) de la cámara ACS.

2.2 Programa Treasury del Telescopio Espacial Hubble

El Programa Treasury del *HST* descrito en el artículo de Robberto et al. (2013), fue destinado para el estudio de las componentes estelares de la ONC en las longitudes de onda del visible. El programa se basa en un total de 104 órbitas (ciclo 13), cubriendo de este modo las regiones más brillantes de la Gran Nebulosa de Orión en el rango del espectro electromagnético que caen en el óptico, usando filtros de banda ancha para obtener la fotometría más precisa del mayor número posible de objetos de baja masa presecuencia principal. Las cámaras a bordo del *HST* usadas para este fin son; la ACS-WFC, la cámara WFPC2 y la Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrograph (NICMOS), las imágenes de esta última cámara no son consideradas para este estudio.

La cámara ACS-WFC y el filtro F658N. Con la cámara ACS como parte del Programa Treasury se tomaron imágenes en el óptico (estrictamente hablando de $\text{H}\alpha$) de la Nebulosa de Orión cubriendo un área total de 627 arcmin^2 (correspondiendo a 904 Mpix aproximadamente) como resultado de las 104 visitas del *HST*, usando el filtro F658N y a diferencia de las observaciones de Bally un tiempo de exposición de 304 s. En la figura 2.4 se logran ver las posiciones de los campos de la cámara ACS del Programa Treasury superpuestos en una imagen de la Nebulosa de Orión.

La cámara WFPC2 y el filtro F656N- $\text{H}\alpha$. La cámara WFPC2 actualmente remplazada por la Wide Field Camera 3 usó 4 CCDs de 800×800 pixel a bordo del *HST*. Tres de esos detectores comprenden la *Wide Field Camera* (WFC) y tomaron imágenes de $150'' \times 150''$ con una resolución espacial de $100 \text{ mas pixel}^{-1}$ el campo de visión de estas imágenes tienen forma de “L”. El cuarto detector conocido como la Cámara Planetaria (PC) tomó imágenes más pequeñas esto es de $34'' \times 34''$ correspondiendo a una escala espacial de $46 \text{ mas pixel}^{-1}$ y su campo de visión son campos cuadrados (McMaster & et al., 2008). Un compendio de imágenes de Robberto tomadas con la WFPC2, han de brindar otra oportunidad de estudiar los arcos LL de la Nebulosa de Orión. Puesto que la ya mencionada WFPC2, ha tomado un conjunto de imágenes que cubren en su mayoría a la Nebulosa de Orión a diferencia de las imágenes de Bally que no tienen una cubertura total de la misma. Se han usado 104 órbitas del *HST* para dicho fin, como parte del Programa Treasury (Robberto et al., 2013). En la figura 2.5 se pueden apreciar los campos (visitas) del WFPC2, que entre otras cosas cubren un área total de 570.5 arcmin^2 . El tiempo de exposición se puede ver en la tabla 2.1.

Uno de los filtros usados en este ambicioso programa es el filtro F656N. Este es un filtro de banda angosta de $\text{H}\alpha$, que sólo permite el acceso de estas líneas ($\text{H}\alpha \lambda = 6563 \text{ \AA}$), es así que no permite que pasen las líneas de [N II] ($\lambda = 6583 \text{ \AA}$). Entonces para este trabajo usamos las observaciones de Robberto et al. (2013) (WFPC2) debido a que estas imágenes son sólo de $\text{H}\alpha$. En este orden de ideas, la idea de usar las imágenes de la cámara WFPC2-F656N va a permitir que sea posible separar las emisiones de $\text{H}\alpha$ de [N II] en las imágenes de Bally, subsecuentemente podremos utilizar estas imágenes de ACS corregida por [N II] para determinar parámetros astrofísicos tales como el flujo de momento de los arcos de proa y esto es porque las observaciones de Bally tienen mejor resolución como se dijo arriba.

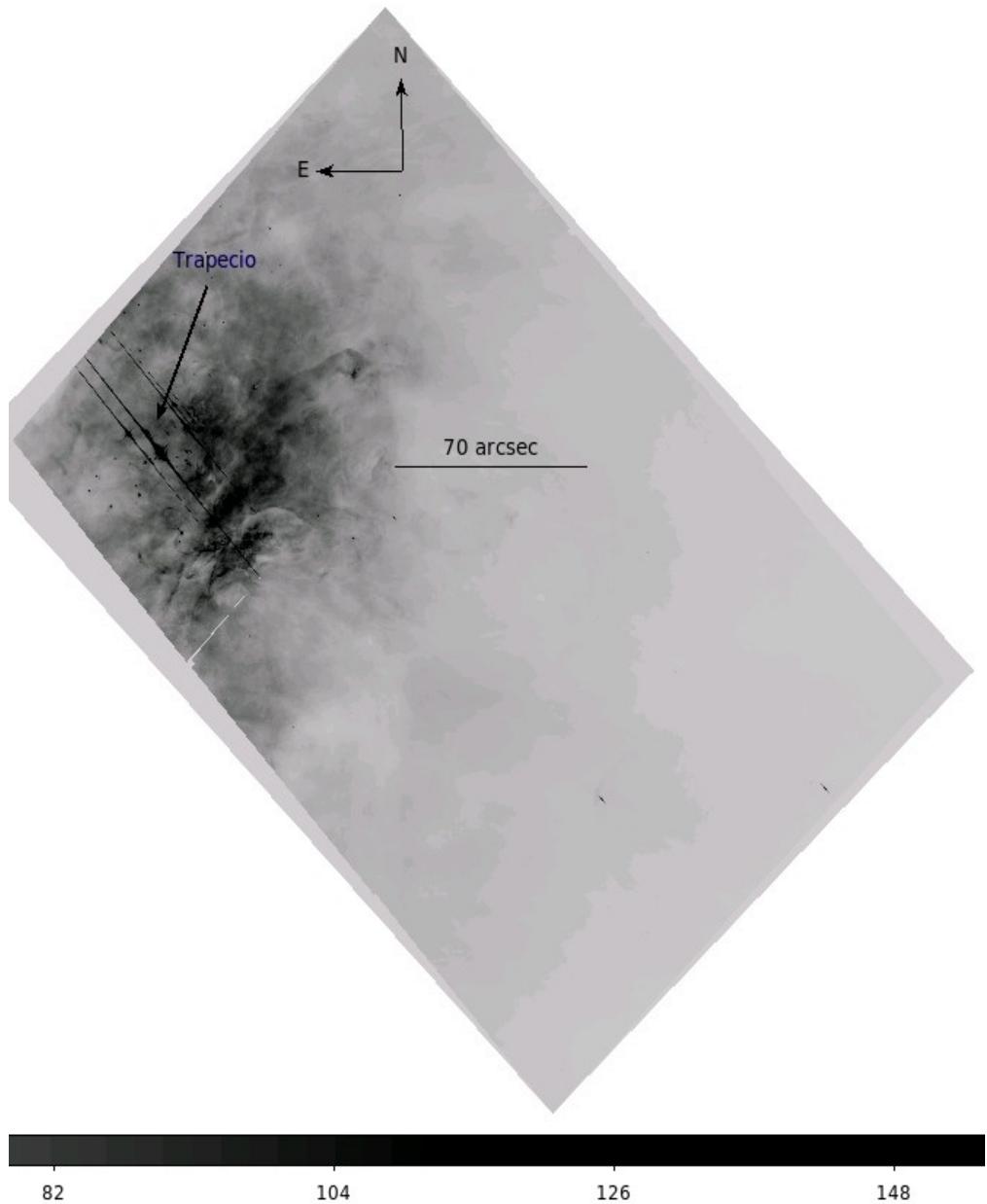


Figura 2.3: Campo 01 del WFC-ACS; que corresponde a una imagen de $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ observadas con el *HST* durante el ciclo 12 del programa GO-9825, usando el filtro de banda ancha F658N, en ella se puede apreciar el Trapecio y algunos choques de proa en sus cercanías.

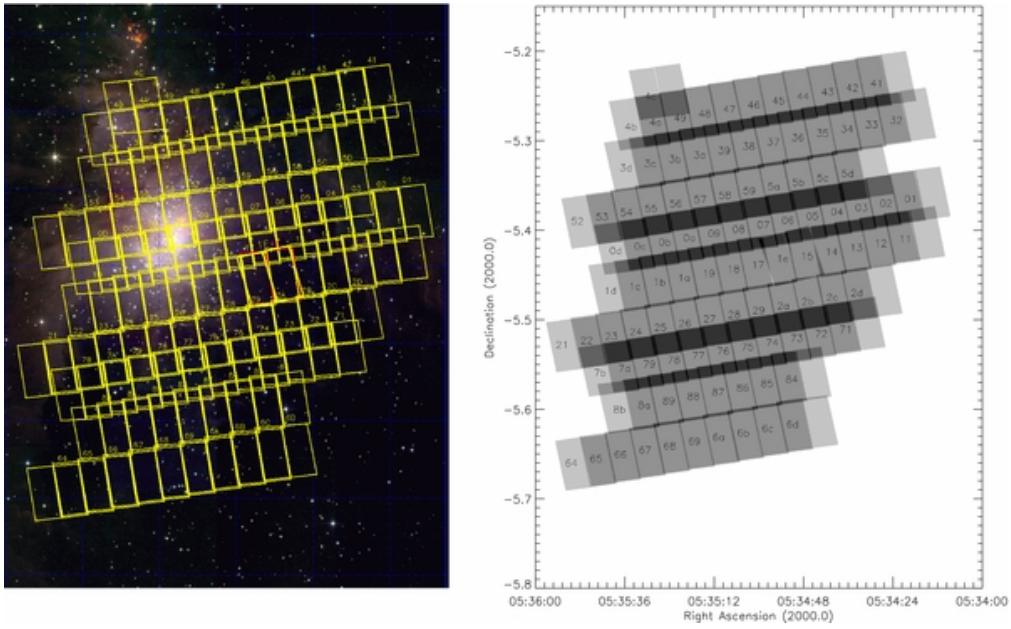


Figura 2.4: *Izquierda.* Campos de la cámara ACS superpuertos en una imagen de JHK de la Nebulosa de Orión de 2MASS. *Derecha.* Representación de los campos del ACS obtenidas a partir de 104 vistitas del *HST*, como parte del *Programa Treasury*. Mapean una área considerable de la Nebulosa de Orión. Las partes más oscuras son las regiones de solapamiento entre las distintas visitas. También se puede ver el número de identificación de cada campo, para ser referenciado. Imagen tomada de Robberto et al. (2013).

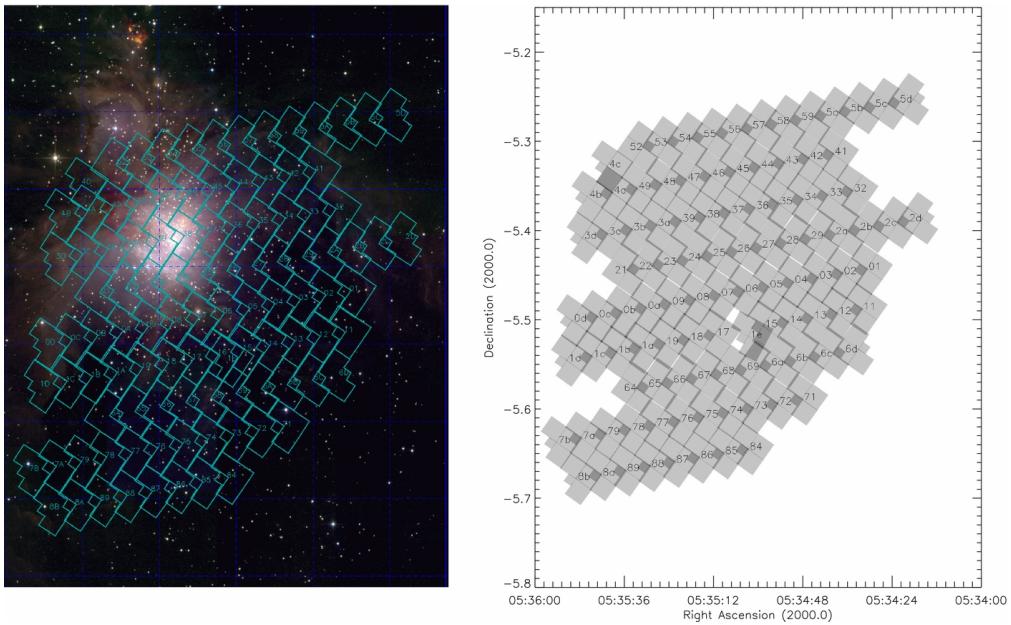


Figura 2.5: Igual que la figura 2.4 para los campos de WFPC2.

2.3 Otras observaciones de la cámara WFPC2: viejos mosaicos

Para este estudio también se cuenta con unas observaciones, un poco más viejas que mapean una región particular de la Nebulosa de Orión (el centro de la nebulosa). Estas observaciones son el resultado de dos programas del *HST*, el primero de estos es el programa GTO-5085 (Guaranteed Time Observer por su nombre en inglés) cuyo principales investigadores fueron O'dell & Wong (1996) y el segundo corresponde al programa GO-5469 (General Observer por su nombre en inglés) con Jhon Bally como principal investigador. Las imágenes proporcionadas por el programa de Bally fueron usadas principalmente para el estudio de proplyds con una alta resolución espacial, usando la cámara WFPC2 abordo del *HST*. En estas imágenes el tamaño de los pixeles es de $0.0996''$ algo muy característico de las cámaras WF (Holtzman et al., 1995). Los campos seleccionados para la formación de las imágenes se determinaron de tal manera que tengan una cobertura continua de un área en la parte central de la Nebulosa de Orión, en este sentido se tiene una superposición de los campos, representados a través de unos mosaicos de la cámara WFPC2. Se hablan de varios mosaicos puesto que se utilizaron múltiples filtros del programa GTO-5085 para registrar diferentes líneas de emisión. Los extremos de la región mapeada fueron elegidos con el propósito de incluir objetos de particular interés, tales como objetos Herbig-Haro en el norte y los choques de proa en el suroeste (O'dell & Wong, 1996).

Los filtro usados fueron seleccionados de tal manera que se capturaran las líneas de emisión más fuertes, es decir aquellas que representaran un rango razonable de condiciones de ionización. Por tanto se cuenta con un mosaico en el que se usó el filtro f658n, es decir en este mosaico domina sólo la presencia de la línea de emisión [N II] (6584 Å). También se cuenta con un mosaico, en el que sólo dominan las líneas de emisión de H α (6563 Å), puesto que para capturar las imágenes se usó el filtro f656n. En esta lista se incluye un mosaico cuyas imágenes son el resultado del uso del filtro f502n, donde se han registrado las líneas de emisión de [O III] (5007 Å), que provienen de regiones con la más alta ionización en la nebulosa. Por último existe un mosaico formado por los campos obtenidos a partir del filtro f547m (Burrows, 1995), este es un filtro suficientemente ancho (en comparación a los demás filtros), ubicado en una región del espectro electromagnético, donde no hay líneas fuertes de emisión, por tanto este mosaico son unas imágenes del continuo. Los tiempos de exposición para cada filtro son: f656n; 200 s, f658n; 500 s, f502n; 200 s, f547m; 50 s para el programa GO-5085.

Capítulo 3

Metodología observacional

Como uno de los objetivos de esta tesis es realizar un catálogo completo de los choques de proa en la Nebulosa de Orión, el primer paso llevado cabo en esta tarea fue la identificación y la búsqueda en las imágenes del *HST* descritas en el capítulo anterior, de los arcos de emisión ya conocidos. Entonces un grupo de 6 proplyds llamados; 168-326 (LV1), 167-317 (LV2), 166-316 (LV2b), 163-317 (LV3), 161-324 (LV4) y 158-323 (LV5) detectados y mostrados por Laques & Vidal (1979) fueron buscados e identificados como parte de este trabajo en las observaciones ya mencionadas, aunque es importante subrayar que Laques & Vidal no observaron los arcos, estos fueron descubiertos hasta la década de los 90. Muchos de estos arcos de emisión fueron reportados en varios artículos de Bally. Algunos aparecen en el artículo de Bally et al. (2000) y son los siguientes: w000-400, w005-514, w012-407, w014-414, w030-524, w044-527, w056-519, w069-601, w073-227 y w266-558. Los objetos designados con los nombres desde LL1 a LL7 fueron catalogados por primera vez por Bally & Reipurth (2001). Algunos otros objetos aparecen en una lista presentada por Bally et al. (2006). Estos son los que se llaman LL4, LL5, etc que son los mismos mostrados por Bally & Reipurth, pero otros objetos también son presentados en este artículo tales como; 4468-605, 116-3101, 203-3039, 261-3018, 305-811, 308-3036 y 344-3020. Dos choques de proa producidos por la interacción de los flujos de dos proplyds son mostrados en Reipurth et al. (2007), estos objetos de interacción interproplyd son; 066-652, su choque se genera por la colisión con el viento del proplyd 066-652N y 162-456, el cual interacciona con el proplyd 162-456NE. En un catálogo de Ricci et al. (2008) muchos proplyds y supuestos proplyds son mostrados. Por mencionar algunos, en esta lista aparecen: 066-3251, 121-434, 124-131 y 178-258. En nuestra búsqueda encontramos cerca de 20 objetos nuevos (no reportados antes en la literatura), se podrán ver más adelante donde presentamos el catálogo completo.

Después de haber detectado todos los choques de proa en las ya mencionadas observaciones, se hizo la caracterización de estos objetos es decir, se trazaron la forma de los arcos de los choques de proa estacionarios, usando las herramientas del programa ds9 SAO image, para medir los radios característicos (R_c y R_0). También se estimaron las distancias (D) de las fuentes a θ^1 Ori C, se determinaron las anchuras (h) de las cáscaras y se midieron los valores de la emisión en las imágenes de las cámaras ACS y WFPC2 y se hicieron las pertinentes calibraciones del flujo.

3.1 Formas de los arcos

Como primer paso para caracterizar los arcos de los objetos LL en las afueras de las nebulosas y de los proplyds interiores, se trazaron la forma de los mismos. Para ello establecimos las posiciones donde pensamos que se encuentran los arcos de proa con el propósito de delimitar la cáscara formada por los dos choques (internos y externos) como se puede ver en la figura 3.1, esto se hizo usando el contraste de brillo entre los choques de proa o las cáscaras y el

fondo, debido a que los choques son fuertemente radiativos generando que los arcos sean muy brillantes y esto es lo que vemos en las imágenes, entonces estos argumentos nos dan la pautas para distinguir la emisión en las dos regiones (en la cáscara chocada y en el fondo) y así poder trazar los arcos, este procedimiento es un tanto subjetivo porque es un estimador a simple vista de donde se encuentran los choques. No obstante para reducir los aspectos subjetivos, estas estructuras deben cumplir los siguientes criterios para poder ser catálogados como arcos. Primero, en el caso de los proplyds interiores los ejes de los choques deben coincidir con el eje del proplyd y estos deben estar orientados hacia θ^1 Ori C, a excepción de los arcos formados por la interacción de dos proplyds donde se toma como eje de referencia uno de los proplyds, entonces el choque va a estar orientado hacia el otro proplyd, además estos tienden a tener formas semi-circulares ubicados entorno a los proplyds. Segundo, en el caso de los objetos LL situados en las regiones mas alejadas de la nebulosa sus arcos tienen forma más hiperbólica y están justo en frente de la estrella presecuencia principal orientados hacia el núcleo de la nebulosa.

Por otro lado, valiéndonos de las herramientas del ds9 SAO image usamos los contornos para trazar los bordes de la cáscara chocada. Además se usaron las imágenes de los diferentes filtros para trazar los arcos. Por ejemplo en las regiones internas de la nebulosa se usaron imágenes de [O III] $\lambda 5007$ para trazar algunos arcos debido a la alta ionización de los choques en esta zona. Para las regiones externas de la nebulosa donde las líneas de baja ionización de [N II] $\lambda 6584$ son importantes se utilizaron imágenes del filtro F658N para trazar la forma de algunos arcos LL. También nos dimos cuenta que algunos arcos se ven muy bien en el continuo así que se usaron imágenes del filtro f647m para este fin, aunque para la mayoría de los casos se usaron imágenes de $H\alpha + [N II]$. Ahora para separar los arcos de los objetos HH se usaron imágenes de diferentes filtros, puesto que como se puede ver en la figura 1.7 del capítulo 1 el objeto HH asociado a la estrella T-Tauri de LL1 muestra unos nudos muy brillantes en los diferentes filtros que parecen no seguir la forma del arco de proa.

3.2 Estimación de los parámetros. D , R_0 , R_c y h_0

El propósito de trazar los arcos hiperbólicos radica en que con esta información (coordenadas) fue posible estimar varios parámetros observacionales, que nos permitieran extraer información acerca de los choques. En este orden de ideas, una vez que ya teníamos las posiciones tanto de las componentes de los choques como de la estrella misma se pudo establecer la distancia proyectada D , desde la fuente a θ^1 Ori C esta medida nos resultará muy útil como vermos más adelante. De la misma manera se midió R_0 , este radio lo vamos a definir como la distancia a lo largo del eje de simetría, de la fuente¹ (Robberto et al., 2005) al borde externo o interno de la cáscara chocada, dependiendo de cual sea el caso. El eje de simetría es la línea proyectada en la dirección en que están orientados los arcos, en la figura 3.2 y 3.3 está representada por la línea amarilla. No obstante, hay que aclarar que tenemos dos radios debido a la presencia de un borde externo e interno como ya se ha visto.

Por otro la lado, se han determinado los radios de curvaturas R_c , que en este sentido son los radios de los círculos que se han ajustado, utilizando los puntos con los cuales hemos trazado la forma de los choques (ver figura 3.2), en este sentido se han medido los radios de curvatura para el borde interno y el borde externo de la cáscara chocada y los hemos llamado; $R_c(\text{out})$ y $R_c(\text{in})$ respectivamente. Es de notar que la posición de la estrella no corresponde con el centro de los dos círculos que hemos fijado, en otras palabras las posiciones de los centros de los círculos dependen de la forma de los arcos que hemos trazado, es así que estos radios (obtenidos a partir de los círculos ajustados) van a ser un indicador de que tan simétricos son los choques, puesto que como podemos ver en la figura 3.3, el centro de los círculos no coincide con el eje, entonces estaríamos frente a un caso de un choque que

¹La fuente podría ser una estrella T-Taury o un proplyd. Objetos de los cuales se origina el viento interno.

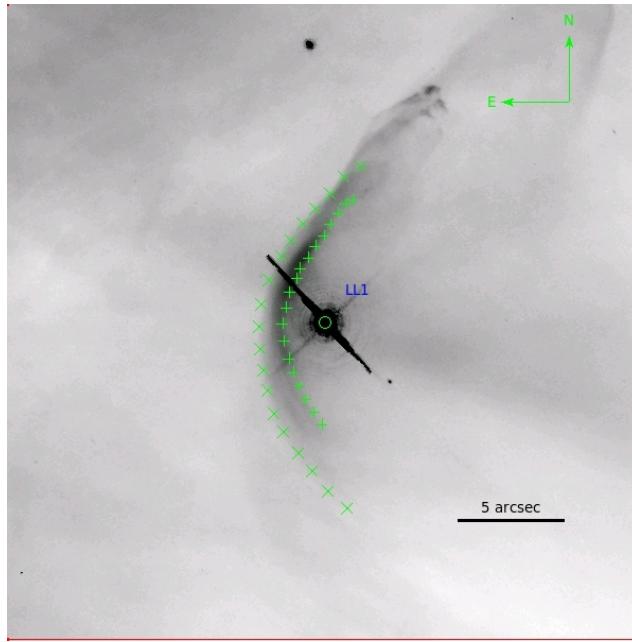


Figura 3.1: Formas de los arcos para LL1. Donde los bordes de los choques están delimitados por los puntos; “x”, para trazar el borde externo y “+”, para trazar el borde interno para determinar, la posición de la estrella se usaron pequeños círculos o puntos esto se hizo usando las herramientas del ds9 sao image. Esta imagen es tomada del campo 01 de Bally et al. (2006) (ACS-F658N) en el sur-oeste de la Nebulosa de Orión, por tanto es una imagen de H α +[N II].

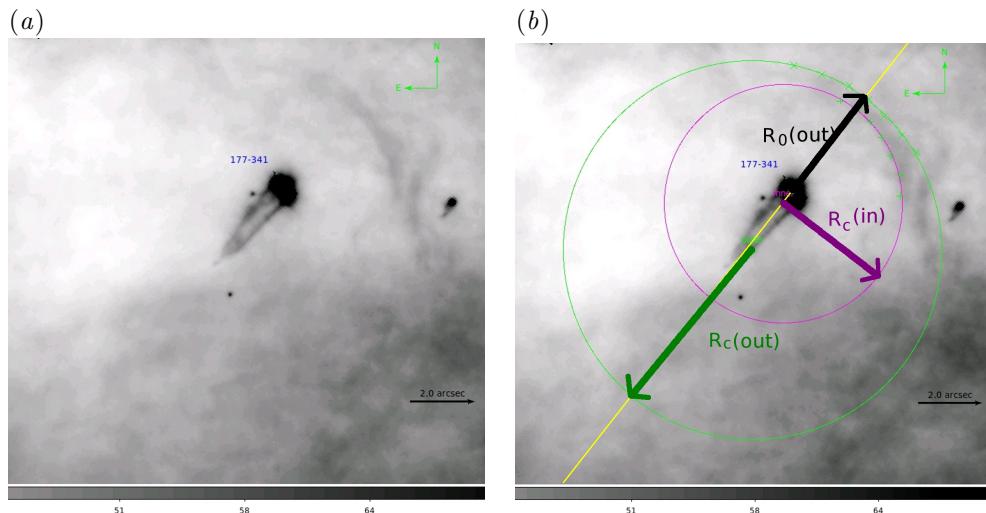


Figura 3.2: (a) Proplyd 177-341 ubicado en el sureste de la Nebulosa de Orión. (b) Mismo proplyd con una representación de los radios característicos: $R_0(\text{out})$; que es el radio del choque externo, medido a lo largo del eje que va desde el proplyd a θ^1 Ori C, este eje está representado por la línea amarilla. $R_c(\text{out})$ y $R_c(\text{in})$; llamados radios de curvaturas, son los radios de los círculos ajustados a partir de los puntos (coordenadas) utilizadas para delimitar los bordes externo e interno de la cáscara chocada.

no es rigurosamente simétrico.

Siguiendo con la metodología llevada a cabo, otro parámetro que hemos podido estimar ha sido la anchura h_0 , que como veremos va a ser muy importante para determinar características físicas de los choques. No obstante, h_0 la definiremos como el ancho de la cáscara chocada a lo largo del eje de simetría. Por tanto para determinar éste parámetro hemos hecho lo siguiente: a la distancia que se ha estimado desde el borde externo a la estrella o Proplyd ($R_0(\text{out})$) le hemos restado el radio del choque interno ($R_0(\text{in})$) (ver figura 3.3), en esta medida tendremos que la anchura está dada por $h_0 = R_0(\text{out}) - R_0(\text{in})$, que es desde luego también es estimado a lo largo del eje del objeto.

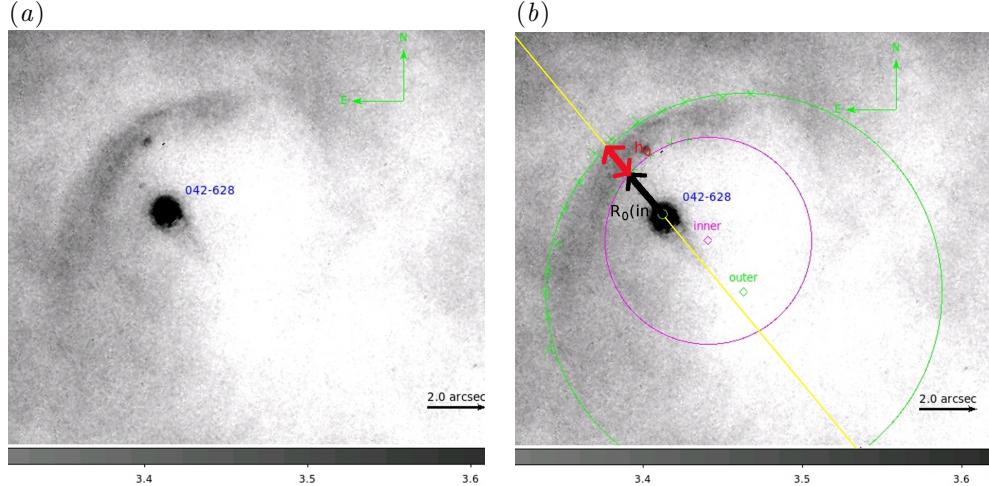


Figura 3.3: (a) Proplyd 042-628 y su respectivo choque de proa. (b) En esta imagen se puede apreciar el mismo proplyd 042-628 con una representación de la anchura h_0 y del radio del choque interno R_0 a lo largo del eje proplyd-estrella ionizadora. El eje está representado por la línea amarilla.

3.3 Estimación y calibración final del flujo-líneas de emisión en las imágenes del ACS y WFPC2

3.3.1 Determinación de los valores de la emisión en las imágenes del ACS y WFPC2

Otras de las cosas que hemos realizado con nuestros objetos de estudios, ha sido determinar el brillo superficial de cada uno de ellos. Una vez que hemos trazado la forma de los arcos hiperbólicos, se han extraído de los campos de Bally (que cubren en su mayoría a la Nebulosa de Orión), pequeñas imágenes FITS que sólo abarcan las regiones donde se encuentran los objetos LL y los proplyds, con el propósito de facilitar las mediciones de los valores de las imágenes. Esto mismo se hizo con los campos de Robberto. Así que usando estas pequeñas imágenes hemos medido los valores de las imágenes² en un determinado número de puntos o pixeles a lo largo de diferentes ángulos θ en la región chocada y en el fondo, donde se ha supuesto que $\theta = 0$ corresponde al eje proyectado en el plano del cielo que sigue la dirección en que llegan los fotones ionizantes provenientes de la estrella masiva y todos los demás ángulos θ se forman a partir de dicho eje, en sentido contrario a las manecillas del reloj. Para ser más didácticos miremos un caso particular de los resultados de tales mediciones,

²En el caso de los campos de Bally los valores de las imágenes tienen unidades de electrones s^{-1} y en caso de las imágenes de Robberto tienen unidades de counts s^{-1} .

es así que la figura 3.4 nos muestra los valores en función de θ para w005-514, no obstante es de notar que esta gráfica permite ver los valores en el fondo, en la zona chocada y más rigurosamente en el centro de la cáscara. Estas mediciones se hicieron tomando la imágenes de la cámara ACS-F658N y de la misma manera se procedió con las imágenes del WFPC2-F656N (Roberto et al., 2013).

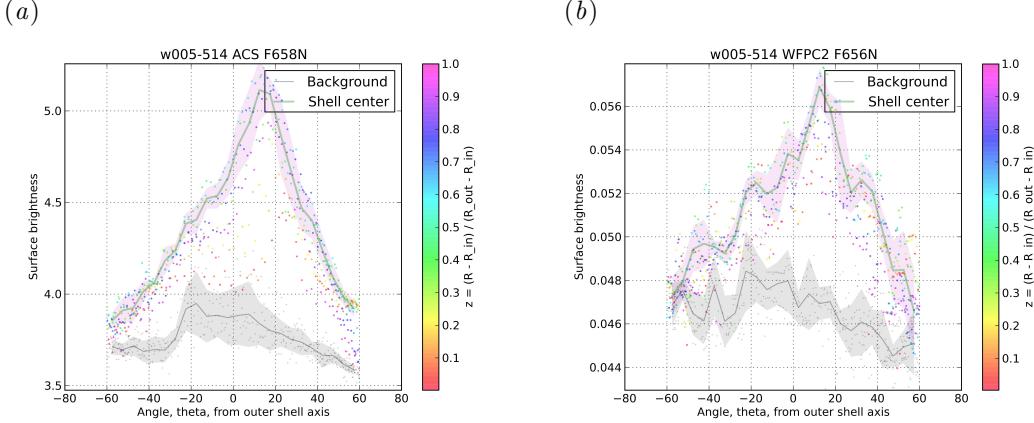


Figura 3.4: Valores de la emisión o brillo superficial para el proplyd w005-514 en unidades de [electrones s^{-1}], en función de los ángulos θ . Los puntos representan los pixeles individuales y los colores representan la distancia con respecto a los arcos ($z = (R - R_{\text{in}})/(R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$). Las líneas indican las medianas de los valores en el centro de la cáscara y en el fondo y la banda de colores representan el rango entre los cuartiles. Para separar los pixeles de la cáscara del fondo se usaron las coordenadas de los bordes internos y externos medidos a partir de la diferencia de contraste en la emisión en las imágenes del *HST*. Ahora con los parámetros circulares; θ y radios de los bordes obtenidos de los arcos internos y externos usando dichas coordenadas, se midieron los valores de la emisión para los distintos pixeles en función de tales ángulos. Para (a) WCS F658N (b) WFPC2 F656N.

Por otro lado también se determinó los valores del brillo superficial en función de la posición con respecto a los arcos, dicha posición se ha escrito de la siguiente forma; $z = (R - R_{\text{in}})/(R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$, que serían los radios relativos a la cáscara, donde R es la separación radial, R_{in} es el radio desde la estrella al borde externo y R_{in} es el radio desde la estrella al borde interno, es así que la figura 3.5 ilustra cuales son los valores para las diferentes radios relativos z . Hay que resaltar que este tipo de gráficas las obtuvimos para cada uno de los choques estacionarios.

Dado que se tenían los valores de la emisión de los pixeles para las diferentes zonas de los choques hiperbólicos como se mencionó arriba, entonces como siguiente paso se determinaron los valores promedios en la cáscara chocada, en el fondo y en el centro de la cáscara. Para ello se implementaron los conceptos de estadística robusta, que consistió en determinar el “trimean” en las diferentes zonas de nuestros objetos (en la cáscara chocada, en el fondo y en el centro de la cáscara). El trimean es definido como el promedio ponderado de la mediana y los dos cuartiles³. Entonces de acuerdo a esta definición primero fue necesario encontrar los tres cuartiles de los datos; q_1 , q_2 y q_3 . Luego con la ecuación $\text{TM} = 0.25(q_1 + 2q_2 + q_3)$ se calcularon los trimean o los valores promedios del brillo, para el conjunto de pixeles situados en el intervalo angular $\theta < 45$ en las regiones ya mencionadas de los objetos LL. Por otro lado se estimó el rango intercuartil el cual es la diferencia entre el tercero y primer cuartil

³En estadística descriptiva los cuartiles son los tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentuales iguales.

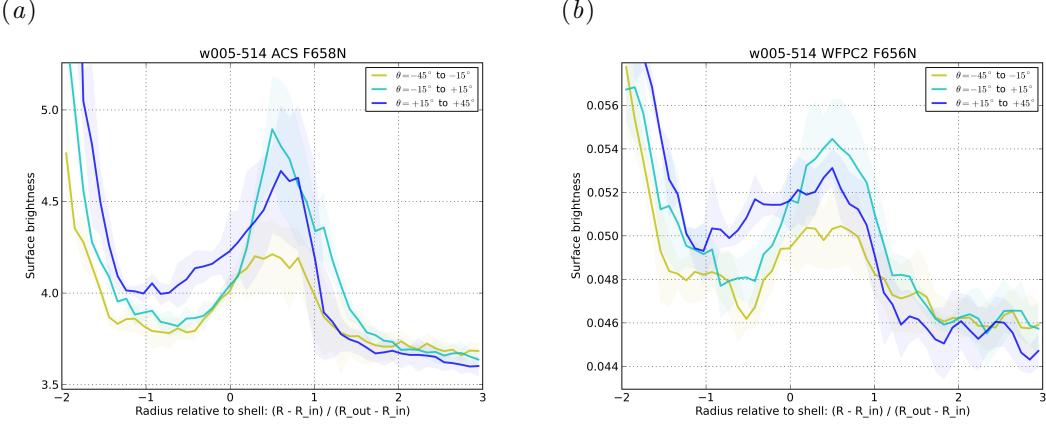


Figura 3.5: Valores del brillo superficial para el prolyd w005-514 en función de la posición $z = (R - R_{\text{in}})/(R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$. La líneas indican los valores del brillo para diferentes intervalos de angulos θ . Para (a) WCS F658N (b) WFPC2 F656N.

$(q_3 - q_1)$, con esto obtuvimos una medida de la dispersión de nuestros datos. De la misma manera, es decir usando estadística robusta se determinaron el promedio de los valores del brillo para distintos ángulos θ (ver figura 3.4) y usando el rango intercuartil estimado para cada ángulo θ se determinó la anchura de la distribución, que rescalada nos permitió estimar la desviación estandar y las incertidumbres para una distribución Gaussiana de nuestro juego de datos.

Hay que tener en cuenta que los valores determinados para las cáscara incluyen los del fondo, entonces para tener unos valores coherentes del mismo, es decir sólo de la cáscara, le hemos restado los valores del fondo. Es importante mencionar que de la misma manera hemos medido los valores de la emisión de las imágenes de los viejos mosaicos de WFPC2, es decir aquellas observaciones obtenidas con el uso de los filtros F656N ($\text{H}\alpha$ 6563 Å), F658N ([N II] 6583 Å), f502n ([O III] 5007 Å) y del filtro para el continuo f547m.

3.3.2 Estimación de las constantes de calibración

En esta parte del trabajo hemos escrito los valores de las emisiones medidos en las observaciones de las respectivas cámaras, en unidades físicas esto es en [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]. Como ya se dijo los valores medidos en las imágenes tomadas por la cámara ACS con el filtro F658N tienen unidades de [electrones s^{-1}] y las unidades de los valores en las imágenes de WFPC2 con el filtro F656N tienen unidades de [counts s^{-1}], entonces se relizó la respectiva conversión de unidades con el propósito de tener el brillo superficial obtenidos apartir de las imágenes de las cámaras ACS y WFPC2 en las mismas unidades físicas.

Estimación de las constantes de calibración de las imágenes de Bally (ACS-F658N) y Roberto (WFPC-F656N)

Las estimaciones de las constantes de calibración del flujo en las imágenes del *HST*, se pueden hacer de dos maneras. La primera forma de hacerlo consiste en usar las características de los detectores y los filtros medidos en el laboratorio antes del lanzamiento. Dicho de otra forma, este método se basa en utilizar la información clave que aparecen en los encabezados de las imágenes del *HST*. Esta información es mantenida en los archivos de imágenes después del lanzamiento y puede ser recuperado posteriormente por usuarios externos a través

de un visor de imágenes tal como ds9. La segunda manera de hacerlo consiste en intentar hacer una calibración empírica cuando el instrumento ya está en órbita, mediante la comparación con espectros fotométricos terrestres. El problema de este método es que se requieren demasiados recursos del *HST*, esto quiere decir que toma demasiado tiempo que podrían utilizarse en las observaciones directas. Por otro lado no es muy satisfactorio hacerlo de esta manera debido a las limitaciones de las fuentes de referencia astronómicas disponibles (McMaster & et al., 2008). Así que en este trabajo se ha implementado el primer método descrito arriba para hacer las calibraciones de las imágenes de Bally (cámara ACS-F658N) y de Robberto (cámara WFPC2-F656N).

En este orden de ideas, para la estimación de los coeficientes de calibración obtuvimos la información clave para la fotometría, del encabezado de las imágenes FITS a través de ds9. Una de estas informaciones es el PHOTFLAM el cual está definido como la densidad de flujo promedio F_λ en unidades de [$\text{erg cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$ electrones $^{-1}$] que producen 1 cuenta⁴ por segundo en las observaciones del *HST*. Primero determinamos la constante de calibración para las imágenes de la cámara ACS y el filtro F658N. Entonces la metodología empleada sigue el siguiente orden; como se mencionó en la sección 3.3.1 las imágenes están en unidades de [electrones s^{-1}], es así que si se multiplican por el PHOTFLAM (inverse sensitivity), se obtienen unidades de [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1} \text{pixel}^{-1}$]. No obstante al multiplicar por la anchura rectangular del filtro nos libraremos del término \AA y al dividir por el área del pixel, información que también se obtuvo del encabezado, vemos que se pueden escribir los valores de las imágenes en unidades de brillo superficial [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]. De acuerdo a este análisis se estimó el valor de la constante de calibración del flujo en las unidades adecuadas, que es presentada en la tabla 3.1. Para determinar la anchura del filtro se usó una paquetería de python llamada “pysynphot”, que al implementarse mostró que la anchura rectangular es 74.9405 \AA , esto se hizo separadamente porque esta información no está incluida en el encabezado de las imágenes FITS.

En segundo lugar se determinó el coeficiente de calibración para las imágenes de Robberto et al. (2013) (WFPC2-F656N). Esto se hizo usando el mismo procedimiento descrito arriba (calibración del brillo en las imágenes de Bally), para escribir en unidades de brillo superficial los valores de la emisión $\text{H}\alpha$ 6563 \AA de estas imágenes. Aunque es de notar que para este caso se obtuvo para la anchura del filtro un valor de 28.34207 \AA . El coeficiente de calibración resultante se puede ver en la tabla 3.1.

Estimación de las constantes de calibración de las imágenes de los mosaicos de WFPC2

Las imágenes de los viejos mosaicos del WFPC2 para el filtro f656n ($\text{H}\alpha$ 6563 \AA) y el filtro f658n ([N II] 6583 \AA) están en unidades de [counts], así que para obtener unidades de brillo superficial, también se estimó un coeficiente de calibración para estas observaciones. Para determinar dichas constantes de calibración se hizo el siguiente análisis; para obtener unidades de count s^{-1} hay que dividir entre el tiempo de exposición, teniendo en cuenta que las observaciones tomadas con el filtro F656N tiene un tiempo de exposición de 200 s y las del filtro F658N tiene un tiempo de exposición de 500 s. Ahora, si estos valores en unidades de [count s^{-1}], se dividen entre los coeficientes de calibración de O’Dell (2009), los cuales a llamado $K1_{\text{filter}}$ y respectivamente son: $K1_{\text{F656N}} = 1.62$ y $K1_{\text{F658N}} = 160$ con unidades de [$10^{-10} \text{ counts cm}^2 \text{ sr photons}^{-1}$], se obtienen unidades de [$\text{photons s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]. Por último, al multiplicar por la energía del fotón ($E = 3.027 \times 10^{-12} \text{ erg para H}\alpha$ 6563 \AA y $E = 3.018 \times 10^{-12} \text{ erg para [N II]} 6583 \text{ \AA}$) se obtienen cantidades con unidades de [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$] que al final de cuentas es lo que se quiere. Con este análisis concluimos que al realizar la operación $E/(TK1_{\text{filter}})$ podemos obtener las constantes de calibración deseadas,

⁴Cuentas puede referirse a DN o electrones dependiendo del instrumento.

donde T es el tiempo de exposición y E la energía del fotón. En la tabla 3.1 se pueden apreciar los valores de los coeficientes para F656N y F658N.

Cuadro 3.1: Valores de los coeficientes de calibración.

Cámara-filtro	Coeficiente de calibración	Unidades
ACS-F658N (Imágenes de Bally)	0.00250	erg electrones ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F656N (Imágenes de Robberto)	0.16896	erg counts ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F656N (Mosaico)	0.00009	erg counts ⁻¹ s ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F658N (Mosaico)	0.00004	erg counts ⁻¹ s ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹

3.3.3 Corrección por extinción

Una vez que se tenían los valores fotométricos y calibrados en flujo, como siguiente paso se realizó la corrección por extinción. Para ello se ha usado un mapa de extinción de H_{β} junto al siguiente análisis para calcular el flujo corregido por extinción. Entonces para encontrar una expresión del flujo intrínseco en términos de la corrección $C_{H_{\beta}}$ y el flujo observado, se ha usado la extinción logarítmica $C_{H_{\beta}} = -\log(F'/F) = -\log(\exp(-\tau)) = 0.4343\tau$ (con $F'/F = \exp(-\tau)$), la extinción en magnitud $A_{H_{\beta}} = -2.5 \log(F'_{H_{\beta}}/F_{H_{\beta}})$ para H_{β} , donde F es el flujo intrínseco y F' es el flujo observado. Y la extinción absoluta

$$A_{\lambda} = -2.5 \log(F'_{\lambda}/F_{\lambda}) = 2.5C_{\lambda} = 1.086\tau \quad (3.1)$$

Ahora bien, de acuerdo a las anteriores expresiones, la extinción nebulosa se puede escribir como la extinción logarítmica $C_{\lambda} = C_{H_{\beta}}(A_{\lambda}/A_{H_{\beta}})$, sustituyendo esta última expresión en la Ec. 3.1 se obtiene que $F_{\lambda} = F'_{\lambda} \times 10^{C_{H_{\beta}}(A_{\lambda}/A_{H_{\beta}})}$. No obstante si $f_{\lambda} = E_{\lambda-H_{\beta}}/A_{H_{\beta}}$ como han mencionado Costero & Peimbert (1970) y dado que $E_{\lambda-H_{\beta}} = A_{\lambda} - A_{H_{\beta}}$, entonces se tendrá que $f_{\lambda} = (A_{\lambda}/A_{H_{\beta}}) - 1$ y esto lleva a concluir que $C_{\lambda} = C_{H_{\beta}}(1 + f_{\lambda})$. De este modo el flujo corregido por extinción se puede escribir de la siguiente forma

$$F_{\lambda} = F'_{\lambda} \times 10^{C_{H_{\beta}}(1+f_{\lambda})} \quad (3.2)$$

Donde se tiene que $C_{H_{\beta}}$ es la corrección de enrojecimiento en $H\beta$ y f_{λ} es la función de enrojecimiento normalizada en $H\beta$ con $f_{\beta} = 0.0$ (Peimbert & Torres-Peimbert, 1977). Para $H\alpha$ (6563 Å) la función de enrojecimiento es $f_{\lambda} = -0.220$ (Blagrave et al., 2007). Por otro lado $C_{H_{\beta}}$ es determinado mediante la comparación del valor teórico esperado para una temperatura y una densidad electrónica con el valor observado de la nebulosa, utilizando el hecho de que el cociente entre dos líneas de recombinación de hidrógeno es casi constante (Peimbert & Torres-Peimbert). Así que con la Ec. 3.1 determinamos el flujo corregido por extinción.

3.3.4 Comparación entre los brillos superficiales de WFPC2-F656N ($H\alpha$) y de ACS-F658N ($H\alpha + [N II]$)

Ahora que habíamos hecho las calibraciones correspondientes del flujo, comparamos los resultados entre los brillos superficiales de las imágenes de ACS y WFPC2. La figura 3.6 nos muestra el tipo de relación que se da entre los valores de las dos imágenes de las respectivas cámaras, de donde podemos concluir que el brillo superficial de las observaciones de Bally para el fondo de cada uno de los objetos en las regiones externas de la nebulosa es un tanto mayor, si las comparamos con el brillo de las imágenes de WFPC2, esto sucede porque las imágenes de la cámara ACS-F658N están contaminadas con las líneas de $[N II]$. Podemos decir que aproximadamente el 20% del brillo superficial es la contribución de la emisión de

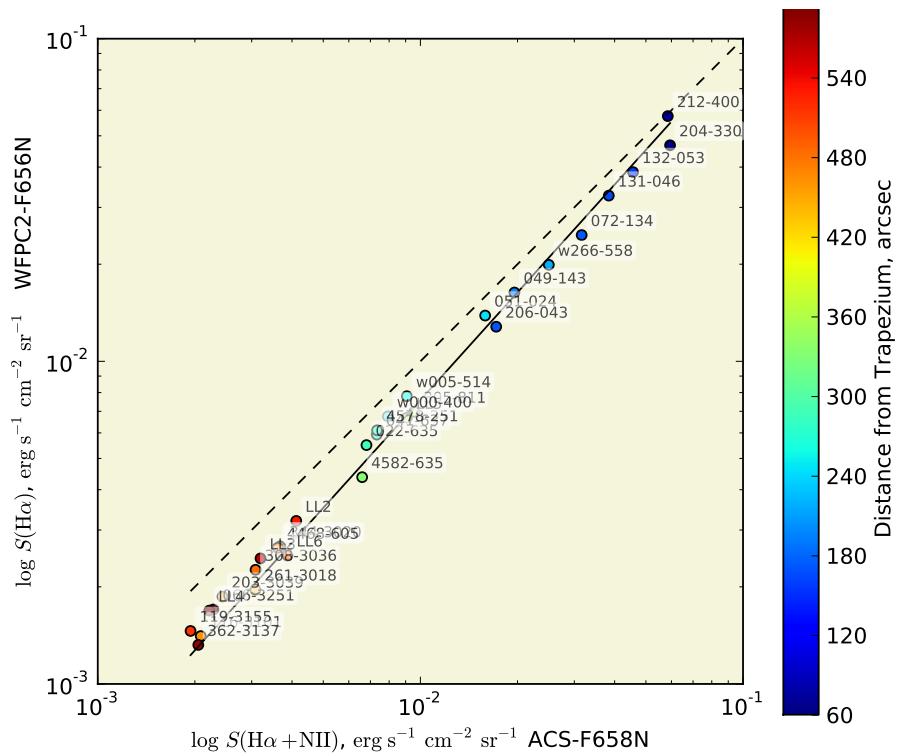


Figura 3.6: Brillo superficial de $\text{H}\alpha$ del fondo de nuestras muestras en las imágenes de Roberto (WFPC2-F656N) en función del brillo superficial de $\text{H}\alpha + \text{[N II]}$ las imágenes de Bally (ACS-F658N) en unidades $[\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}]$. La línea continua indica un ajuste lineal de los puntos graficados, mientras que la línea discontinua representa una relación 1:1. La escala de colores indica la separación del Trapecio.

[N II] en regiones mas alejadas del Trapecio en la Nebulosa de Orión. Mientras que la contribución de la emisión de [N II] en regiones cercanas del Trapecio es casi despreciable.

Para el caso de las cáscaras chocadas en equilibrio de fotoionización de los objetos LL y de los prolyds, la proporción de emisión de una línea en particular en comparación a otra línea son iguales que en el fondo, dado que la emisión del gas de la nebulosa depende de la abundancia de los elementos que la conforman, y como en ambos casos; en la cáscara y en el fondo, la abundancia de elementos es la misma (pero la emisión total en la cáscara y en el fondo son diferentes, porque la radiación dependen de la densidad y la temperatura). Entonces podemos pensar que en nuestros datos hay una presencia importante de las líneas de [N II] en regiones de baja ionización a grandes distancia y está se va disipando a medida que nos acercamos a θ^1 Ori C.

3.3.5 Verificaciones de las calibraciones del brillo superficial para WFPC2

Una forma utilizada para verificar que las calibraciones realizadas iban por buen camino, fue comparar nuestros resultados con resultados ya publicados. En este sentido Henney et al. (2013) determinó que el brillo superficial para el frente de LL1 es de $0.02 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ después de haber hecho la corrección para una extinción de $A(\text{H}\alpha) = 0.16 \pm 0.03 \text{ mag}$ de $\text{H}\alpha$ en unas imágenes del WFPC2. Usando la Ec. 3.1 determinamos que el brillo superficial observado es $0.01726 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ y dado que el valor de la emisión (count rate) para la imagen de LL1 de la cámara WFPC2 es de 0.10 count, entonces encontramos que el factor de calibración usada para el ajuste del flujo en dicho artículo fue de 0.1726. Esta constante de calibración es muy similar a la obtenida por nosotros usando el método de la sección §3.3.2 para la determinación del coeficiente de calibración de la emisión de las imágenes del WFPC2-F658N (ver en la tabla 3.1 el valor de la constante de calibración para las observaciones de Robberto).

Capítulo 4

Resultados empíricos

En este capítulo presentamos el catálogo final de imágenes de todos los arcos de proa que hemos detectado en la Nebulosa de Orión. En este catálogo se incluyen los objetos ya reportados previamente por Bally, Reipurth, Ricci, etc, y los objetos nunca antes reportados que hemos encontrado en nuestra búsqueda. Presentamos una breve descripción de las características morfológicas y de emisión de algunos arcos de proa basándonos en la apariencia óptica de las imágenes.

4.1 Catálogo: Imágenes de los arcos de proa estacionarios

En este trabajo hemos detectado 73 objetos, los cuales hemos clasificado como los arcos de proa estacionarios que conforman nuestro catálogo. Entonces la figura 4.1 es el conjunto de todas las imágenes de los objetos LL y de los prolyds con sus respectivos arcos de emisión en la Nebulosa de Orión. En esta imágenes se ilustra la diversidad morfológica de los choques LL. En este sentido mencionaremos a continuación las características morfológicas más perceptibles en algunos objetos de nuestro catálogo (estos objetos los consideramos interesantes, debido a sus particulares estructuras):

- LL1 es el prototipo de los objetos LL (también llamado LL Ori como se mencionó en el capítulo 1).
- Algunos de nuestros objetos presentan doble cáscaras, es el caso de los objetos: LL3, LL5, 4578-251, 072-134, w266-558 y 362-3137 en este último no estamos seguros de si trata de una doble zona chocada.
- Los objetos LL2, LL6, 203-3039 y probablemente LL4 presentan un jet perpendicular a la dirección hacia donde están orientados los choques.
- Algunos choques de proa tienen jets paralelos a su eje, es el caso de los objetos 4468-605 y w044-527.
- El choque w000-400 tiene las alas de su arco muy extendidas.
- Las cáscaras del choque w012-407 es débil, mientras que la de los choques; 189-329 y 1039-3057 resultan ser mucho más débiles.
- Los objetos w014-414 y 049-143 muestran cáscaras chocadas muy anchas.
- En el choque 101-233 se observa que su cáscara está compuesta por grumos.

- Al arco del objeto 109-2146, al parecer se le superpone un objeto HH.
- Se observa que la cáscara de 119-3155 está interrumpida, es decir la forma de los arcos no es continua.
- Los objetos 168-328, 166-316 y 158-323 están cerca de otros proplyds. Se altera la forma de los arcos debido a la interacción de los vientos de dos proplyds.
- El proplyd 180-331 muestra un choque de proa altamente asimétrico, al igual que el arco del objeto w0044-527 con la pequeña diferencia de que éste último no es tan asimétrico.
- El objeto 308-3036 tiene un choque interno con forma circular.
- Los arcos del proplyd w069-601 describen una parábola perfecta.
- Los arcos del objeto 116-3101 son muy cerrados, mientras que los arcos del objeto 102-157 son muy abiertos.

4.1.1 Más sobre las observaciones: Posiciones, distancias, formas y tamaños

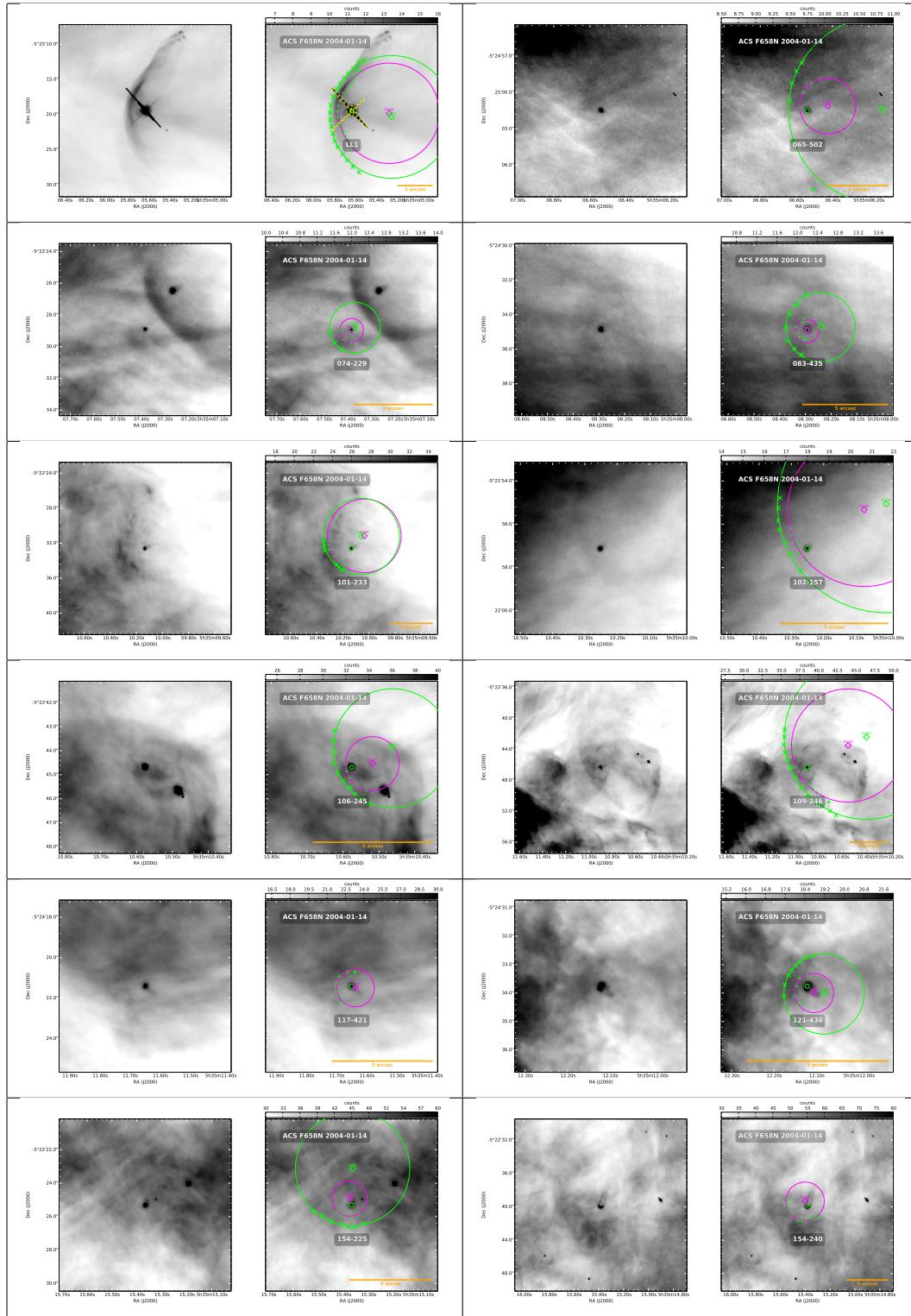
Como se ha dicho anteriormente usando éstas observaciones hemos medido parámetros observacionales con el propósito de caracterizar los objetos LL y los choques de proa de los proplyds. En este orden de ideas hemos medido la distancia D de la fuente a θ^1 Ori C, la anchura h de la cáscara y los radios característicos; R_0 y R_c tanto de los límites internos y externos de la cáscara chocada. La tabla 4.1 es el resultado final de tales mediciones.

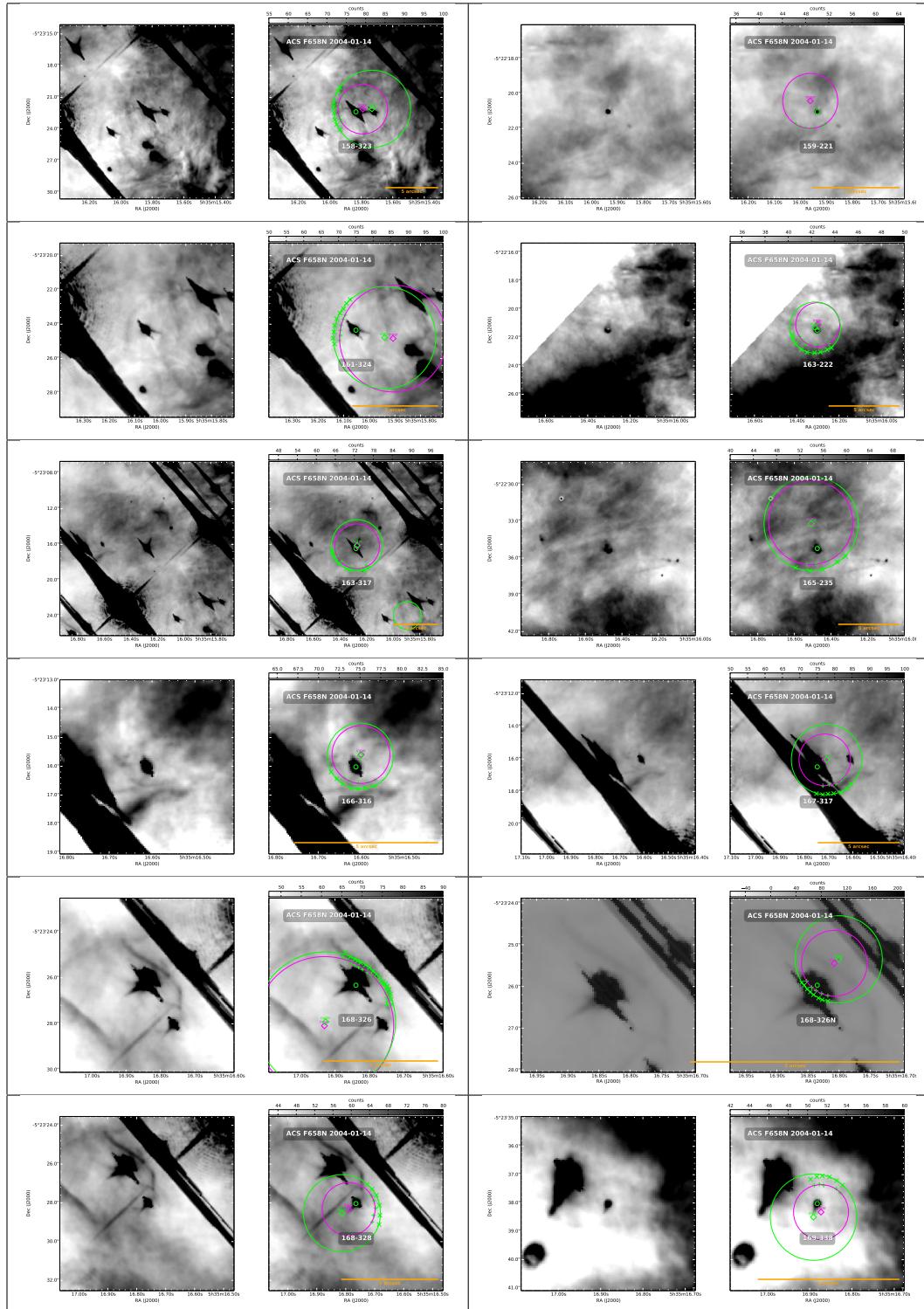
En la figura 4.2, se logra apreciar que los choques de proa situados a grandes distancias proyectadas desde θ^1 Ori C, tienden a tener pequeños tamaños, puesto que el cociente $q = R_0/D$ es menor para estas distancias¹, esto es en comparación a los objetos más distantes los cuales muestran que el radio relativo q es más grande, indicando por tanto que son de mayores tamaños. Por otro lado esta figura también nos muestra que los choques de proa más distantes tienden a tener cáscaras más gruesas, es decir que para los objetos de menor tamaño sus cáscaras chocadas son de mayor anchura, esto es debido por un lado a que muchos de estos objetos LL tienen doble cáscara (ver figura 4.1).

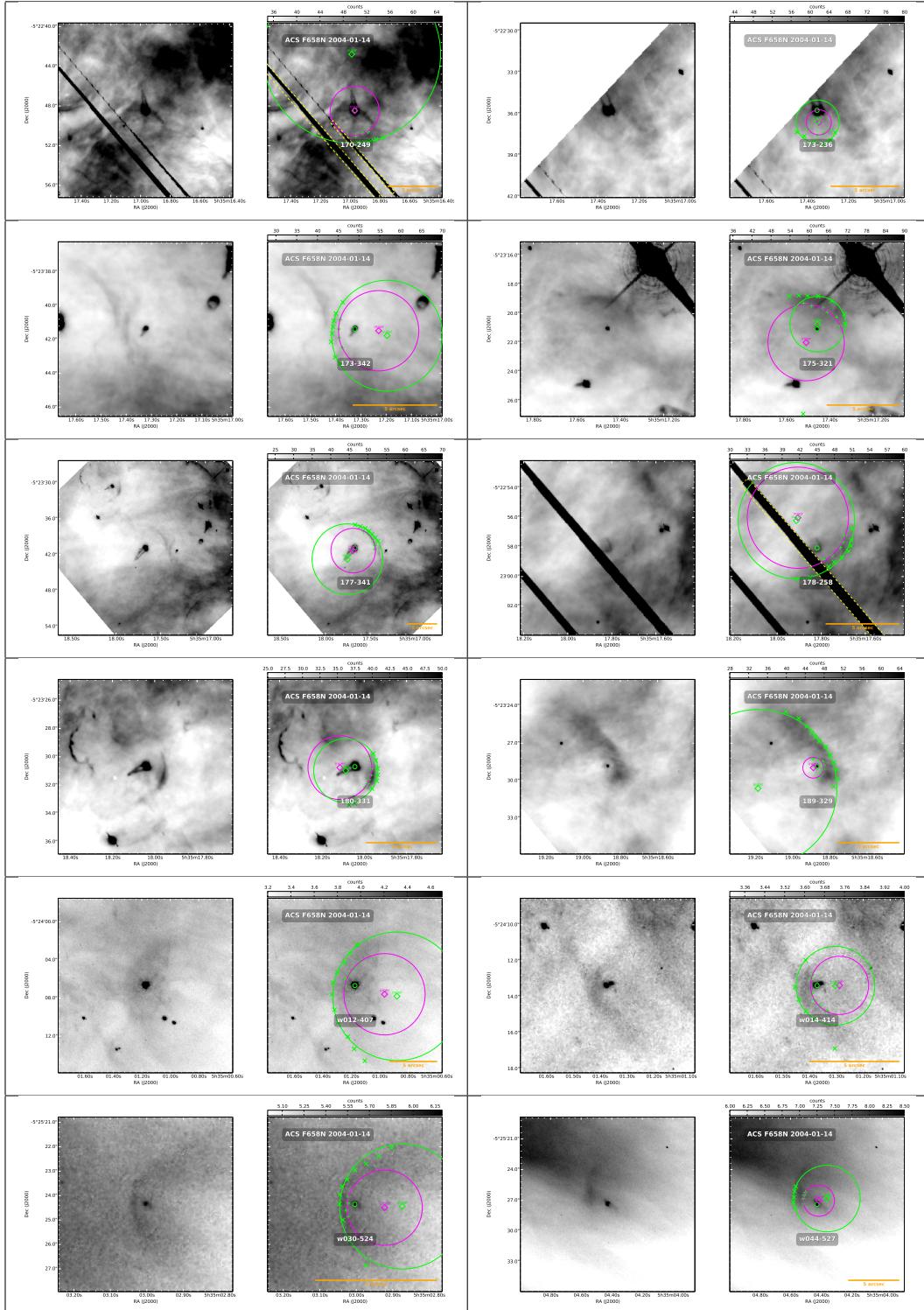
Es de notar que tenemos valores variados para los radios de curvaturas y puesto que con estos parámetros podemos hacernos una idea de la forma de las choques. Entonces tenemos que en la figura 4.3 es perceptible que los radios de curvaturas² normalizados con los radios axiales R_0 , esto es la fracción $A = R_c/R_0$, aumentan con la distancia a la estrella ionizante y dado que el radio característico R_0 disminuye conforme D crece como se dijo anteriormente, entonces es coherente argumentar que los choques ubicados en la regiones externas de la nebulosa tienden a mostrar arcos muy abiertos en sus formas, es el caso de los objetos; LL1, LL2, LL3, LL4, LL5, LL6, LL7, w266-558 y w000-400 por citar algunos. Los choques de proa situados en las cercanías de θ^1 Ori C, es decir a cortas distancias, vemos que tienen valores de A más pequeños en comparación a los valores de esta fracción para los objetos más distantes y dado que a estas distancias el radio axial R_0 es más grande, entonces nos vamos a enfrentar con el hecho de que los choques de proa ubicados en el interior de la nebulosa, van a tener arcos mas cerrados, como sucede con; 108-326, 142-301, 177-341, 167-317, 168-326N, 168-328, 173-236, 175-321, 180-331, entre otros (ver los valores de los radios de curvatura en la tabla 4.1 y las posiciones de los arcos es las figuras 4.4 y 4.5).

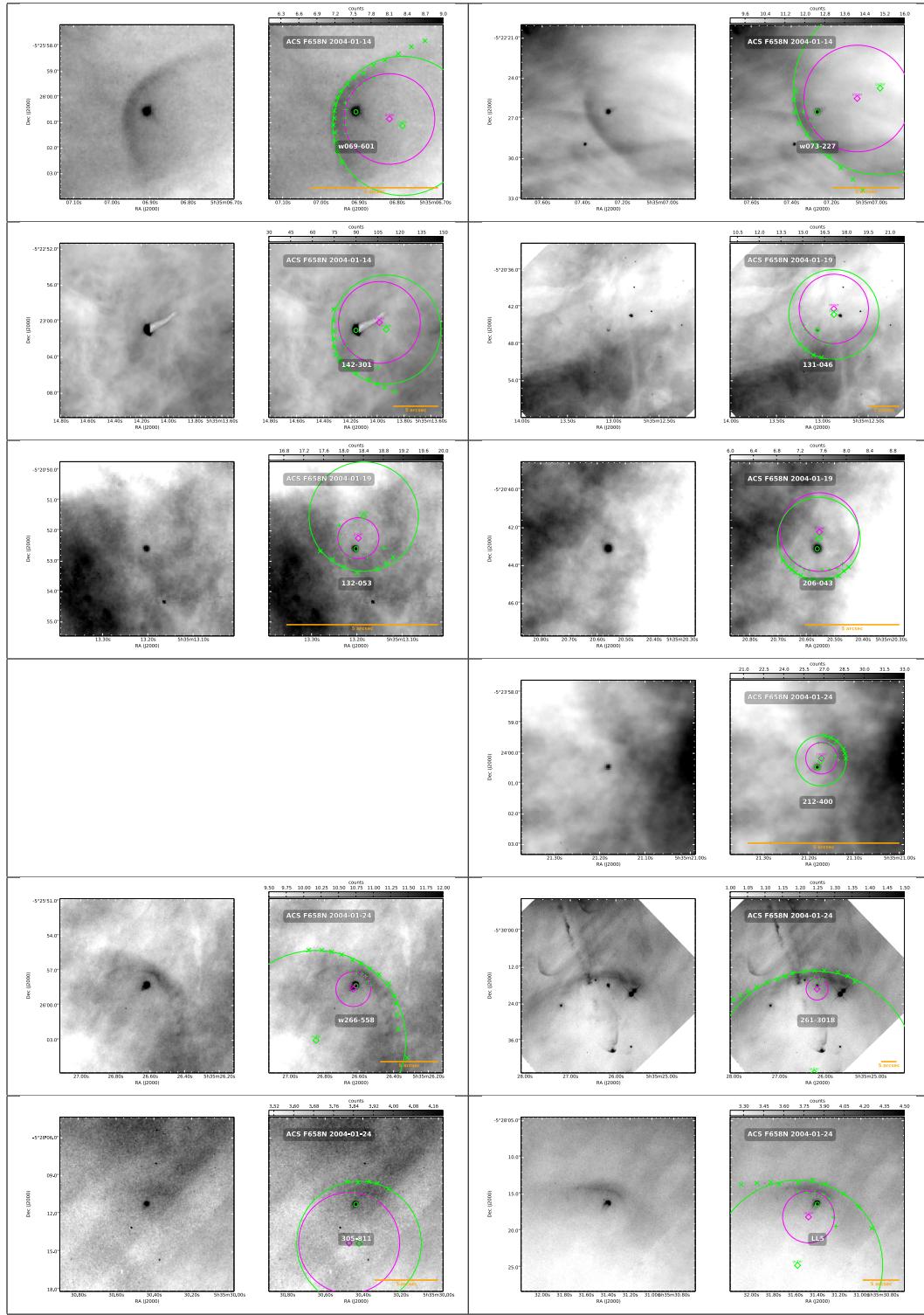
¹Se ha tomado R_0 , como el radio del borde externo de la cáscara chocada.

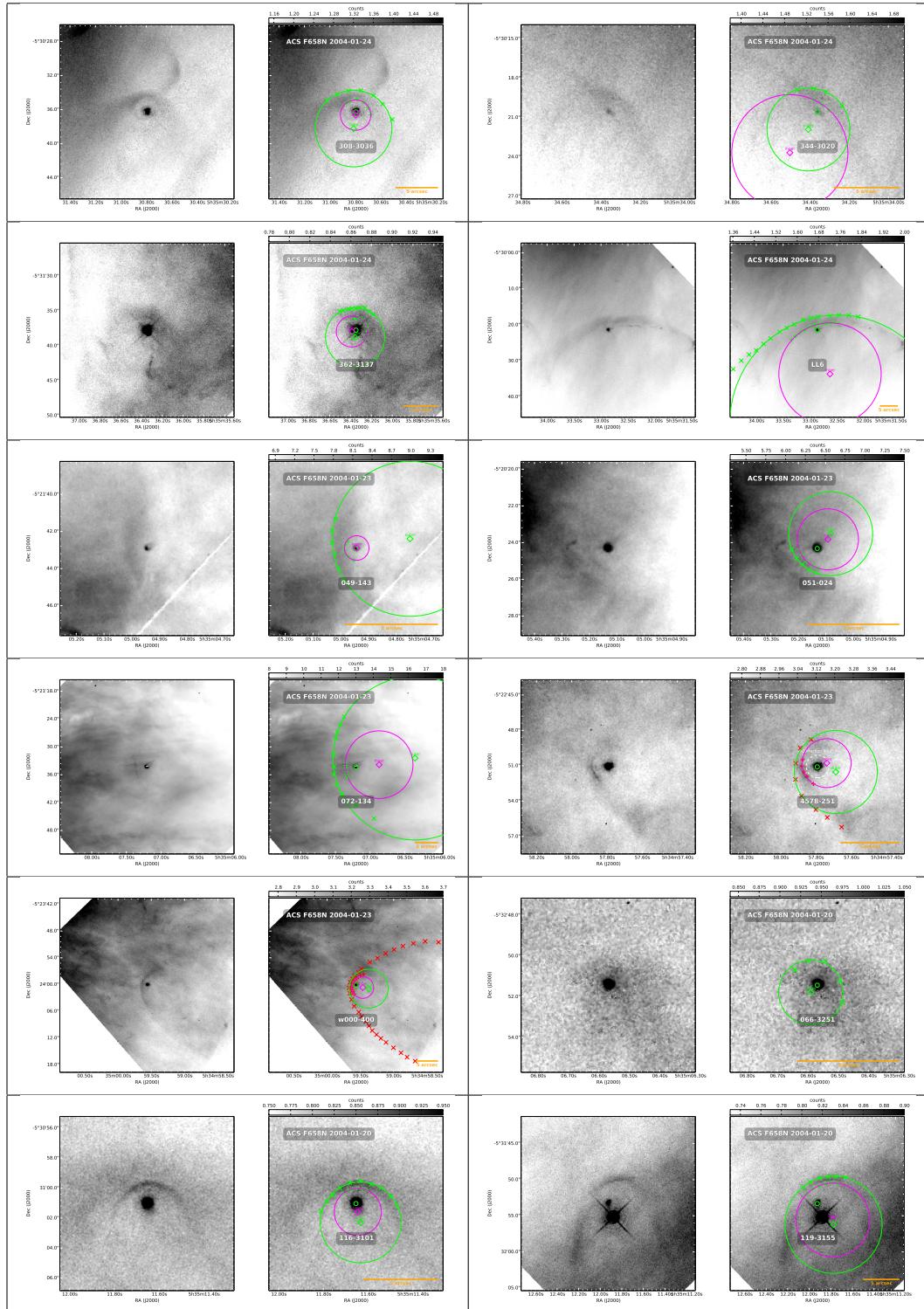
²También se ha tomado el radio de curvatura externo.











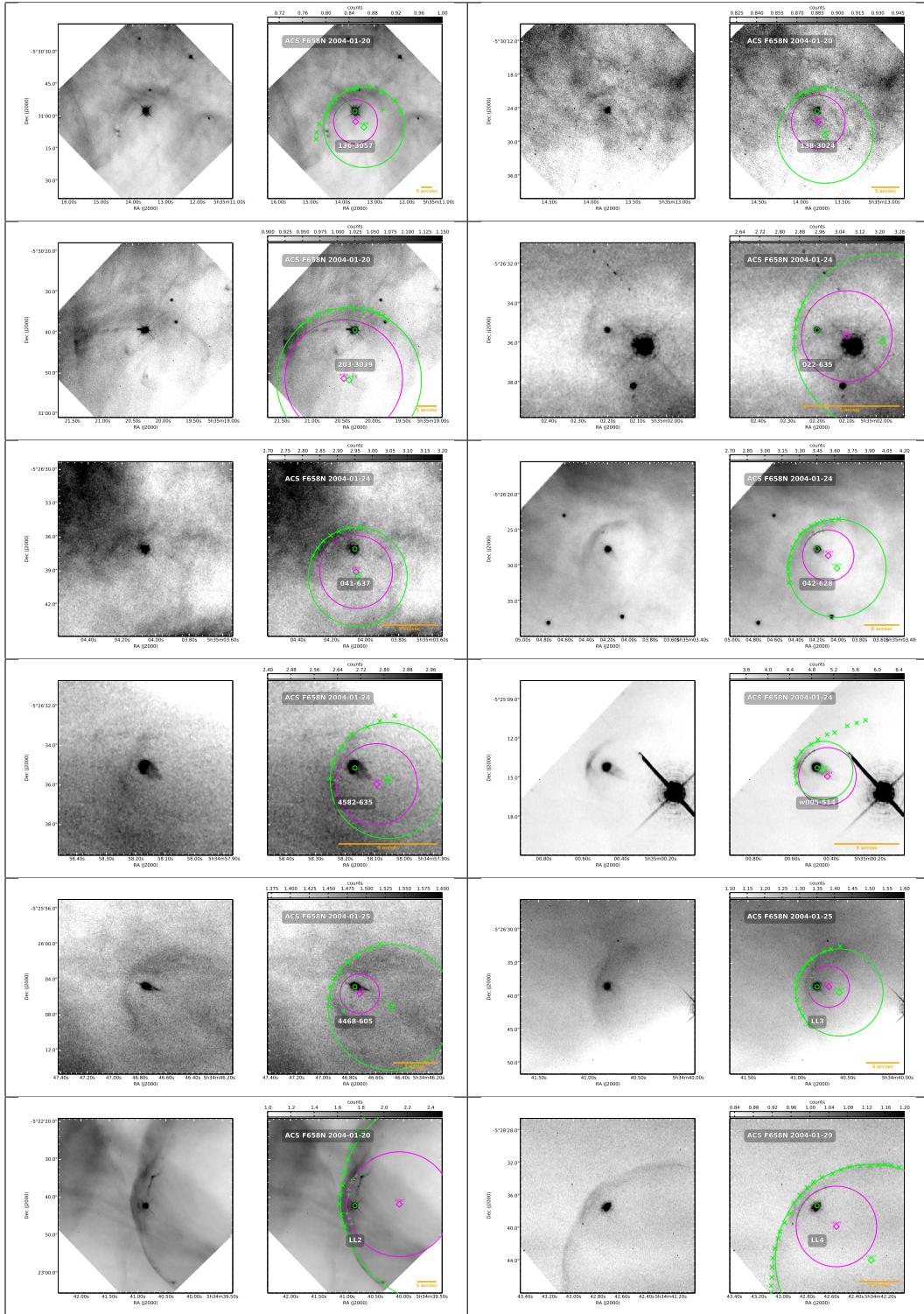


Figura 4.1: Imágenes de H α +[N II] de los 73 objetos LL detectados en la Nebulosa de Orión, en ellas se puede apreciar la forma de los arcos, la estrella jóven presecuencia principal en el interior, el ajuste de los círculos para los bordes internos y externos de la zona chocada. Imágenes tomadas con la cámara ACS-F658N como parte del programa GO-9825.

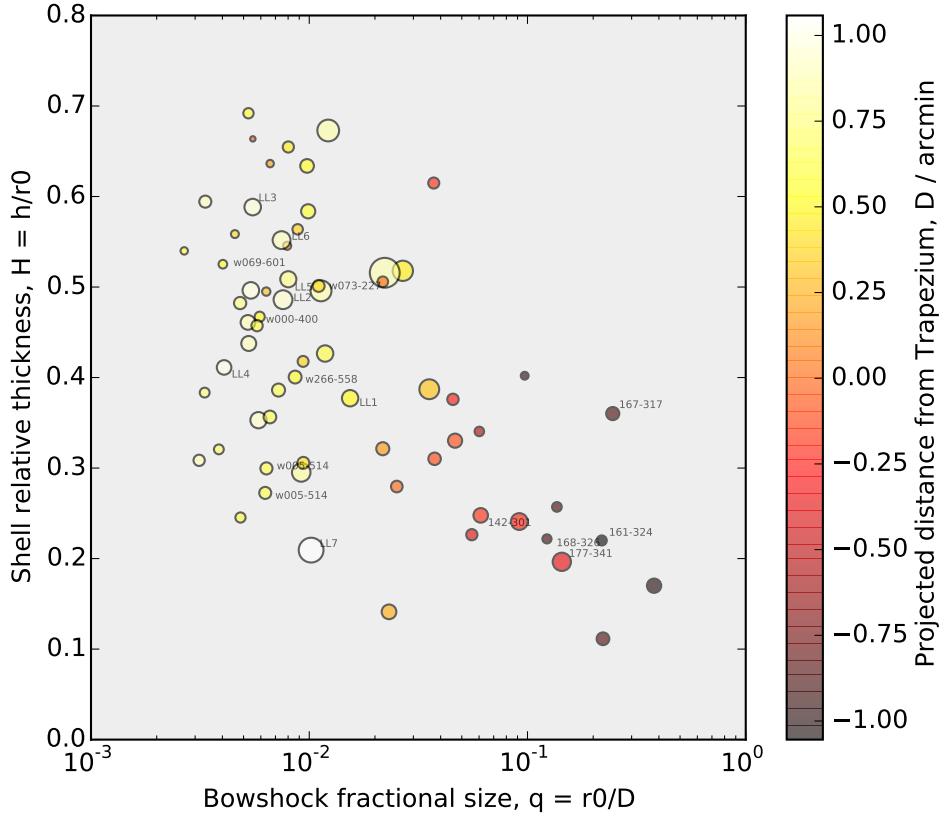


Figura 4.2: Ancho de la cáscara chocada h dividida entre el radio del choque externo $r_0 = R_0$ a lo largo del eje de simetría, para obtener el ancho relativo H , en función de $r_0 = R_0$ normalizado con D , esto es el término q que es un indicativo de los tamaños de los objetos LL. El color de los puntos indica la distancia proyectada desde la fuente al Trapecio (ver el panel de colores de la izquierda). Por último, cabe mencionar que el tamaño de los símbolos hace referencia a los valores de los radios de curvatura R_c de los círculos ajustados de los choques externos.

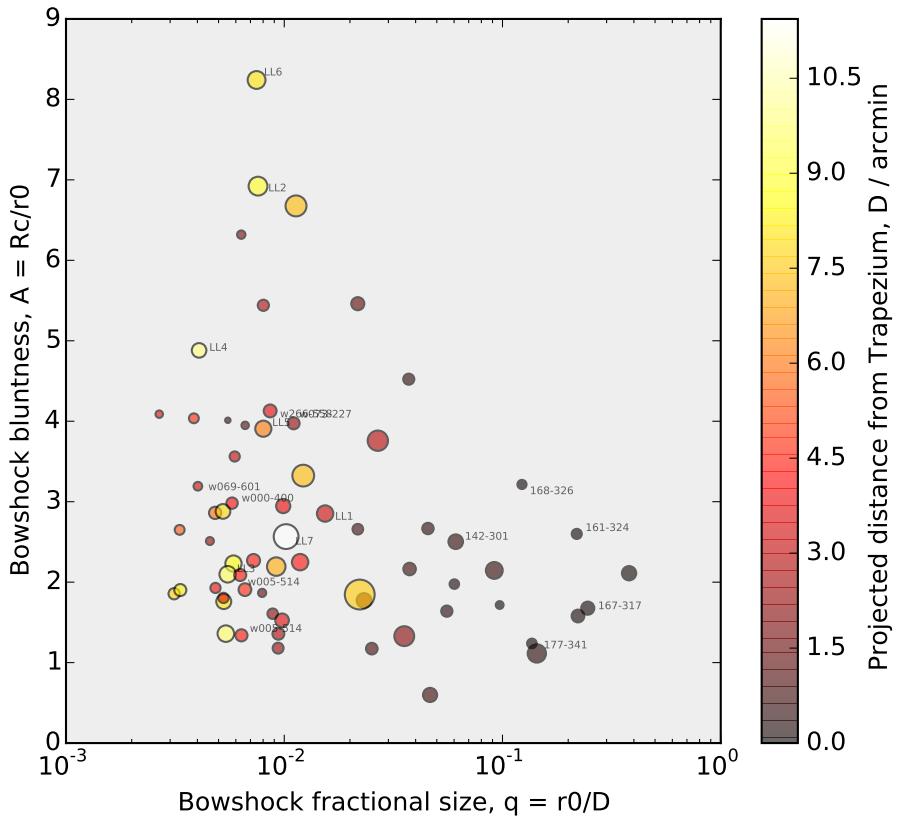


Figura 4.3: Radios de curvaturas de los choques externos R_c dividido entre R_0 , a esta fracción la hemos llamado A , en función de q , como una forma para establecer que tan abiertos o cerrados son las alas de los choques LL. La escala de colores representa la distancia de los objetos a θ^1 Ori C y el tamaño de los símbolos son un indicativo de la longitud los radios de curvaturas.

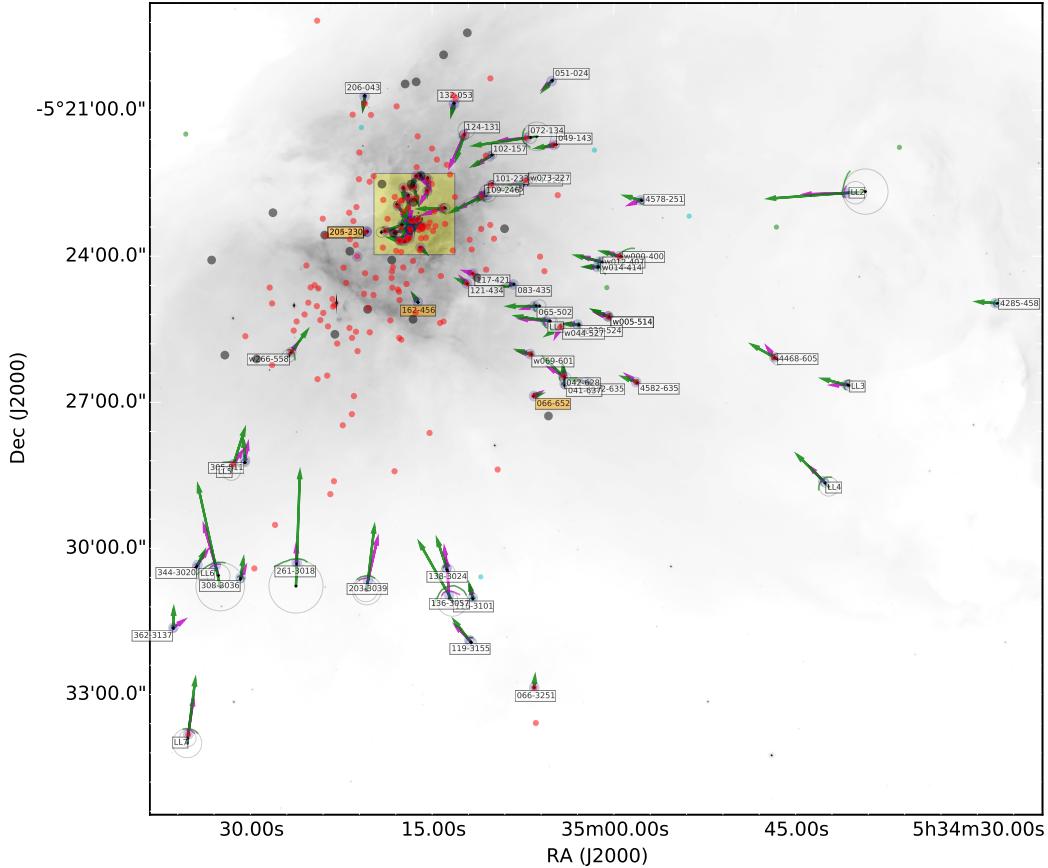


Figura 4.4: Posiciones de los arcos LL superpuestos en una imagen de H α de la Nebulosa de Orión. Los arcos con las flechas representan los objetos LL y los proplyds con sus respectivos choques estacionarios, de nuestro catálogo. Las flechas verdes y violetas indican la orientación de los arcos externos e internos respectivamente. Además se han incluidos los proplyds y otros objetos del catálogo de Ricci et al. (2008), donde los puntos de color rojo representan los clásicos proplyds, los puntos de color negro representan los típicos discos de acreción, los de color verde representan jets radiativos sin evidencia de la presencia de discos ionizados y los símbolos de color cian son nebulosas de reflexión sin emisión externa de gas ionizado. El cuadro en la zona del Trapecio de la imagen es la región ampliada en la figura 4.5.

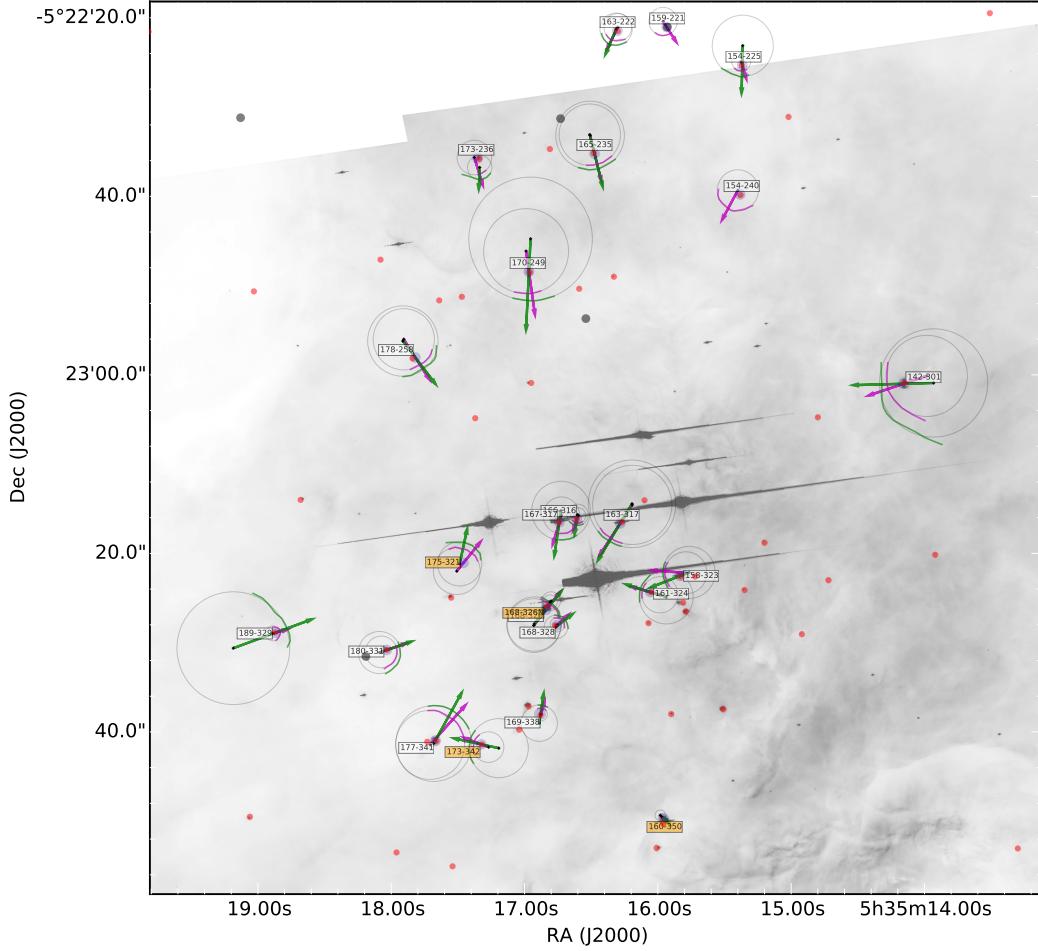


Figura 4.5: Posiciones de los arcos LL. Con un zoom de una pequeña área en el núcleo de la nebulosa. Las flechas y los colores de los símbolos representan los mismos conceptos y objetos que en la figura 4.4.

En la figura 4.4 se ilustran las posiciones de los arcos LL de nuestro catálogo en la Nebulosa de Orión, además se muestran las posiciones de los proplyds del catálogo de Ricci et al. (2008), incluimos estos objetos para mostrar que muchos proplyds de la Nebulosa de Orión no tienen choques de proa asociados. Se observa que los objetos LL están repartidos por toda la nebulosa, esto es que existe una gran cantidad de arcos de emisión en el noroeste y suroeste de la misma, una cantidad un poco menor de estos choques se observan en el sureste y es muy poca el número de arcos LL situados en el noreste de la nebulosa; además se indican las orientaciones de los arcos internos y externos de estos objetos. Estas poblaciones; los objetos LL y los choques de proa de los proplyds de la figura 4.4 de las que estamos hablando, son aquellos ubicados a largas distancias del Trapecio, puesto que en el interior de la nebulosa el mapa está muy saturado y no se logran ver de manera clara las posiciones y orientaciones de los arcos en esta región. Para eso contamos con la figura 4.5 el cual es una ampliación de la región donde se encuentran las estrellas másivas del Trapecio, en ella es posible ver las posiciones de los proplyds y las orientaciones de sus respectivos choques en el interior de la nebulosa de una forma más clara. Entre otras cosas; las direcciones de las flechas de los arcos radiativos LL en las afueras de la nebulosa sugieren a simple vista que estos arcos están orientados hacia el núcleo de la Nebulosa de Orión, de la misma forma los choques de los proplyds en las regiones internas al parecer están orientados hacia θ^1 Ori C.

Cuadro 4.1: Distancias, tamaños y formas de los choques de proa en la Nebulosa de Orión.

Objeto	A.R.	Decli	D	h	R_0 (out)	R_0 (in)	R_c (out)	R_c (in)
065-502	5:35:06.53975	-5:25:01.50750	177.288	1.214	1.422	0.491	7.737	2.31
074-229	5:35:07.384	-5:22:28.92	144.777	0.596	1.357	0.79	1.601	0.748
083-435	5:35:08.29275	-5:24:34.85750	140.892	0.579	1.247	0.544	2.005	0.664
101-233	5:35:10.133	-5:22:32.60	105.936	0.419	2.458	2.111	4.356	4.206
102-157	5:35:10.25075	-5:21:57.11750	125.297	0.45	0.796	0.402	5.03	3.542
106-245	5:35:10.576	-5:22:44.69	94.703	0.38	0.627	0.228	2.476	1.121
109-246	5:35:10.89575	-5:22:46.31750	89.677	0.704	1.948	1.322	10.638	7.325
117-421	5:35:11.650	-5:24:21.41	92.066	0.0	—	0.71	—	0.927
121-434	5:35:12.12175	-5:24:33.75750	95.578	0.39	0.757	0.344	1.413	0.688
142-301	5:35:14.158	-5:23:01.00	39.672	0.6	2.422	1.822	6.062	4.547
154-225	5:35:15.367	-5:22:25.31	59.219	0.584	1.287	0.636	3.421	1.051
154-240	5:35:15.383	-5:22:39.79	45.303	0.0	—	1.72	—	2.3
158-323	5:35:15.831	-5:23:22.51	8.338	0.206	1.849	1.643	2.92	2.354
159-221	5:35:15.934	-5:22:21.04	61.862	0.0	—	0.834	—	1.582
161-324	5:35:16.056	-5:23:24.33	5.295	0.255	1.159	0.904	3.013	2.027
163-222	5:35:16.303	-5:22:21.47	61.071	0.356	1.538	1.108	1.805	1.549
163-317	5:35:16.282	-5:23:16.63	6.111	0.395	2.323	1.928	4.904	4.437
165-235	5:35:16.475	-5:22:35.22	47.325	0.472	1.776	1.225	3.842	3.437
166-316	5:35:16.607	-5:23:16.16	7.149	0.279	0.694	0.415	1.191	0.851
167-317	5:35:16.739	-5:23:16.50	7.974	0.706	1.96	1.254	3.286	2.052
168-326	5:35:16.839	-5:23:26.32	7.712	0.196	0.947	0.737	3.044	3.011
168-326N	5:35:16.835	-5:23:25.97	7.493	0.112	0.225	0.106	1.044	0.79
168-328	5:35:16.757	-5:23:28.05	7.787	0.272	1.062	0.789	1.315	0.799
169-338	5:35:16.880	-5:23:38.02	17.138	0.351	1.031	0.68	2.037	0.719
170-249	5:35:16.967	-5:22:48.44	35.162	0.777	3.225	2.448	6.92	4.755
173-236	5:35:17.352	-5:22:35.73	48.956	0.753	2.28	1.527	1.364	1.935
173-342	5:35:17.324	-5:23:41.39	23.465	0.462	1.29	0.828	3.312	1.719
175-321	5:35:17.458	-5:23:21.06	16.026	0.598	2.031	1.384	2.478	2.626
177-341	5:35:17.667	-5:23:40.98	26.543	0.749	3.813	3.064	4.247	3.867
178-258	5:35:17.819	-5:22:58.06	32.473	0.524	1.479	0.923	3.944	3.43
180-331	5:35:18.033	-5:23:30.82	25.909	0.326	1.44	1.114	2.361	1.772
189-329	5:35:18.868	-5:23:28.88	37.556	0.856	1.397	0.538	6.318	0.833
LL1	5:35:05.63675	-5:25:19.44750	198.626	1.128	3.057	1.904	8.721	7.132
w005-514	5:35:00.46775	-5:25:14.29750	262.718	0.437	1.651	1.201	3.449	2.032
w012-407	5:35:01.17375	-5:24:06.67750	231.47	1.234	2.289	0.953	6.743	4.264
w014-414	5:35:01.37175	-5:24:13.36750	229.954	0.696	1.211	0.373	2.185	1.615
w030-524	5:35:03.00375	-5:25:24.35750	234.087	0.315	0.626	0.288	2.559	1.541
w044-527	5:35:04.427	-5:25:27.39	217.945	0.851	2.13	0.78	3.25	1.527
w069-601	5:35:06.90775	-5:26:00.57750	212.194	0.423	0.853	0.405	2.723	1.773
w073-227	5:35:07.26975	-5:22:26.49750	147.268	0.696	1.626	0.811	6.462	3.979
131-046	5:35:13.05537	-5:20:45.78625	164.46	2.168	3.546	0.999	7.325	5.645
132-053	5:35:13.202	-5:20:52.59	157.312	0.392	0.718	0.317	1.803	0.676
206-043	5:35:20.561	-5:20:43.11	171.159	0.443	1.609	1.117	2.186	2.077
205-230	5:35:20.40175	-5:23:30.00750	60.385	0.295	0.325	0.133	1.336	1.007
212-400	5:35:21.181	-5:24:00.46	80.988	0.213	1.075	0.844	0.831	0.518
w266-558	5:35:26.618	-5:25:58.29	218.155	0.775	1.88	1.127	7.761	1.506
261-3018	5:35:26.16875	-5:30:18.01750	440.4	2.591	4.986	2.514	33.288	3.586
305-811	5:35:30.43675	-5:28:11.23750	356.86	0.8	1.721	0.891	4.924	3.993
LL5	5:35:31.39775	-5:28:16.35750	369.536	1.487	2.963	1.456	11.577	3.517
308-3036	5:35:30.79475	-5:30:36.25250	484.126	1.125	2.557	1.438	4.497	1.782

Cuadro 4.1: continuación

Objeto	A.R.	Decli	D	h	R_0 (out)	R_0 (in)	R_c (out)	R_c (in)
344-3020	5:35:34.36275	-5:30:20.56250	496.758	0.947	1.659	0.673	3.155	4.423
362-3137	5:35:36.34775	-5:31:37.75250	577.964	1.465	3.121	1.572	4.245	2.222
LL6	5:35:32.86575	-5:30:21.45250	485.816	2.049	3.628	1.626	29.899	14.201
049-143	5:35:04.945	-5:21:42.92	197.821	0.56	1.173	0.625	4.178	0.662
051-024	5:35:05.131	-5:20:24.32	245.01	0.269	1.186	0.895	2.287	1.663
072-134	5:35:07.20375	-5:21:34.29500	174.737	2.419	4.69	2.261	17.626	7.286
4578-251	5:34:57.79275	-5:22:51.09500	279.493	0.533	1.846	1.188	3.52	2.074
w000-400	5:34:59.56575	-5:24:00.14500	254.035	0.675	1.465	0.795	4.369	2.432
066-3251	5:35:06.56919	-5:32:51.43000	587.491	0.0	1.068	—	1.588	—
116-3101	5:35:11.65419	-5:31:01.03000	463.921	0.44	1.452	1.004	2.695	1.574
119-3155	5:35:11.926	-5:31:53.30	515.101	1.002	3.015	1.951	6.727	5.11
136-3057	5:35:13.60719	-5:30:57.56000	456.925	4.51	10.133	4.907	18.706	10.203
138-3024	5:35:13.79919	-5:30:24.40000	423.642	1.107	3.893	2.744	8.539	4.787
203-3039	5:35:20.289	-5:30:39.38	440.716	3.06	5.384	1.761	17.897	14.501
022-635	5:35:02.200	-5:26:35.33	286.472	0.341	1.104	0.75	4.456	2.29
041-637	5:35:04.060	-5:26:37.06	267.84	0.766	1.937	1.189	4.395	3.232
042-628	5:35:04.19875	-5:26:27.59750	259.592	1.339	3.069	1.76	6.901	3.606
4582-635	5:34:58.16675	-5:26:35.12750	333.372	0.455	1.106	0.682	2.931	2.056
w005-514	5:35:00.471	-5:25:14.21	262.637	0.424	1.672	1.171	2.239	2.213
4468-605	5:34:46.75775	-5:26:04.81750	471.3	1.199	2.469	1.331	7.109	2.223
LL3	5:34:40.807	-5:26:38.54	566.331	1.83	3.119	1.284	6.544	3.085
LL2	5:34:40.860	-5:22:42.20	532.124	1.133	4.035	2.074	27.93	13.844
LL4	5:34:42.719	-5:28:37.20	593.107	0.992	2.415	1.422	11.787	4.952
LL7	5:35:35.126	-5:33:49.16	686.232	1.46	6.998	5.533	17.958	10.306

4.2 Discusión

Las mediciones de las posiciones de los 73 arcos de emisión detectados en la Nebulosa de Orión han permitido indicar las orientaciones de los choques, que siguen la dirección del flujo externo de la nebulosa, como resultado intrínseco de la interacción de este con el viento interno de la estrella T-Tauri o proplyd. De acuerdo a las orientaciones mostradas en las figuras 4.4 y 4.5 de los arcos en la nebulosa, podemos pensar que el flujo proveniente del núcleo de la nebulosa es aproximadamente radial, como se ha interpretado en la sección §4.1.1.

No obstante, en la figura 4.6 se ilustran de manera más estricta, que tanto siguen la dirección radial las orientaciones de los arcos radiativos en las regiones internas y externas de la nebulosa, considerando la dirección radial; como la línea imaginaria que va desde la fuente hasta θ^1 Ori C. Para ello, con los valores medidos de las posiciones angulares de las fuentes a θ^1 Ori C, es decir el ángulo formado por la dirección radial en el plano del cielo (x, y), junto con los valores medidos de las posiciones angulares de los ejes de los choques o eje de simetría en el plano del cielo, se ha estimado el desplazamiento angular del eje del choque con respecto a la línea imaginaria trazada desde la fuente a θ^1 Ori C, tomando este último como eje de referencia³, en otras palabras se ha calculado el ángulo entre el eje del choque y la dirección radial. Los resultados han mostrado que las direcciones de los ejes de los choques no son estrictamente radiales, puesto que están desplazados en un intervalo que va desde 0° a -50° en el noroeste y noreste de la nebulosa, mientras que los ejes de los arcos ubicados en el sureste y suroeste están desplazados en un intervalo de ángulo que va desde 0°

³A excepción de los choques de proa producidos por la interacción de los vientos de dos proplyds, donde se ha tomado como eje de referencia, la dirección de un proplyd con respecto al otro.

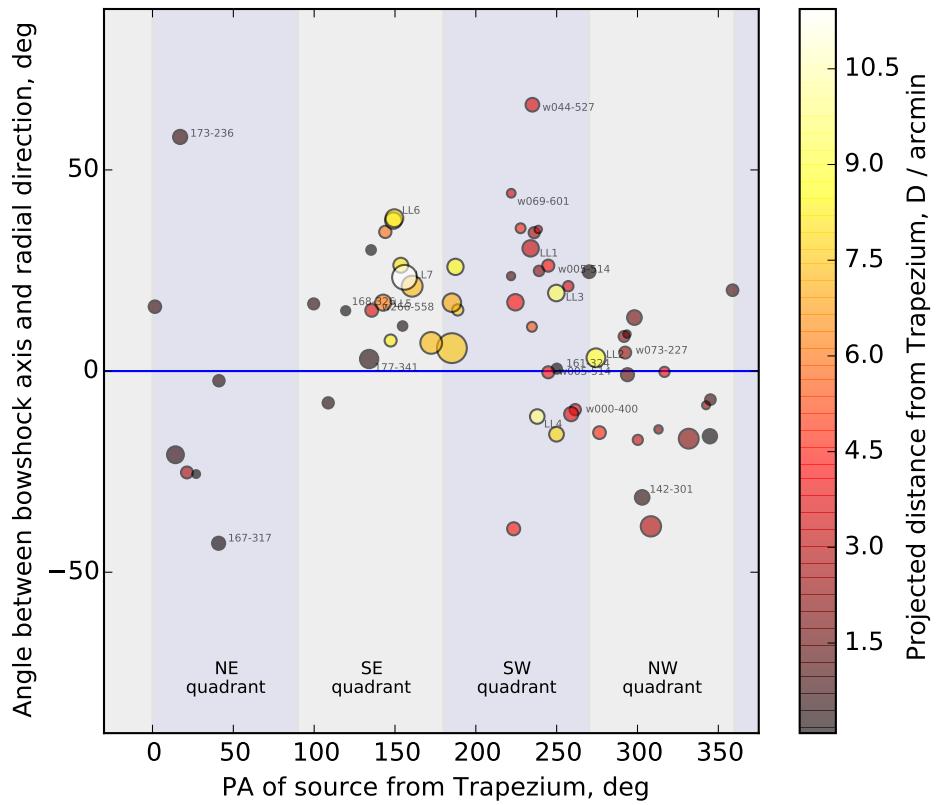


Figura 4.6: Angulo entre el eje del choque de proa y la dirección a radial, este último es en dirección a θ^1 Ori C, en función de la posición angular de θ^1 Ori C a la fuente en el plano del cielo, es decir tomando las coordenadas cartesianas (x, y). La línea azul y vertical representa el ángulo “0” entre las dos posiciones angulares. La escala de colores representa la distancia proyectada desde los objetos LL al Trapecio y el tamaño de los símbolos indica el tamaño del radio de curvatura externo.

a 50° . Estos ángulos positivos y negativos en los diferentes cuadrantes de la nebulosa indican un desplazamiento hacia la izquierda de la dirección radial, de los ejes de los choques de proa.

En la figura 4.7, se observa que la fracción de proplyds entre el número de estrellas caen relativamente con facilidad con la distancia proyectada a θ^1 Ori C. Mostrando una repentina caída después de unos 200 arcsec.

Por otro lado la fracción entre los choques de proa y los proplyds parecen tener tres picos separados. En este orden de ideas, para distancias muy pequeñas se puede ver que el primer pico corresponde a la interacción de los vientos estelar con el viento ionizado de los proplyds, a continuación hay una escasez de choques de proa hasta el segundo pico cerca de unos 4 arcmin. Por último se puede apreciar que a grandes distancias, donde podría haber un tercer pico dominan el número de objetos que no son proplyds.

No obstante una explicación alternativa para lo planteado anteriormente, podría ser que en este tercer pico todos los objetos son proplyds, pero como se piensa que a grandes distancias no se sabe con certeza que clase de objetos están originando los vientos en una escala más pequeña, entonces estaríamos subestimando la fracción de proplyds para grandes estas distancias.

También hay evidencia de tres distintas poblaciones de la distribución azimutal alrededor del Trapecio. Para el grupo ubicado a 4 arcmin de separación son principalmente aquellos objetos del oeste de la nebulosa, mientras que los objetos más distantes son principalmente los del sur.

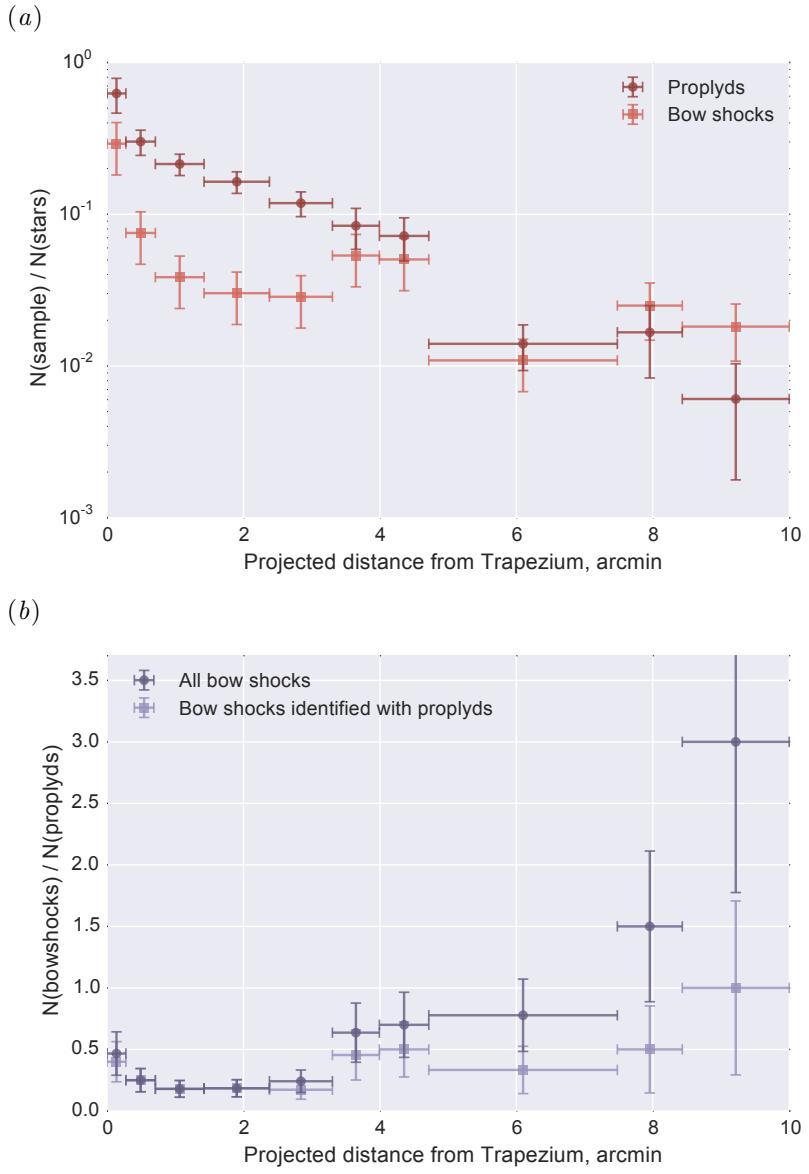


Figura 4.7: (a) Fracción de todas las estrellas ópticamente visibles que son proplyds (símbolos circulares oscuros) o que tienen choques de proa (símbolos cuadrados claros) como una función de la separación proyectada desde el Trapecio. (b) Relación entre el número de choques de proa y el número de proplyds en función de la separación proyectada desde el Trapecio. Los símbolos circulares y oscuros representan todos los choques de nuestro catálogo (a excepción de los choques producidos pos la interacción de dos proplyds) mientras que los símbolos cuadrados y claros indican estos mismos choques de proa pero sólo aquellos asociados con conocidos y supuestos proplyds.

Capítulo 5

Resultados astronómicos

Este capítulo los hemos dividido en dos partes. La primera parte es una descripción de la derivación de los parámetros físicos que gobiernan la naturaleza y estructura de los choques de proa, a partir de las suposiciones; de que los arcos hiperbólicos y los choques de proa de los proplyds son estacionarios, como una posible consecuencia del equilibrio de presiones; que la cáscara chocada está dominada por la presión térmica y que el flujo de partículas interno y externo que interactúan para formar los arcos, están dominados por las presiones hidrodinámicas. Se ilustra que en la cáscara chocada se usó la ecuación de estado de los gases ideales para estimar la presión en esta región, como esta relación está en función de la densidad numérica de partículas, entonces antes de esto construimos una ecuación de la densidad promedio de partículas en función de los parámetros observacionales ya conocidos, esto es en términos del brillo superficial de H α ($S_{H\alpha}$), el radio de curvatura (R_c) y el espesor (h) de la cáscara chocada. En las regiones externas e internas al choque se usó la presión ram y la ecuación general de la tasa de pérdida de masa para escribir las presiones de los vientos internos y externos al choque en términos de la tasa de pérdida de masa (\dot{M}), la velocidad del viento v y las distancias características (D y R_0), permitiéndonos al mismo tiempo usando el equilibrio de presiones escribir el producto $M_w V_w$ del viento externo en términos de la presión térmica.

La segunda parte de este capítulo es una descripción de los resultados astrofísicos. Se muestran los resultados de las estimaciones realizadas de la densidad en la cáscara chocada, la presión en la cáscara, la presión de los vientos involucrados en los choques y el flujo momento interno de los objetos de nuestro catálogo, usando las ecuaciones derivadas en la primera parte del capítulo, junto con los parámetros observacionales medidos previamente directo de las observaciones, nos referimos aquí, al brillo superficial de H α $S(H\alpha)$, los radios de curvatura R_c , la distancia de la estrella central al choque a lo largo del eje del arco R_0 y la anchura de la cáscara h , puesto que estos parámetros son variables de las ecuaciones derivadas teóricamente.

5.1 Derivación de los parámetros físicos

5.1.1 Densidad en la cáscara chocada

Un parámetro físico importante para estudiar la naturaleza de los choques de proa, es la densidad electrónica, así que un primer paso en esta tarea consiste en determinar la densidad promedio de partículas en la cáscara chocada. No obstante existen dos técnicas para estimar esta cantidad física. Una primera técnica consiste en medir la densidad promedio de electrones a través de las observaciones de los efectos de la desexcitación colisional. Esto puede hacerse comparando las intensidades de dos líneas emitidas por un mismo ión desde niveles con energía de excitación similares, así que las tasas de excitación relativas de los

dos niveles dependen únicamente del cociente de sus fuerzas de colisión. Si los niveles tienen diferentes probabilidades de transición o diferentes tasas de desexcitación colisional, entonces la población relativa de los dos niveles dependerá de la densidad, y por consiguiente el cociente de las intensidades de las líneas emitidas también dependerán de la densidad. Los mejores ejemplos de cociente de líneas usados para determinar la densidad electrónica en el rango del óptico son [O II] $\lambda 3729/\lambda 3726$ y [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$ (Osterbrock, 1989).

La segunda técnica para estimar la densidad electrónica promedio en la cáscara de los choques de proa consiste en usar el brillo superficial de $H\alpha$, $S(H\alpha)$, obtenido a partir de las observaciones (más adelante daremos más detalles de este método). Henney et al. (2013) estimó la densidad electrónica para la cáscara de LL1, usando los dos métodos, es decir empleó el cociente de líneas de [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$ para calcular la densidad en esta zona, y separadamente usó el brillo superficial de $H\alpha$ para el mismo fin, posteriormente comparando los dos resultados encontró que las densidades derivada a partir de los dos métodos fueron muy compatibles. Por tanto para este trabajo hemos utilizado la segunda técnica para estimar la densidad, puesto que contamos con el brillo superficial de $H\alpha$ de la cáscara de todos los arcos de proa de nuestro catálogo, entonces a continuación presentamos una análisis detallado de como determinar la densidad electrónica a partir del brillo superficial de $H\alpha$, pero antes es importante a hablar un poco sobre la naturaleza de la línea de recombinação de Balmer- $H\alpha$, debido a que a partir de la emisión de esta línea de recombinação medimos $S(H\alpha)$.

Líneas de recombinação de $H\alpha$

La serie de Balmer es un conjunto de líneas espectrales del átomo de hidrógeno que a diferencia de otras líneas de emisión del mismo, las transiciones ocurren desde los niveles de energía $n = 3, 4, 5, \dots$ al nivel $n = 2$ con n el número cuántico principal, así cada una de estas transiciones corresponde a una longitud de onda particular ($\lambda_{32} = 6563 \text{ \AA}$ ($H\alpha$; rojo), $\lambda_{42} = 4862 \text{ \AA}$ ($H\beta$; turquesa), $\lambda_{52} = 4340 \text{ \AA}$ ($H\gamma$; azul) y $\lambda_{62} = 4101.75 \text{ \AA}$ ($H\delta$; violeta)) estas longitudes de onda se han determinado a partir de datos experimentales, además éstas longitudes de onda λ caen dentro de la región visible del espectro electromagnético (Carroll & Ostlie, 1996)) (ver figura). Por otro lado, para las líneas de recombinação del átomo de hidrógeno tenemos que la energía de los fotones que se emiten durante las transiciones está dada por,

$$E = \frac{hc}{\lambda}. \quad (5.1)$$

Según el tratado de Bohr la energía en un estado cuántico es

$$E_n = -13.6 \text{ eV } \frac{1}{n^2}, \quad (5.2)$$

esta última expresión también nos proporciona la energía del fotón emitido, es decir

$$E = 13.6 \text{ eV } \left(\frac{1}{n_{\text{Inf}}^2} - \frac{1}{n_{\text{Sup}}^2} \right). \quad (5.3)$$

Donde esta es la energía liberada cuando el electrón decae de un nivel de energía, n_{Sup} , a un nivel de menor energía, n_{Inf} . Usando las ecuaciones 5.1 y 5.3 para el caso particular de las líneas de recombinação de $H\alpha$ (donde la transición ocurre del nivel superior de energía $n = 3$ al nivel inferior de energía $n = 2$) tendremos que:

$$E_{32} = 1.889 \text{ eV} \text{ y } \lambda_{32} = 6563 \text{ \AA}. \quad (5.4)$$

Estimación de la densidad a partir del brillo superficial de H α

Empezemos por escribir la relación de brillo superficial, suponiendo que no hay absorción y que además está corregida por la absorción del polvo;

$$S_{\text{H}\alpha} = \int \eta_{\text{H}\alpha} d\zeta \simeq \eta_{\text{H}\alpha} \Delta\zeta \quad (5.5)$$

en la que $\eta_{\text{H}\alpha}$ es la emisividad, cuyas unidades son [erg s $^{-1}$ cm $^{-3}$ sr $^{-1}$] y $\Delta\zeta$ es el camino de la línea de visión a través de la cáscara (más adelante determinaremos $\Delta\zeta$). El primero de estos parámetro está dado por,

$$\eta_{\text{H}\alpha} = \frac{N(\text{H}_{n=3}^0) A_{32}}{4\pi} \left(\frac{hc}{\lambda_{32}} \right) \quad (5.6)$$

donde A_{32} es la probabilidad de transición y $N(\text{H}_{n=3}^0)$ es la densidad numérica de átomos neutros. Si la tasa de recombinaciones por volumen que producen H α es

$$\alpha_{\text{H}\alpha} N_e N_H = N(\text{H}_{n=3}^0) A_{32} \quad (5.7)$$

donde $\alpha_{\text{H}\alpha}$, N_e y N_H son el coeficiente de recombinación efectiva, la densidad de electrones y la densidad de núcleos de hidrógeno. El coeficiente de recombinación efectiva expresa la probabilidad de que un electrón en el estado $n = 3$ decaiga en cascada hasta el nivel de menor energía $n = 2$, considerando todos los caminos posibles, el cual está definido por

$$N_H N_e \alpha_{\text{H}\alpha} = \frac{4\pi j_{\text{H}\alpha}}{h\nu_{\text{H}\alpha}}$$

donde $h\nu_{\text{H}\alpha}$ representa la diferencia de energía entre los niveles involucrados en la transición y $j_{\text{H}\alpha}$ es la intensidad media de la línea de H α . Según Osterbrock & Ferland (2006) el coeficiente de recombinación efectiva de H α tiene por valor $\alpha_{\text{H}\alpha} = 1.27 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ para una temperatura electrónica de $T = 9000 \text{ K}$.

Por otro lado, al sustituir la Ec. 5.7 en la Ec. 5.6 y teniendo en cuenta que $N_e \simeq N_H \simeq N$ obtenemos que

$$\eta_{\text{H}\alpha} = \frac{\alpha_{\text{H}\alpha} N^2}{4\pi} \left(\frac{hc}{\lambda_{32}} \right) \quad (5.8)$$

usando la ec. (5.5) se concluye que,

$$N^2 = \frac{4\pi S_{\text{H}\alpha}}{\alpha_{\text{H}\alpha} E_{32} \Delta\zeta} \quad (5.9)$$

esta expresión representa la densidad promedio en la cáscara, donde $E_{32} = hc/\lambda_{32}$ es la energía de los fotones de H α y cuyo valor es perceptible en la expresión 5.4.

Proyección en el plano del cielo

Otra cosa que debemos tener en cuenta en relación a los distancias y radios medidos a partir de las observaciones es que vemos a los choques de proa proyectados en el plano del cielo (x, y), entonces tendremos que las distancias (D), y los radios característicos (R_0 y R_c) medidos en la sección anterior no son estimaciones reales de los mismos, puesto que hay que considerar una rotación de los choques con respecto a $\theta^1 \text{ Ori C}$. Esto implica que las distancias y radios reales están rotados un ángulo i con respecto al marco de referencia del observador (x, y, z), en este orden de ideas los parámetros observacionales proyectados descritos anteriormente están dados por,

$$R_c = R'_c; \quad D = D' \cos i; \quad R_0 = R'_0 \cos i$$

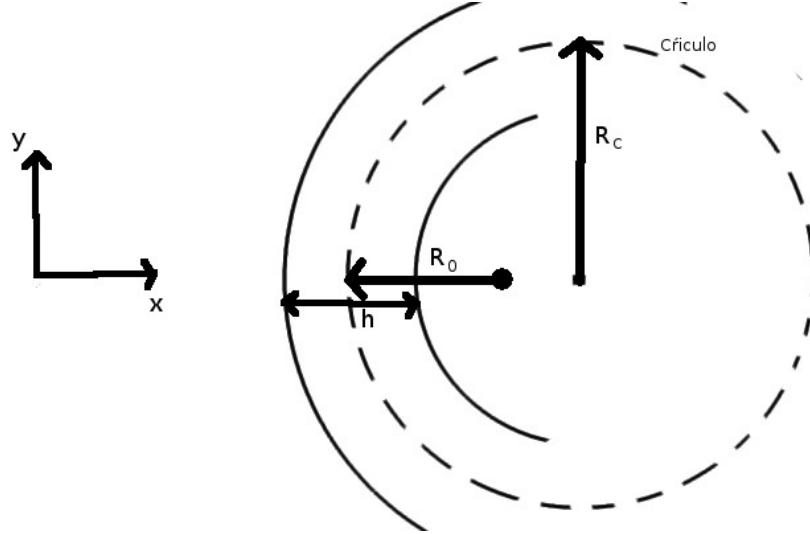


Figura 5.1: Geometría de la cáscara chocada. En el que se supone simetría cilíndrica en el plano del cielo (x, y), la línea de visión va en dirección al eje de las z .

Donde los parámetros primados se ubican en el marco de referencia del objeto en cuestión (x', y', z'), es decir son las distancias y radios reales. La relación entre el radio curvatura proyectado y real permanece constante por que en este caso se considera una aproximación esférica donde el radio de curvatura no varía con el marco de referencia.

Estimación de la longitud del camino de la línea de visión, $\Delta\zeta$

Para una cáscara localmente esférica con radio de curvatura R_c y anchura h que es observado tangencialmente Henney et al., suponiendo simetría cilíndrica y el eje de simetría en el plano del cielo (x, y) (ver figura 5.2) 5.1), la longitud máxima de la línea de visión es

$$\Delta\zeta = 2\sqrt{2R_c h - h^2} \quad (5.10)$$

esto es considerando que la geometría de la cáscara en (x, z) es igual en (x, y) (ver figura 5.1). Para el caso en que $h \gg R_c$ tendremos que,

$$\Delta\zeta = 2(R_c h)^{1/2} \quad (5.11)$$

5.1.2 Presión Térmica en la cáscara chocada

En la cáscara chocada la presión dominante es la presión térmica, debido a que esta zona esta constituida por gas ionizado, esto porque la energía cinética del flujo de partículas cargadas proveniente de la estrella central o proplyd se convierte en energía térmica en la zona chocada, entonces en este sentido tendremos que,

$$P_{\text{Térmica}} = 2NkT \quad (5.12)$$

Donde N dada por la Ec. 5.9 es la densidad total de partículas, k la constante de Boltzmann y T la temperatura en la cáscara chocada. Vamos a considerar que el gas en la zona chocada de los arcos de emisión están en equilibrio de fotoionización a una temperatura de $\simeq 10^4$ K (Henney, 2002; Henney et al., 2002). No obstante, como se dijo en el capítulo 1 inmediatamente detrás de cada uno de los choques que limitan la cáscara chocada la temperatura del gas se elevará por la termalización de la energía cinética pre-choque, pero este exceso de energía termal es radiada resultando en una gran emisión y de esta manera el gas

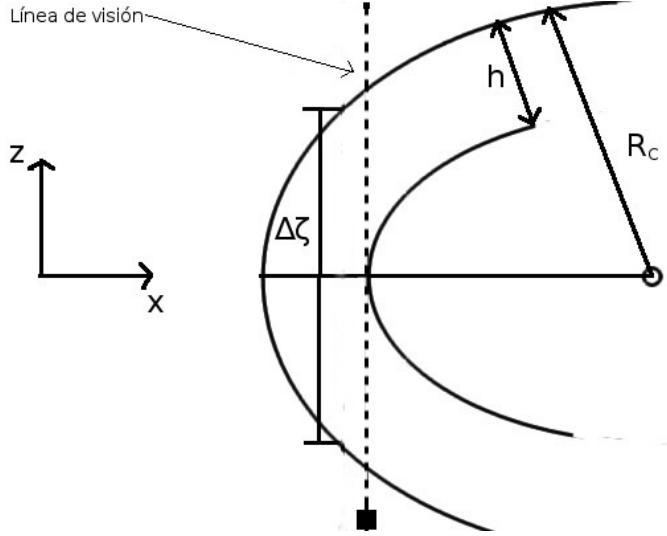


Figura 5.2: Geometría de la cáscara en el plano (x, z) , donde su radio de curvatura R_c es igual que en el plano (x, y) .

retorna a su estado de equilibrio, esto quiere decir que las longitudes de enfriamiento en la cáscara es mucho menor que la anchura de la zona chocada ($d_{\text{cool}} \ll h$), lo que indica que el enfriamiento es bastante eficiente y por tanto el gas en esta zona alcanza un equilibrio térmico a una temperatura de $\simeq 10^4$ K. Para este caso también hay que considerar la suposición de que los campos magnéticos no son importantes.

Por otro lado, si se incluye la contribución de helio entonces la densidad total de partículas es,

$$N = N_H + N_e + N_{He} + N_z$$

donde N_e es la densidad numérica de electrones, N_{He} es la densidad numérica de átomos de helio y N_z es la densidad de los elementos más pesados, esta última se puede despreciar debido a que su abundancia es pequeña. Es de notar que la abundancia por número de helio es y_{He} de tal manera que, $N_{He} = y_{He}N$ con $y_{He} \simeq 0.08$. Ahora podemos escribir la densidad electrónica como;

$$N_e = Nx_{H+} + y_{He}Nx_{He+} + 2y_{He}Nx_{He^{++}} + \sum_k \sum_j N_j y_j x_{jk}$$

Aquí x_{H+} y x_{He+} representan el grado de ionización del hidrógeno y el helio respectivamente, donde $x_{H+} = 1$ y $x_{He^{++}} \simeq 0$ para Orión, el último término de la expresión anterior es despreciable debido a que corresponde a los metales, de este modo nos queda

$$N_e \simeq N(1 + y_{He}x_{He+})$$

Los choques LL se encuentran lejos del Trapecio donde $x_{He+} \simeq 0$, mientras que los arcos de los proplyds interiores tienen $x_{He+} \simeq 1$ entonces,

$$P = \begin{cases} 2.08NkT & \text{si } x_{He+} \simeq 0 \\ 2.16NkT & \text{si } x_{He+} \simeq 1 \end{cases} \quad (5.13)$$

5.1.3 Interacción de dos vientos

La interacción de dos flujos da como resultado una cáscara limitada por dos choques, donde su geometría está caracterizada por las variables D , R_0 , R y h . Los cuales representan en

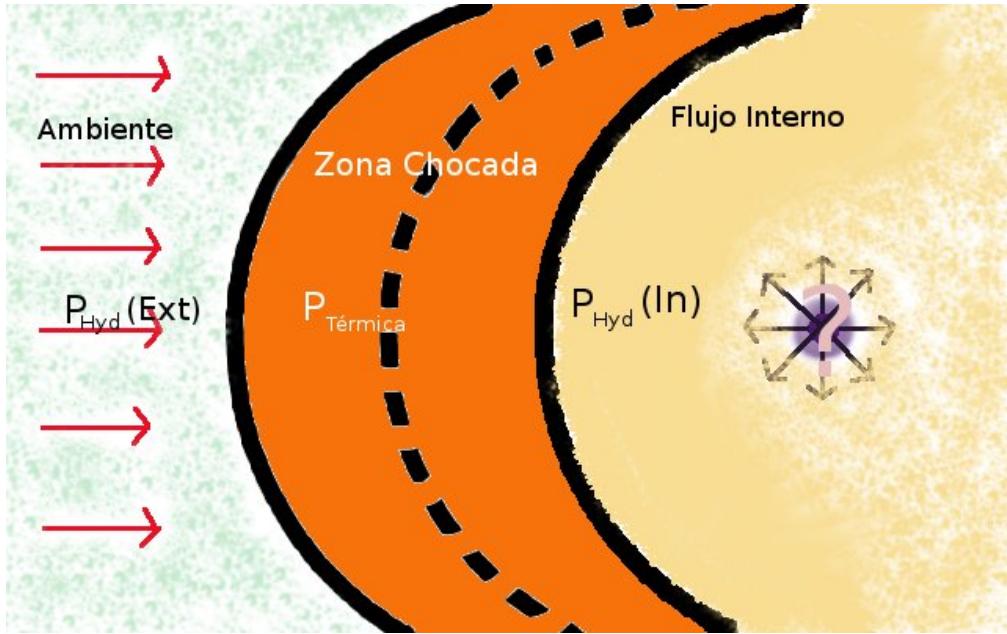


Figura 5.3: Choque formado por la interacción de dos flujos. El viento en el ambiente está dominado por la presión hidrodinámica ($P_{\text{Hyd}}(\text{out})$), al igual que el viento generado por la estrella T-Tauri o el prolyd, esto es, ($P_{\text{Hyd}}(\text{in})$). Por otro lado la cáscara chocada está dominada por la presión térmica ($P_{\text{Térmica}}$).

el mismo orden; la distancia de la fuente a θ^1 Ori C, los radios desde el arco de proa a la estrella central a lo largo del eje del choque, el radio de curvatura de la cáscara en su eje de simetría y la anchura de la cáscara. Es importante señalar que este radio de curvatura, R_c , no es necesariamente igual al radio de curvatura empírico medido de las observaciones, porque este último hace referencia al radio proyectado del círculo fijado a los puntos donde se encuentran los choques de proa en las observaciones, mientras que el radio de curvatura teórico hace referencia al radio de los círculos en el eje de simetría de la cáscara chocada (ver figura 5.1). Como ya se ha reiterado, las suposiciones para este tipo de modelo son las siguientes:

1. Las cáscaras chocadas están en estado estacionario (tiempo dinámico \ll tiempo evolutivo), puesto que no se les han detectado movimientos propios. Esto puede ser el resultado del equilibrio de presiones en estas regiones.
2. No hay aceleración ni gravedad.
3. En los vientos (viento estelar o el flujo fotoevaporado según sea el caso) domina la presión hidrodinámica y en la cáscara chocada domina la presión térmica (ver figura 5.3).

Con estas suposiciones es posible determinar el flujo de momento del viento interno, usando la presión en la cáscara estimada en la sección anterior y la presión ram que a continuación estimaremos.

Presión hidrodinámica

En términos generales la tasa de pérdida de masa está dada por

$$\dot{M} = 4\pi\rho v R^2 \quad (5.14)$$

Donde ρ , v y R son la densidad del flujo, la velocidad del flujo y la distancia a la fuente en el mismo orden. Por otro lado la presión del viento estelar es,

$$P = \rho v^2 \quad (5.15)$$

si combinamos las ecuaciones 5.14 y 5.15 obtenemos,

$$P = \frac{\dot{M}v}{4\pi R^2}. \quad (5.16)$$

En general esta (Eq. 5.16) es la presión ram ejercida por un flujo de partículas, en términos de \dot{M} y v . Particularmente para nuestro modelo tendremos dos tipos de presiones hidrodinámicas; una corresponde a la presión generada por el viento estelar proveniente del Trapecio dada por

$$P_{\text{Hyd}}(\text{out}) = \frac{\dot{M}v}{4\pi D^2} \quad (5.17)$$

donde D es la distancia de la fuente a θ^1 Ori C, \dot{M} es la tasa de pérdida de masa de la estrella masiva del Trapecio y v es la velocidad del viento estelar externo. Y otra que corresponde a la presión ejercida por el viento de la estrella T-Tauri o proplyd

$$P_{\text{Hyd}}(\text{in}) = \frac{\dot{M}_w V_w}{4\pi R_0^2}. \quad (5.18)$$

Las variables de la ecuación anterior se refieren a la tasa de pérdida de masa y la velocidad del viento de la estrella T-Tauri, además de esto R_0 representa la distancia de la estrella o proplyd al choque.

Flujo de momento $\dot{M}_w V_w$ del viento interno

De acuerdo a la suposición 1, existe un equilibrio de presiones de tal manera que podemos establecer que;

$$P_{\text{Hyd}}(\text{out}) = P_{\text{Termica}} = P_{\text{Hyd}}(\text{in}). \quad (5.19)$$

Ahora si sustituimos la Ec. 5.16 en la anterior ecuación obtenemos que,

$$\dot{M}_w V_w = 4\pi R_0^2 P_{\text{Termica}}. \quad (5.20)$$

Donde P_{Termica} está dada por la ec 5.12.

5.2 Resultados físicos: cálculo de las propiedades físicas

5.2.1 Densidad promedio en la cáscara

Dado que a partir de las observaciones hemos podido determinar el brillo superficial de H α realizando un poco de fotometría como se puede apreciar previamente y además como tenemos el camino de la línea de visión en la cáscara chocada ($\Delta\zeta$), dada por la Ec. 5.11, hemos determinado la densidad de núcleos de Hidrógenos (n) usando la ecuación 5.9, específicamente en esta región (en la cáscara) para los diferentes objetos LL y los choques de los proplyds. Hay que subrayar que hemos usado cómo distancia a la Nebulosa de Orión 436 Pc para hacer las respectivas conversiones de unidades.

En la figura 5.4 se logra apreciar que los objetos que están más cercas de las estrellas masivas del Trapecio, presentan una densidad electrónica mayor que los que se encuentran a las afueras de la nebulosa, entonces estas altas densidades electrónicas provocan que el brillo superficial, generado a partir de la emisión de la líneas de recombinación de H α sea

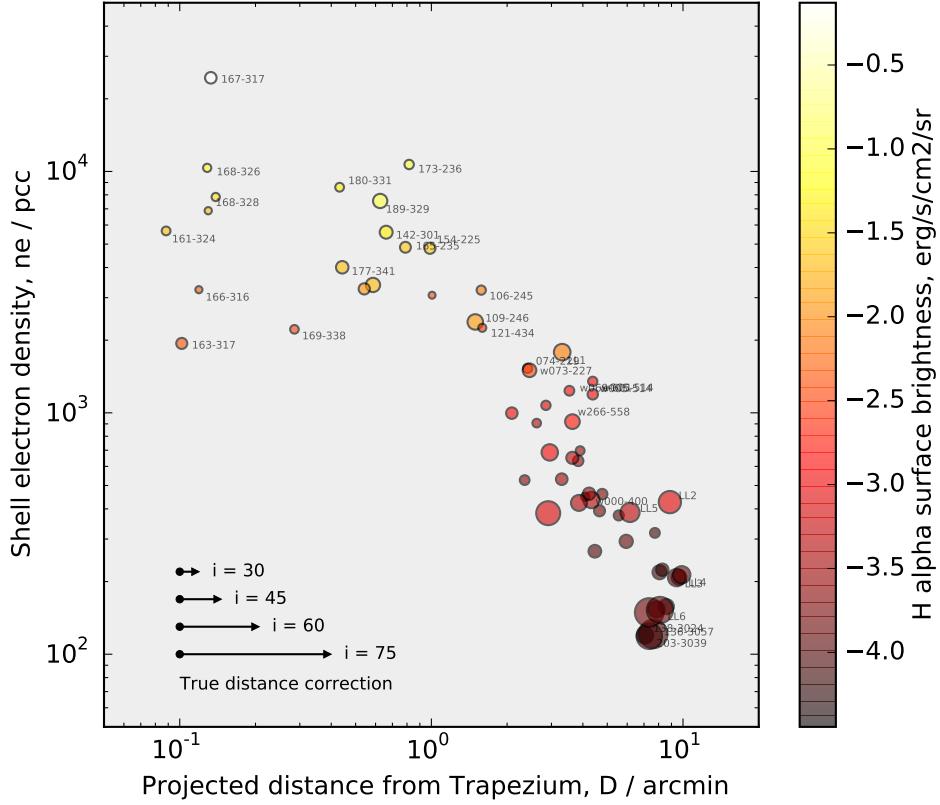


Figura 5.4: Densidad electrónica corregida por extinción en función de la distancia proyectada a θ^1 Ori C, obtenida a partir de las observaciones de Bally, es decir usando el brillo superficial de $\text{H}\alpha$ en la cáscara chocada para determinarla. El tamaño de los puntos indica que tan grande es el camino de visión en la zona chocada si los comparamos entre si. Las flechas en la parte superior izquierda representan la distancia corregida de los arcos de emisión a θ^1 Ori C, para los ángulos de inclinación; $i = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Por otro lado la escala de colores representa el brillo superficial de los objetos en unidades de $[\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$.

mayor en las proximidades de θ^1 Ori C. Y es que en esta región domina la emisión de H α , es decir hay poca contaminación por las líneas de [N II].

5.2.2 Relación y diferencia entre la presión térmica en la cáscara y la presión hidrodinámica en los vientos

Usando la ecuación 5.12 de §5.1.2 se estimó la presión térmica de la cáscara chocada, a partir de la densidad electrónica estimada en §5.2.1 y suponiendo una temperatura para esa región de 10^4 K.

Por otro lado usando la Ec. 5.17 de la misma sección determinamos la presión hidrodinámica ejercida para cada objeto por el viento estelar hipersónico de la estrella másiva θ^1 Ori C del Trapecio (usando la distancia D del objeto en cuestión a θ^1 Ori C), para una cierta tasa de pérdida de masa de $\dot{M} = 3.5 \times 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ y una velocidad de $v = 1200 \text{ km s}^{-1}$.

Ahora bien, la figura 5.5 es el resultado de tales estimaciones. En ella estamos comparando las presiones en las cáscaras chocadas de los objetos LL y de los proplyds (símbolos de colores en la gráfica), con la presión ram generada por el viento estelar (líneas continuas y discontinuas de color negro en la gráfica). Se observa que la presión térmica es mayor en los objetos, que están dentro de la nebulosa, es decir en los proplyds conocidos, a su vez esta coincide con la presión ram del flujo de la estrella masiva, indicando que los choques de los proplyds en el interior están confinados por el hipersónico viento estelar, es posible argumentar esto considerando el equilibrio de presiones (ver Ec. 5.19). Lo contrario sucede con los arcos hiperbólicos en las afueras de la nebulosa, puesto que la presión en la zona chocada no coincide con la presión del viento estelar, por tanto esto nos lleva a pensar que estos objetos no están interactuando con el viento estelar, sino más bien con el transónico flujo de champaña fotoevaporado proveniente del núcleo de la nebulosa.

5.2.3 Flujo de momento interno: $\dot{M}_w \mathbf{V}_w$

Hemos determinado el flujo de momento interno para los objetos de nuestro catálogo a partir de las presiones de estancamiento, presiones con las cuales se obtuvo la ecuación 5.20, con esta ecuación fue posible determinar el ya mencionado flujo de momento, en este orden de ideas se utilizaron los valores de la presión térmica determinados arriba, junto con los valores de los radios R_0 internos de los choques LL para este fin. Así que en la figura 5.6 se ilustran dichos resultados.

No obstante, en la figura 5.6 se logra apreciar que para los objetos clasificados como proplyds en nuestro catálogo (símbolos de color rojo) y que están a cortas distancias del Trapecio presentan grandes pérdida de masa, es decir muestran fuertes vientos, esto es debido probablemente a un incremento en el tamaño de sus discos. Ahora bien, en los proplyds y supuestos proplyds (símbolos de color naranja) ubicados en las regiones externas de la nebulosa, se observa una disminución del parámetro $\dot{M}_w V_w$. Esto es debido a que el flujo de fotones FUV (ultravioletas lejano), responsables directo de la destrucción inevitable de los discos de acreción, decrecen con la distancia a la estrella masiva θ^1 Ori C. Por último, para el caso de los objetos que no son proplyds (símbolos de color negro) situados en las regiones externas de la nebulosa, se observa que tienden a tener fuertes vientos. Aún no sabemos a qué se debe este fenómeno.

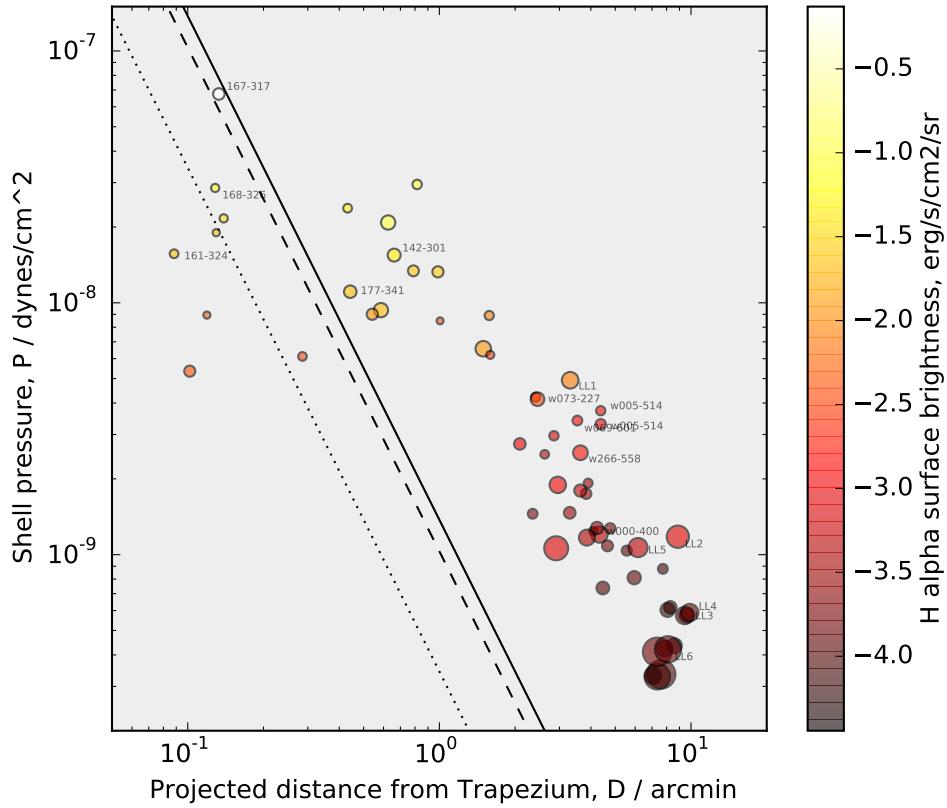


Figura 5.5: Los símbolos indican la presión térmica en la cáscara chocada y las líneas representan la presión hidrodinámica generada por el viento estelar, ambas en unidades de $[dynas\ cm^{-2}]$, en función de la distancia proyectada a θ^1 Ori C. La línea continua representa la presión ram del viento estelar en función de la distancia suponiendo que no hay inclinación, esto es para $i = 0^\circ$, la línea discontinua representa la misma presión ram para una distancia proyectada cuando se cambia el ángulo de inclinación desde la distancia ($i = 0^\circ$), es decir para un ángulo de inclinación de $i = 30^\circ$ y la línea de puntos también representa la presión ram para una distancia proyectada con un ángulo de inclinación de $i = 60^\circ$. La escala de colores indica el brillo superficial de $H\alpha$.

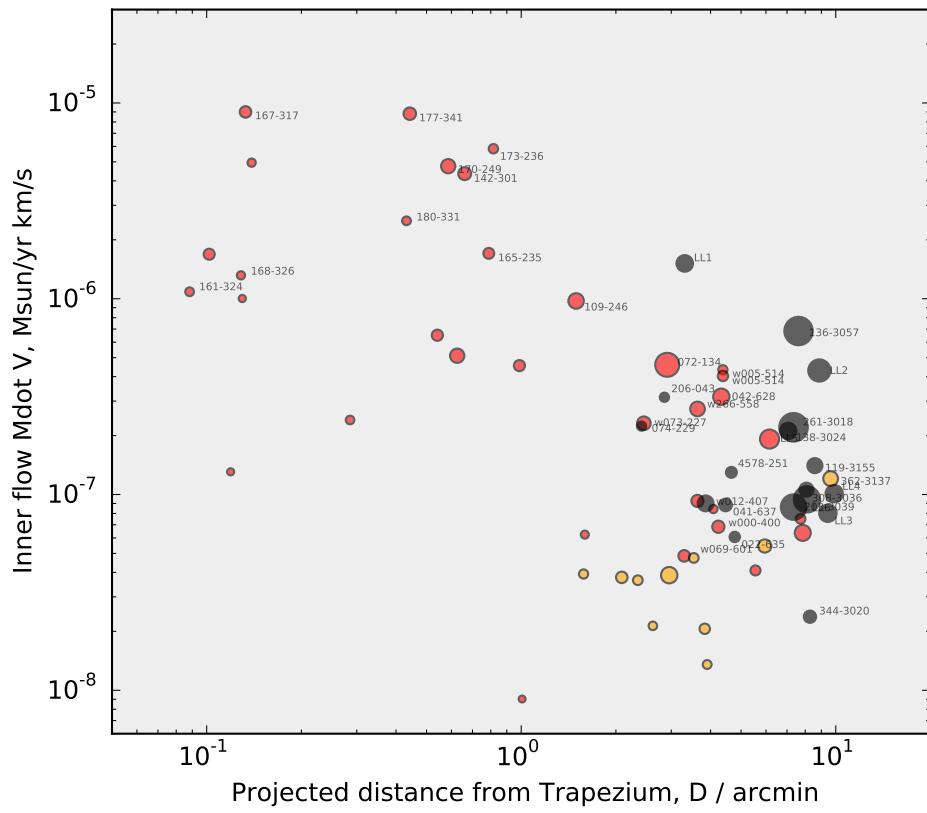


Figura 5.6: Flujo de momento interno en función de la distancia proyectada. El color de los símbolos indican: Rojo; son verdaderos proplyds, naranja; podrían tratarse de proplyds. Negro; no son proplyds. El tamaño de los simbolos representan el tamaño de la línea de visión ($\Delta\zeta$) en la cáscara chocada.

Capítulo 6

Conclusiones

En la parte observacional, hemos realizado un catálogo muy completo con un total de 73 objetos (ver figura 4.7), los cuales hemos clasificado como arcos de emisión estacionarios (objetos LL y choques de proa asociados a proplyds), detectados en unas imágenes en el óptico del *HST* de la Nebulosa de Orión. De esos 73 objetos 20 no han sido reportados previamente en la literatura. Encontramos que los choques de proa están distribuidos en casi toda la nebulosa, esto es que hay cierta cantidad de estos choques de proa asociados a proplyds que habitan en las regiones internas de la nebulosa, un grupo de choques de proa se sitúan en el oeste de la nebulosa a más menos 640 arcsec de separación del Trapecio y un último grupo de los cuales todos son objetos LL, es decir arcos de emisión sin supuestos proplyds están situados en el sur de la nebulosa a grandes distancias de θ^1 Ori C.

Por otro lado, ajustando círculos en los límites externos e internos de la cáscara chocada, hemos podido clasificar la forma de los choques de proa en dos grupos, puesto que hemos encontrado diferencias muy significativas entre los objetos ubicados cerca de la estrella ionizadora y los que se encuentra a más grandes distancias. Entonces un primer grupo cercano, el cual corresponde a la interacción del viento estelar hipersónico con el viento de gas ionizado de los proplyds (todos los objetos en el interior de la nebulosa son proplyds), muestran que sus choques tienen forma relativamente cerrada, esto probablemente se deba a que los vientos de los proplyds no son isotrópicos, mientras un segundo grupo en el que sus miembros se sitúan en regiones más lejanas del Trapecio. Sus arcos muestran formas más abiertas e hiperbólicas, dado que a grandes distancias de θ^1 Ori C, es decir en las afueras de la nebulosa, la población de estrellas que domina son las estrellas T-Tauri con sus respectivos discos de acreción, los cuales producen un viento isotrópico. Entonces esto podría explicar en parte la forma abierta de sus arcos.

Usando los ajustes hecho a las formas de los arcos en las imágenes, medimos el brillo superficial de H α en la cáscara chocada corregido por el fondo, encontrando que en el interior de la nebulosa las líneas de [N II] son casi inexistentes. Por otro lado basandonos en las orientaciones de los choques de proa hemos llegado a la conclusión, de que el flujo proveniente del núcleo de la nebulosa es aproximadamente radial, indicando por tanto que el flujo en estas regiones no es turbulento ni desordenado.

De los resultados astrofísicos, hemos aprendido que los choques de proa de los proplyds conocidos, en el interior de la Nebulosa de Orión están confinados por el viento de la estrella masiva θ^1 Ori C, puesto que esta estrella es la que domina la emisión en esa región de la nebulosa, mientras que en las afueras de la nebulosa hemos establecido que el flujo de las estrella T-Tauri o de los proplyds, interacciona con el transónico flujo de champaña de gas ionizado, provocando que en estas regiones el borde externo de la cáscara chocada sea más brillante, explicando el por qué, los arcos son más abiertos en esta región. No obstante hemos

llegado a estas conclusiones utilizando la idea de que los choque de proa son estacionarios, esto es considerando un equilibrio entre las presiones hidrodinámicas de los flujos y la presión térmica de la cáscara chocada.

Con las presiones de estancamiento fue posible determinar el flujo de momento de los vientos internos (esto es de los proplyds u objetos LL dependiendo de cual sea el caso), en el que hemos encontrado que los objetos en el interior de la Nebulosa de Orión, es decir de proplyds conocidos como se ha dicho anteriormente presentan grandes pérdida de masa, una explicación para esto sería que los discos en las cercanías de la estrella ionizadora tienen grandes tamaños. Ahora, se observa que la tasa de pérdida de masa decrece secuencialmente con la distancia, para aquellos objetos en las regiones externas de la nebulosa, identificados como proplyds y supuestos proplyds. Finalmente las fuentes en las regiones más distantes del Trapecio, los cuales hemos clasificado como no proplyds en las afueras de la nebulosa, presenten fuertes vientos estelares, lo cual implica que el tamaño de sus discos están jugando un papel importante.

Por último es importante mencionar de acuerdo a todos los resultados obtenidos y las conclusiones planteadas anteriormente, que nuestros arcos de emisión están divididos en dos grandes grupos. Un grupo cercano en el interior de la de la nebulosa en el que la fuente son proplyds ya conocidos, en el que el flujo interno tiene su origen en el frente de ionización y un grupo lejano formado por proplyds confirmados y por muchos objetos que no lo son. En este los más grandes y brillantes arcos tienden a estar asociados con estrellas jóvenes particularmente luminosas, lo que nos lleva pensar que los vientos intrínsecos de los discos de acreción de las estrellas T-Tauri son muy importantes como mecanismo que moldean choques de proa por la interacción con el flujo de champaña fotoevaporado del núcleo de la nebulosa.

Bibliografía

- Arthur, S. J., Henney, W. J., Meléma, G., de Colle, F., & Vázquez-Semadeni, E. 2011, MNRAS, 414, 1747
- Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Martin, P. G., Corbin, M. R., Cota, S. A., Peterson, B. M., & Slettebak, A. 1991, ApJ, 374, 580
- Bally, J. 2008, Overview of the Orion Complex, ed. B. Reipurth, 459
- Bally, J., Langer, W. D., Stark, A. A., & Wilson, R. W. 1987, ApJ, 312, L45
- Bally, J., Licht, D., Smith, N., & Walawender, J. 2006, AJ, 131, 473
- Bally, J., O'Dell, C. R., & McCaughrean, M. J. 2000, AJ, 119, 2919
- Bally, J., & Reipurth, B. 2001, ApJ, 546, 299
- Bally, J., Sutherland, R. S., Devine, D., & Johnstone, D. 1998, AJ, 116, 293
- Blaauw, A. 1991, in NATO ASIC Proc. 342: The Physics of Star Formation and Early Stellar Evolution, ed. C. J. Lada & N. D. Kylafis, 125
- Blagrave, K. P. M., Martin, P. G., Rubin, R. H., Dufour, R. J., Baldwin, J. A., Hester, J. J., & Walter, D. K. 2007, ApJ, 655, 299
- Brown, A. G. A., de Geus, E. J., & de Zeeuw, P. T. 1994, A&A, 289, 101
- Burrows, C. J. 1995, Hubble space telescope : wide field and planetary camera 2 instrument handbook
- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. 1996, An Introduction to Modern Astrophysics
- Churchwell, E., Felli, M., Wood, D. O. S., & Massi, M. 1987, ApJ, 321, 516
- Costero, R., & Peimbert, M. 1970, Boletin de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya, 5, 229
- de La Fuente, E., Rosado, M., Arias, L., & Ambrocio-Cruz, P. 2003, in Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series, Vol. 18, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series, ed. M. Reyes-Ruiz & E. Vázquez-Semadeni, 21–23
- Dyson, J. E. 1968, Ap&SS, 1, 388
- Ercolano, B., Dale, J. E., Gritschneider, M., & Westmoquette, M. 2012, MNRAS, 420, 141
- Garay, G., Moran, J. M., & Reid, M. J. 1987, ApJ, 314, 535
- García-Arredondo, F., Henney, W. J., & Arthur, S. J. 2001, ApJ, 561, 830
- Gies, D. R. 1987, ApJS, 64, 545

- Gies, D. R., & Bolton, C. T. 1986, ApJS, 61, 419
- Gualandris, A., Portegies Zwart, S., & Eggleton, P. P. 2004, MNRAS, 350, 615
- Gull, T. R., & Sofia, S. 1979, ApJ, 230, 782
- Hayward, T. L., Houck, J. R., & Miles, J. W. 1994, ApJ, 433, 157
- Henney, W. J. 2002, Rev. Mexicana Astron. Astrofis., 38, 71
- Henney, W. J., & Arthur, S. J. 1998, AJ, 116, 322
- Henney, W. J., Arthur, S. J., & García-Díaz, M. T. 2005, ApJ, 627, 813
- Henney, W. J., García-Díaz, M. T., O'Dell, C. R., & Rubin, R. H. 2013, MNRAS, 428, 691
- Henney, W. J., Meaburn, J., & Garrington, S. T. 2002, in Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, Vol. 13, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, ed. W. J. Henney, W. Steffen, L. Binette, & A. Raga, 59–65
- Henney, W. J., Meaburn, J., Raga, A. C., & Massey, R. 1997, A&A, 324, 656
- Henney, W. J., & O'Dell, C. R. 1999, AJ, 118, 2350
- Hillenbrand, L. A. 1997, AJ, 113, 1733
- Holtzman, J. A., et al. 1995, PASP, 107, 156
- Hoogerwerf, R., de Bruijne, J. H. J., & de Zeeuw, P. T. 2001, A&A, 365, 49
- Johnstone, D., & Bally, J. 1999, ApJ, 510, L49
- Johnstone, D., Hollenbach, D., & Bally, J. 1998, ApJ, 499, 758
- Laques, P., & Vidal, J. L. 1979, A&A, 73, 97
- McMaster, M., & et al. 2008, Wide Field and Planetary Camera 2 Instrument Handbook v. 10.0
- Mellema, G., Arthur, S. J., Henney, W. J., Iliev, I. T., & Shapiro, P. R. 2006, ApJ, 647, 397
- Muench, A., Getman, K., Hillenbrand, L., & Preibisch, T. 2008, Star Formation in the Orion Nebula I: Stellar Content, ed. B. Reipurth, 483
- O'Dell, C. R. 2009, PASP, 121, 428
- O'Dell, C. R., & Henney, W. J. 2008, AJ, 136, 1566
- O'Dell, C. R., Muench, A., Smith, N., & Zapata, L. 2008, Star Formation in the Orion Nebula II: Gas, Dust, Proplyds and Outflows, ed. B. Reipurth, 544
- O'dell, C. R., & Wen, Z. 1994, ApJ, 436, 194
- O'dell, C. R., Wen, Z., & Hu, X. 1993, ApJ, 410, 696
- O'dell, C. R., & Wong, K. 1996, AJ, 111, 846
- Osterbrock, D. E. 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei
- Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. 2006, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei
- Peimbert, M., & Torres-Peimbert, S. 1977, MNRAS, 179, 217

- Reipurth, B., Guimarães, M. M., Connelley, M. S., & Bally, J. 2007, AJ, 134, 2272
- Ricci, L., Robberto, M., & Soderblom, D. R. 2008, AJ, 136, 2136
- Robberto, M., et al. 2005, AJ, 129, 1534
- . 2013, ApJS, 207, 10
- Shull, J. M., & Saken, J. M. 1995, ApJ, 444, 663
- Smith, N., Bally, J., Shuping, R. Y., Morris, M., & Kassis, M. 2005, AJ, 130, 1763
- Vasconcelos, M. J., Cerqueira, A. H., Plana, H., Raga, A. C., & Morisset, C. 2005, AJ, 130, 1707