



UN CATÁLOGO DE CHOQUES DE PROA ESTACIONARIOS EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

Tesis de maestría presentada por
Luis Ángel Gutiérrez Soto

Dirigida por:
Dr. William Henney

Centro de Radioastronomía y Astrofísica
Universidad Nacional Autónoma de México, 2015



UN CATÁLOGO DE CHOQUES DE PROA ESTACIONARIOS EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

En esta tesis presentamos un catálogo completo de todos los arcos estacionarios radiativos asociados a estrellas jóvenes (T Tauri) o sus discos en la nebulosa de Orión.



UN CATÁLOGO DE CHOQUES DE PROA ESTACIONARIOS EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

En esta tesis presentamos un catálogo completo de todos los arcos estacionarios radiativos asociados a estrellas jóvenes (T Tauri) o sus discos en la nebulosa de Orión.

Estos arcos se interpretan como el resultado de una interacción supersónica entre dos flujos: el primero es un flujo interno que proviene de una estrella joven, mientras que el segundo es un flujo externo que proviene de su ambiente dentro de la región fotoionizada, el cual está dominado por las estrellas masivas del Trapecio.



UN CATÁLOGO DE CHOQUES DE PROA ESTACIONARIOS EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

En esta tesis presentamos un catálogo completo de todos los arcos estacionarios radiativos asociados a estrellas jóvenes (T Tauri) o sus discos en la nebulosa de Orión.

Estos arcos se interpretan como el resultado de una interacción supersónica entre dos flujos: el primero es un flujo interno que proviene de una estrella joven, mientras que el segundo es un flujo externo que proviene de su ambiente dentro de la región fotoionizada, el cual está dominado por las estrellas masivas del Trapecio.

El objetivo principal de este trabajo consiste en proporcionar los datos empíricos para poder investigar la naturaleza de estos flujos.

CONTENIDO

1. Introducción
2. Descripción de las observaciones empleadas
3. Metodología observacional
4. Resultados empíricos
5. Resultados Astrofísicos
6. Conclusiones y trabajo a futuro

ORIÓN Y LA FORMACIÓN ESTELAR



Orión es la región de formación estelar más estudiada. Las estrellas jóvenes y el gas brindan pistas sobre:

ORIÓN Y LA FORMACIÓN ESTELAR



Orión es la región de formación estelar más estudiada. Las estrellas jóvenes y el gas brindan pistas sobre:

- La física de la formación estelar.

ORIÓN Y LA FORMACIÓN ESTELAR



Orión es la región de formación estelar más estudiada. Las estrellas jóvenes y el gas brindan pistas sobre:

- La física de la formación estelar.
- La dinámica del medio interestelar.

ORIÓN Y LA FORMACIÓN ESTELAR



Orión es la región de formación estelar más estudiada. Las estrellas jóvenes y el gas brindan pistas sobre:

- La física de la formación estelar.
- La dinámica del medio interestelar.
- El papel de las estrellas masivas en la formación estelar.

ORIÓN Y LA FORMACIÓN ESTELAR



Orión es la región de formación estelar más estudiada. Las estrellas jóvenes y el gas brindan pistas sobre:

- La física de la formación estelar.
- La dinámica del medio interestelar.
- El papel de las estrellas masivas en la formación estelar.

Es la más cercana ($d = 436 \pm 20$ pc)

PROPLYDS Y SU RELACIÓN CON UNA ESTRELLA MASIVA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

Un proplyd es un disco protoplanetario que rodea una estrella de baja masa pre secuencia principal...

HST 10
(182-413)

Imagen tomada de Bally et al. (1998)

PROPLYDS Y SU RELACIÓN CON UNA ESTRELLA MASIVA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

Un prolyd es un disco protoplanetario que rodea una estrella de baja masa pre secuencia principal...

Que está siendo fotoevaporado por la radiación ultravioleta (UV), de una estrella masiva cercana (θ^1 Ori C).

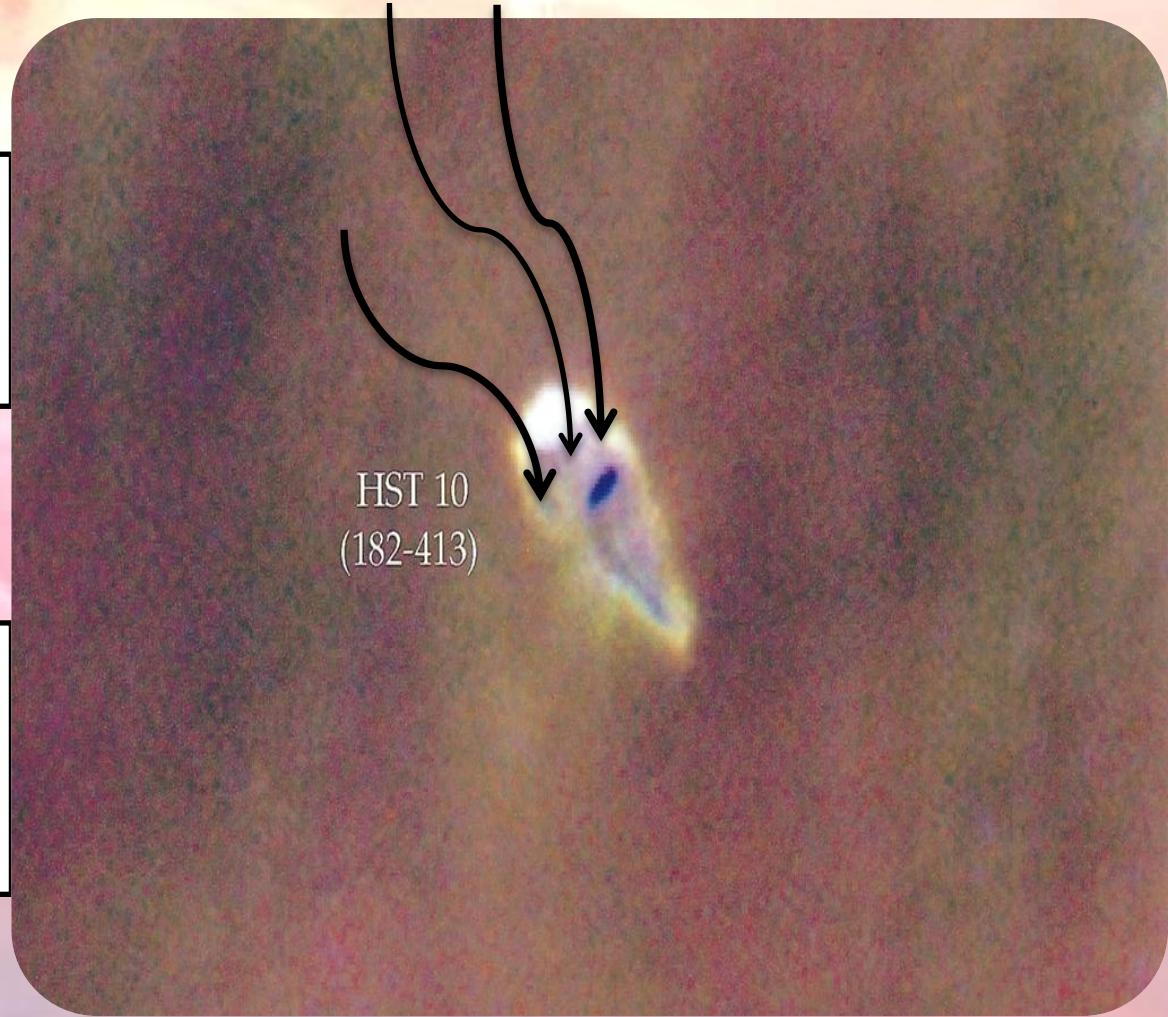
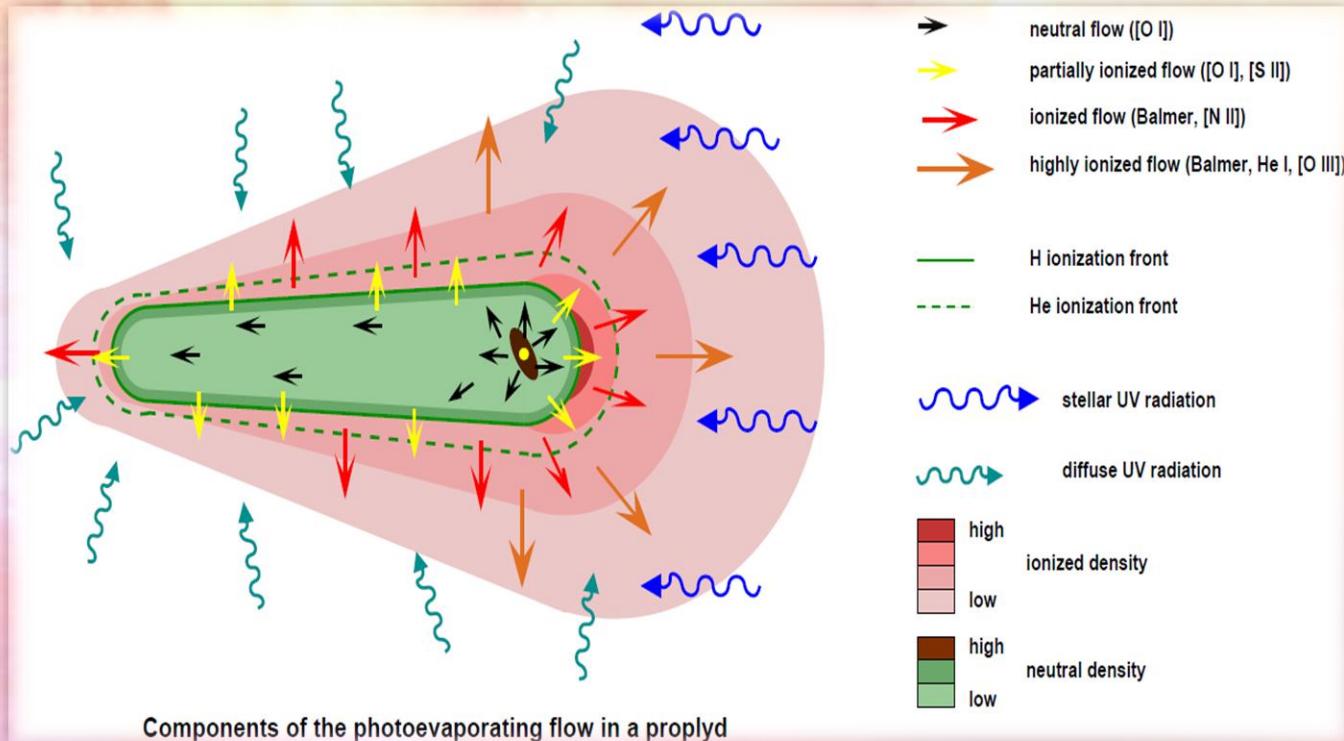


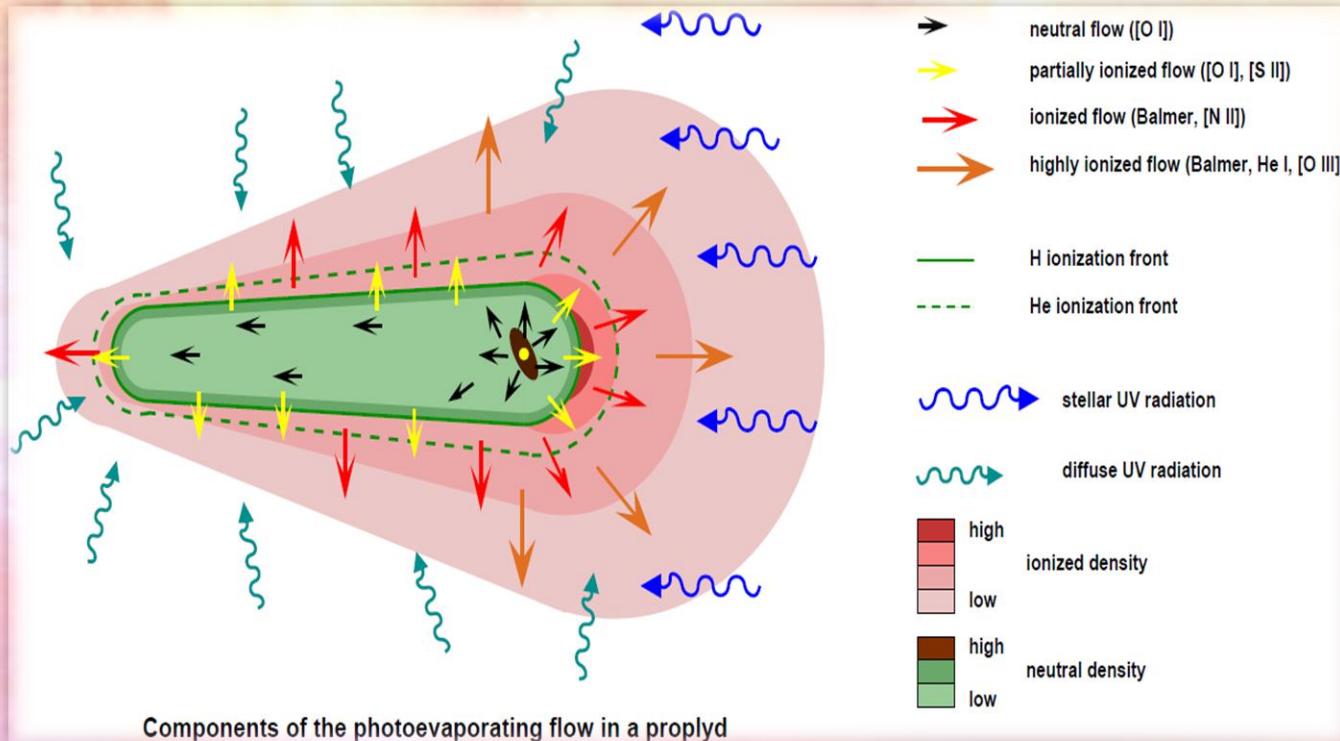
Imagen tomada de Bally et al. (1998)

PROPLYDS Y SU RELACIÓN CON UNA ESTRELLA MASIVA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN



- Esta radiación UV al evaporar el disco genera un flujo de material neutro que posteriormente es ionizado.

PROPLYDS Y SU RELACIÓN CON UNA ESTRELLA MASIVA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN



- Esta radiación UV al evaporar el disco genera un flujo de material neutro que posteriormente es ionizado.

El viento formado por el material fotoevaporado del proplyd interacciona con el viento estelar de la estrella masiva formando un choque de proa estacionario (Henney & O'Dell, 1999).

CHOQUES DE PROA ASOCIADOS A PROPLYDS

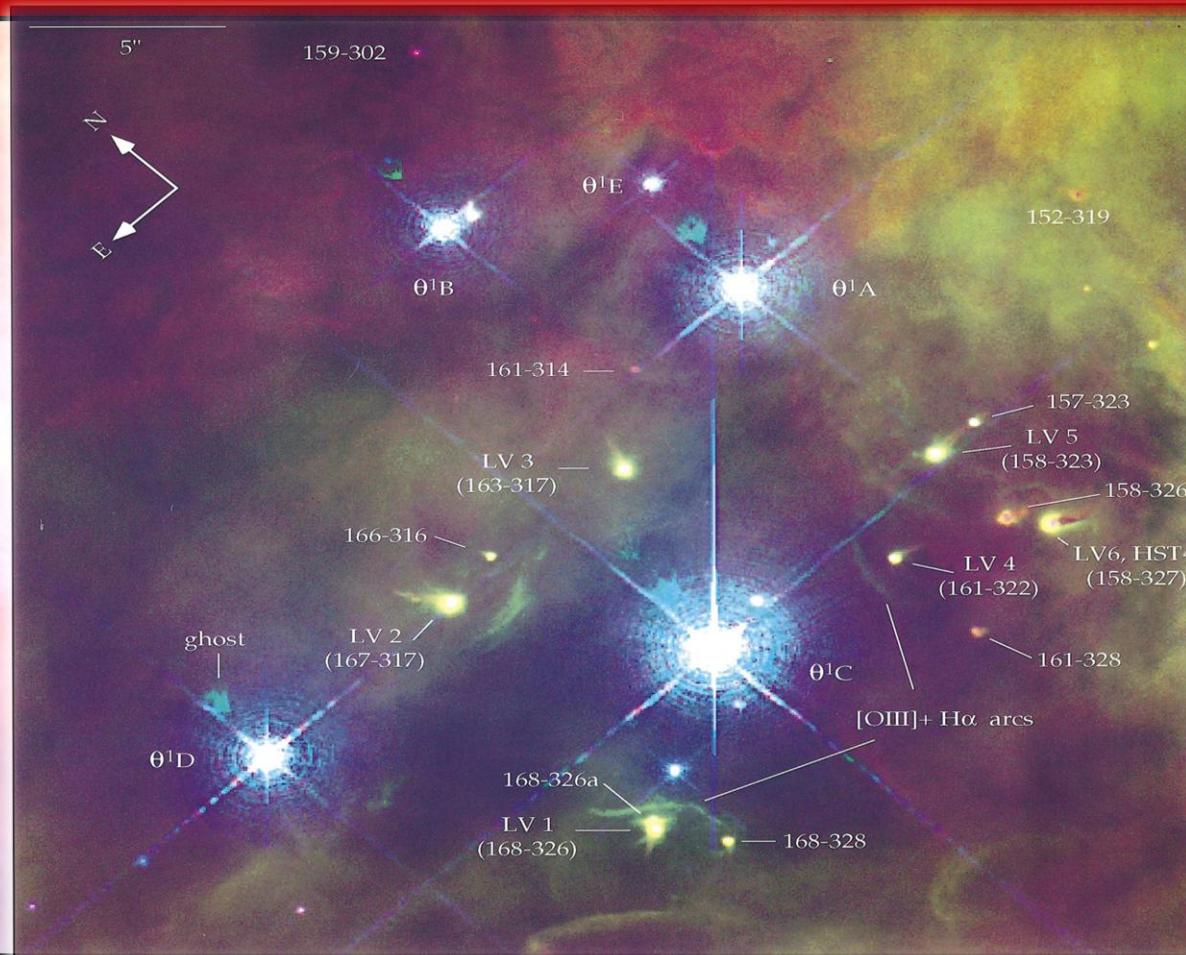
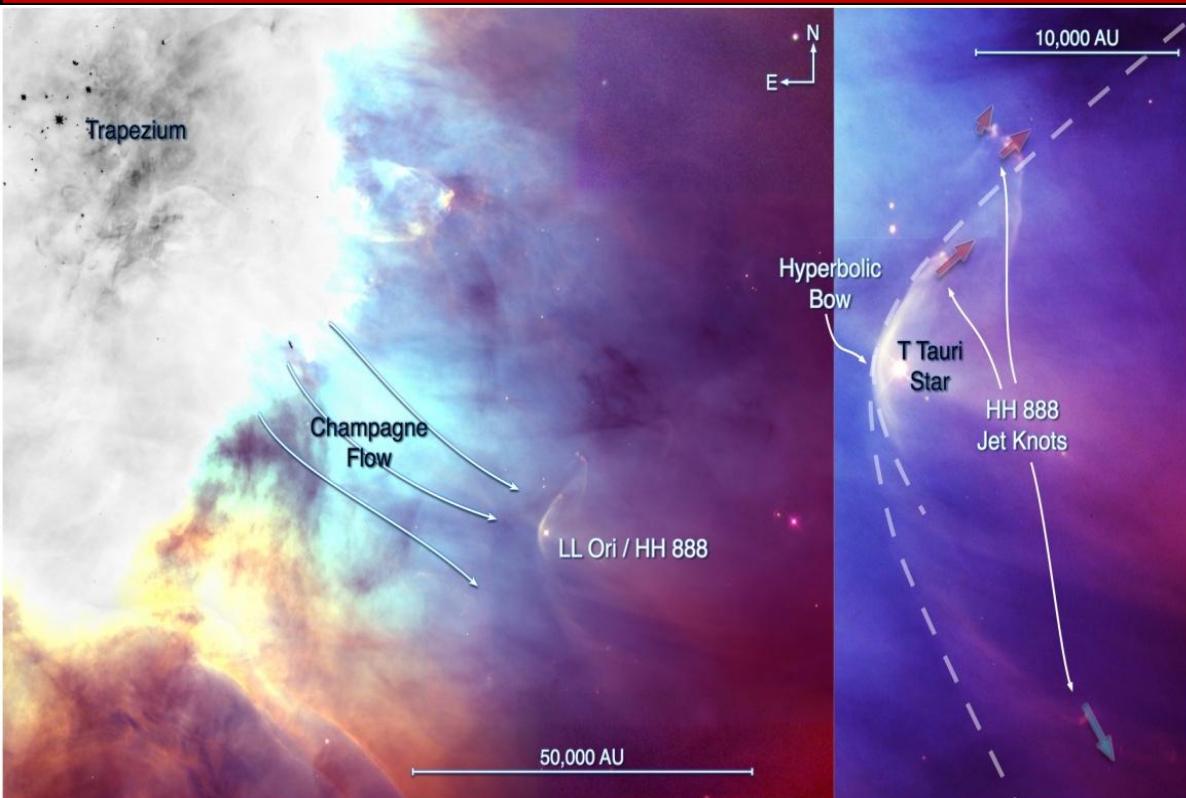
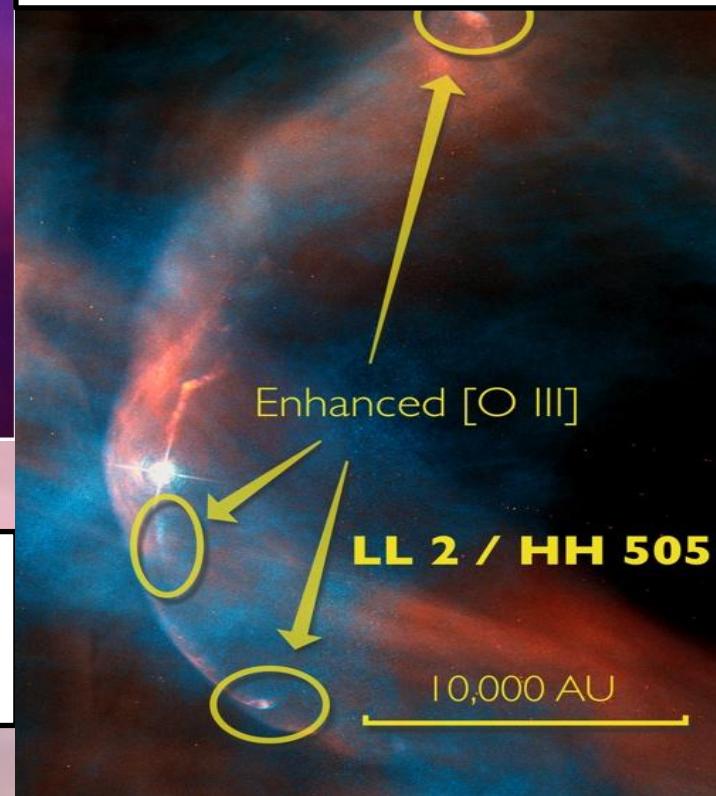


Figura : es una región de la Nebulosa de Orión centrada en el Trapecio, que contiene los primeros objetos descubiertos por Laques & Vidal (1979). Los objetos tienen arcos radiativos en dirección a θ¹ Ori C. Imagen tomada de Bally et al. (1998).

MÁS SOBRE LOS CHOQUES DE PROA: OBJETOS LL



Los típicos objetos LL orionis son arcos hiperbólicos alrededor de estrellas jóvenes situadas en el exterior de la Nebulosa de Orión.



El prototipo de estos objetos es la estrella T Tauri LL Ori cuyo arco de emisión fue descubierto hace 36 años (Gull & Sofía, 1979).

MÁS SOBRE LOS CHOQUES DE PROA: OBJETOS LL

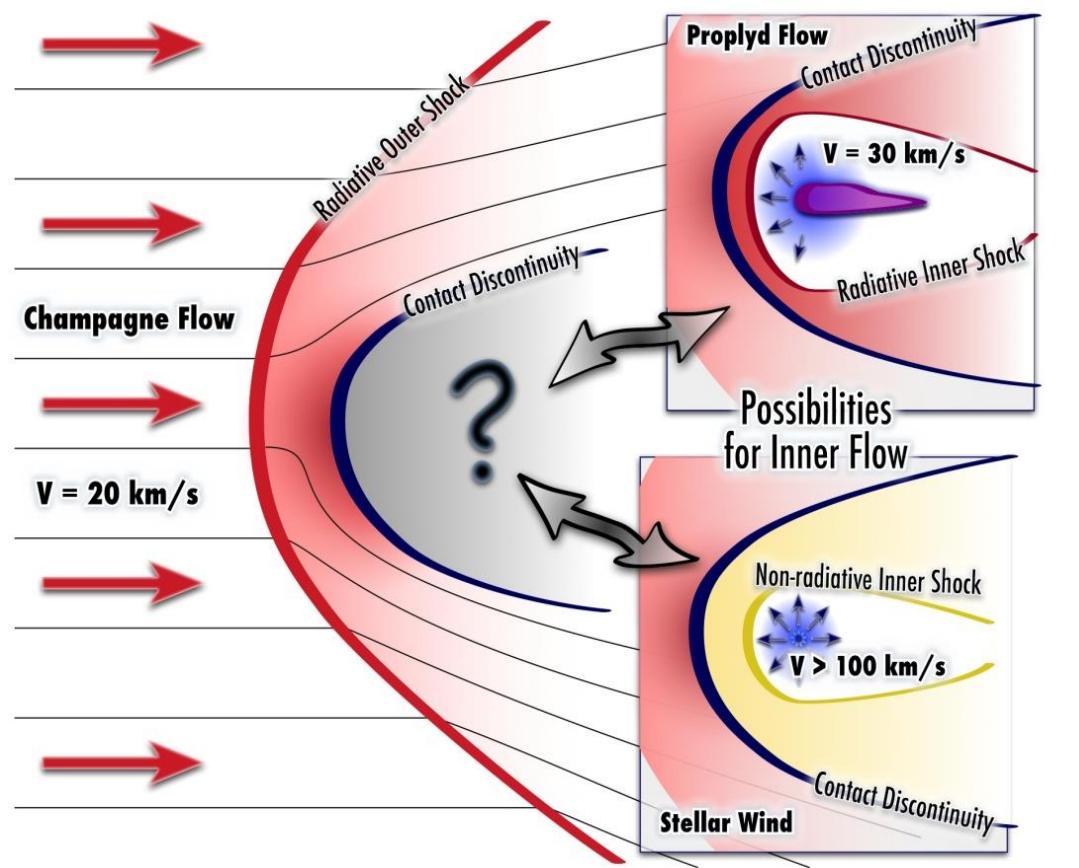


Figura: Esquema general de los objetos LL. El arco se forma cuando un flujo de champaña ligeramente supersónico ($M \approx 2$), choca con un obstáculo. Crédito: William Henney.

MÁS SOBRE LOS CHOQUES DE PROA: OBJETOS LL

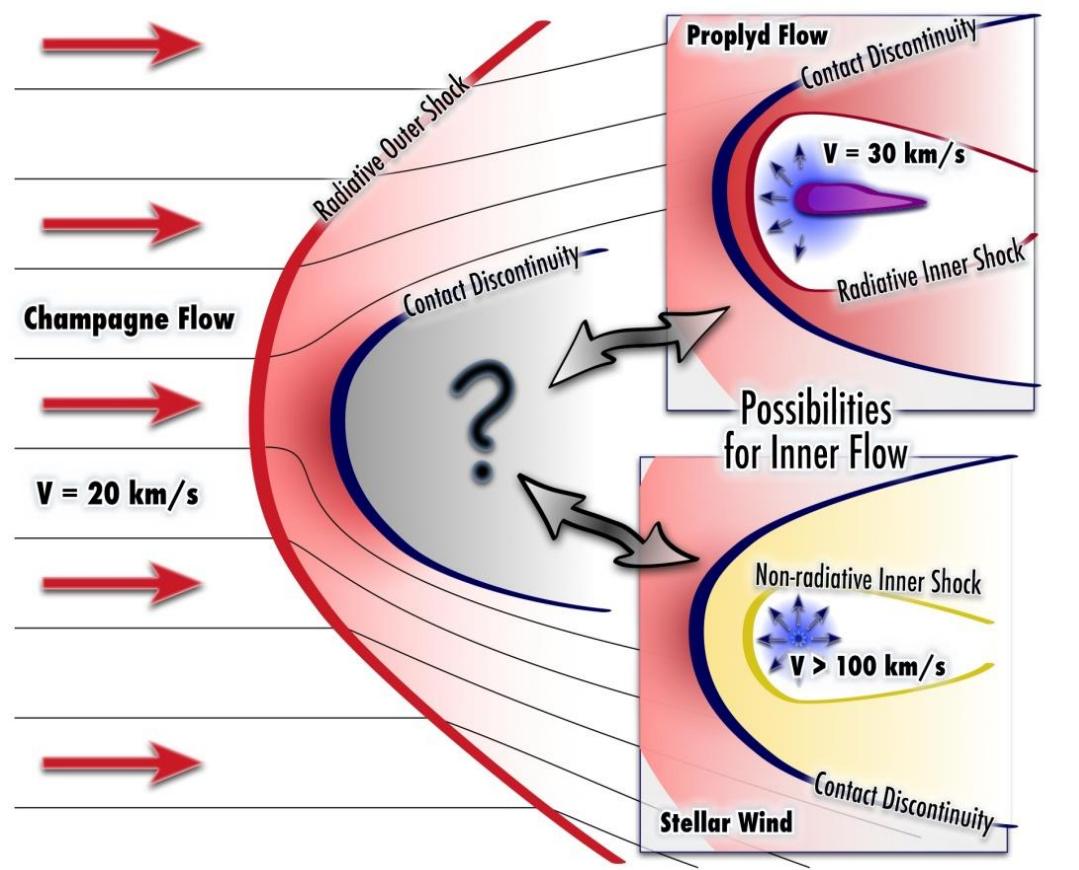
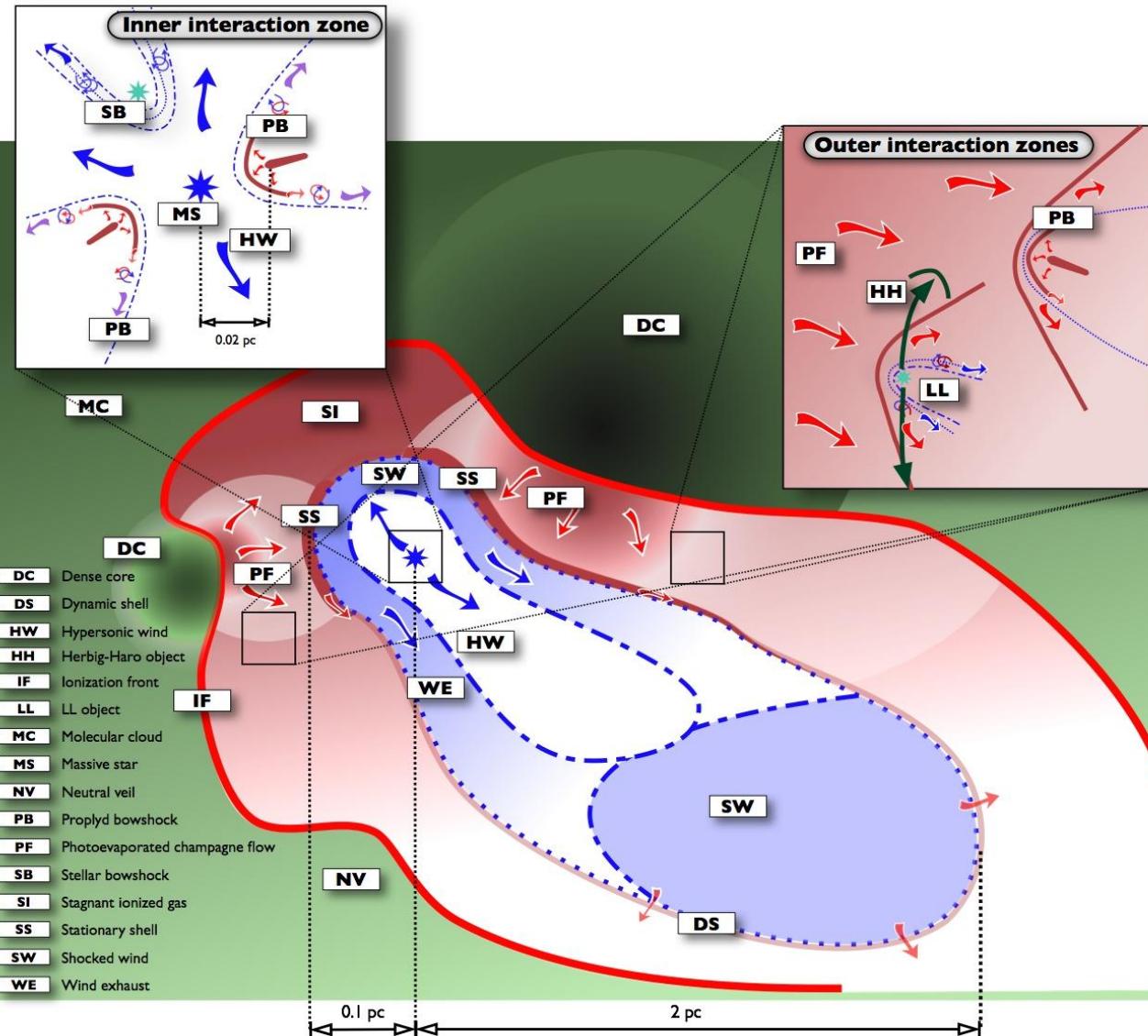


Figura: Esquema general de los objetos LL. El arco se forma cuando un flujo de champaña ligeramente supersónico ($M \approx 2$), choca con un obstáculo. Crédito: William Henney.

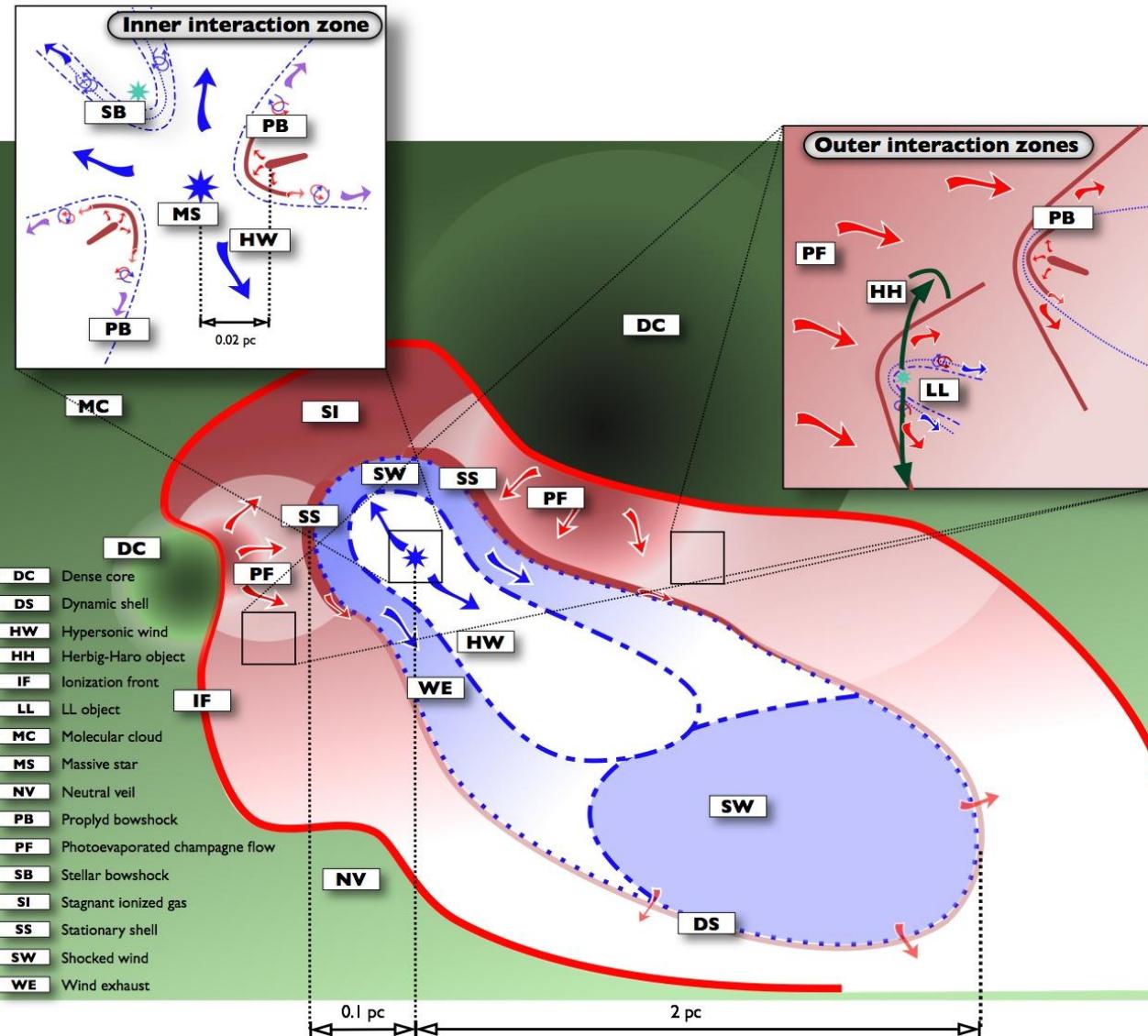
La naturaleza del obstáculo aún no es clara: puede ser el flujo suave de un gas ionizado proveniente del frente de ionización del proplyd o puede ser el viento de una estrella T Tauri.

CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN



- Los choques de proa en la nebulosa son estacionarios. No se les han detectado movimientos propios y muestran pequeñas velocidades radiales.
- La interacción de dos viento provoca que se formen dos choques de proa.

CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN



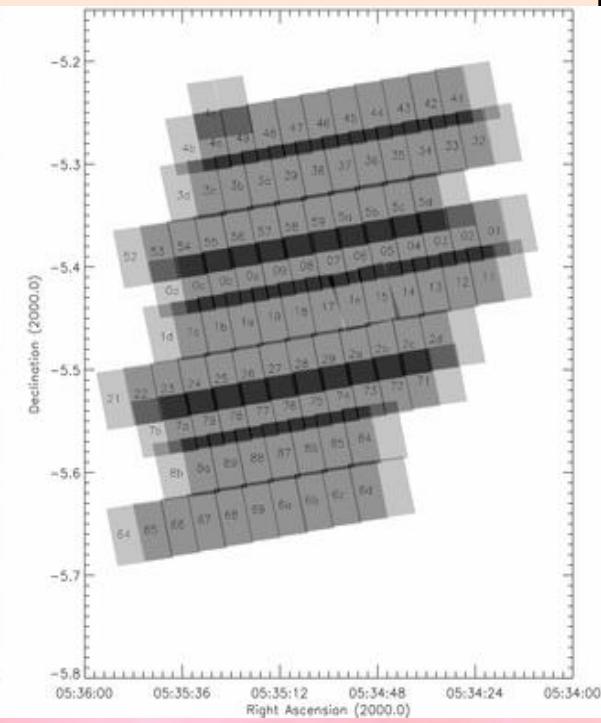
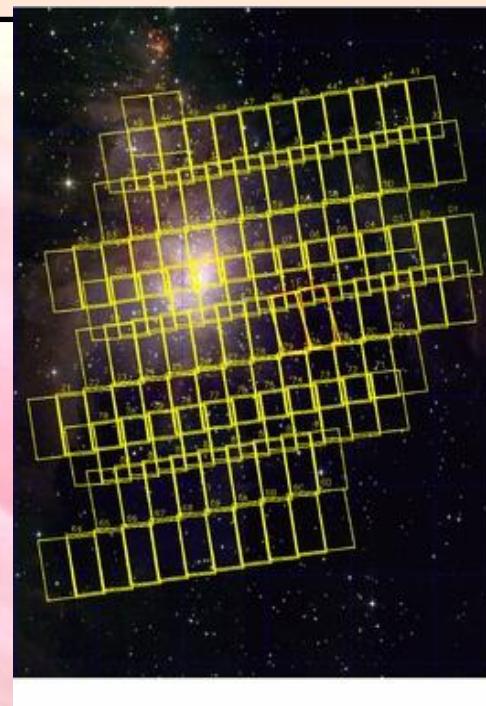
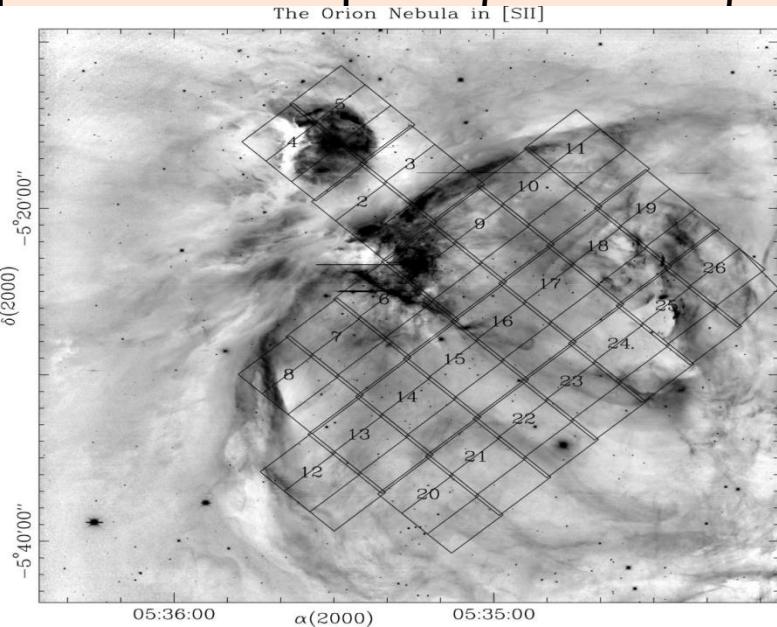
Los choques están divididos en dos grupos:

El primer grupo corresponde a los clásicos choques de los proplyds (Robberto et al., 2005), su choque externo es no radiativo.

El segundo grupo son los típicos arcos LL, su choque externo es radiativo.

JUEGO DE IMÁGENES UTILIZADAS

En las imágenes del Telescopio Espacial Hubble (HST) los choques de proa son más visibles en el óptico que en cualquier banda del espectro.



Cámara ACS (programa GO-9825)
(Bally et al. 2006):

- Son imágenes de Ha+[NII].
- Las imágenes tienen buena señal a ruido.

Desventajas:

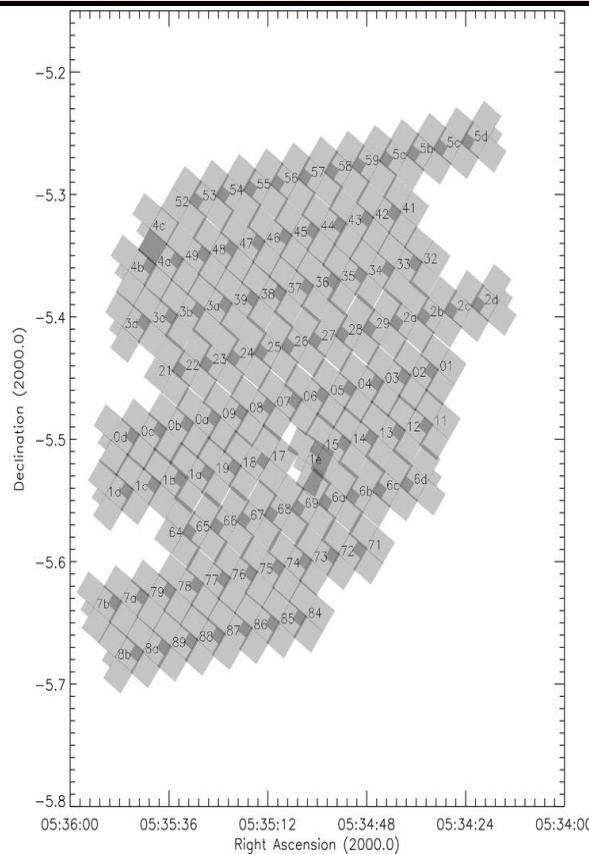
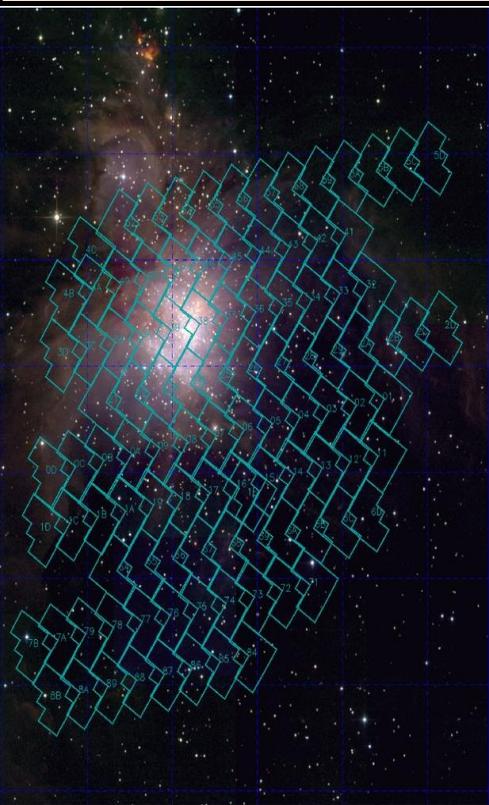
- No tienen cobertura completa de la nebulosa de Orión.
- Contaminación por las líneas de [NII].

Cámara ACS (programa Treasury) (Robberto et al. 2013):

Cobertura completa de la nebulosa de Orión.

JUEGO DE IMÁGENES UTILIZADAS

En las imágenes del Telescopio Espacial Hubble (HST) los choques de proa son más visibles en el óptico que en cualquier banda del espectro.



Cámara WFPC2 (programa Treasury) (Robberto et al. 2013):

- Imágenes de H α con una mínima contaminación de la línea de [NII].
- Cobertura completa.

Desventaja:
La resolución es muy baja.

JUEGO DE IMÁGENES UTILIZADAS

En las imágenes del Telescopio Espacial Hubble (HST) los choques de proa son más visibles en el óptico que en cualquier banda del espectro.

Cuadro 2.1: Observaciones de las cámaras 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

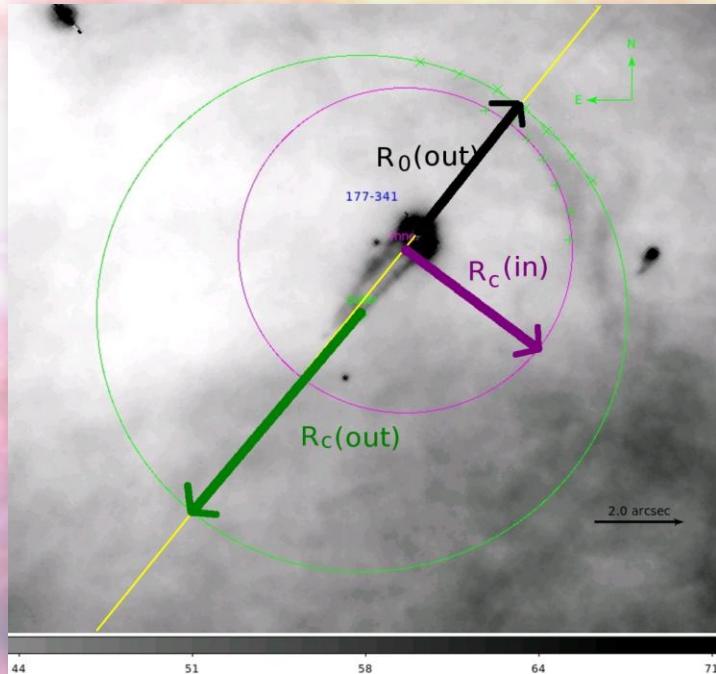
IDENTIFICACIÓN Y BÚSQUEDA DE LOS CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

Se identificaron y buscaron, en las imágenes del HST arcos de emisión ya conocidos. Los detectados y mostrados por:

- Laques & Vidal (1979) .
- Bally et al. (2000)
- Bally & Reipurth (2001).
- Bally et al. (2006).
- Reipurth et al. (2007).
- Ricci et al. (2008).

En nuestra búsqueda encontramos 20 objetos nuevos. El total de objetos detectados es 73.

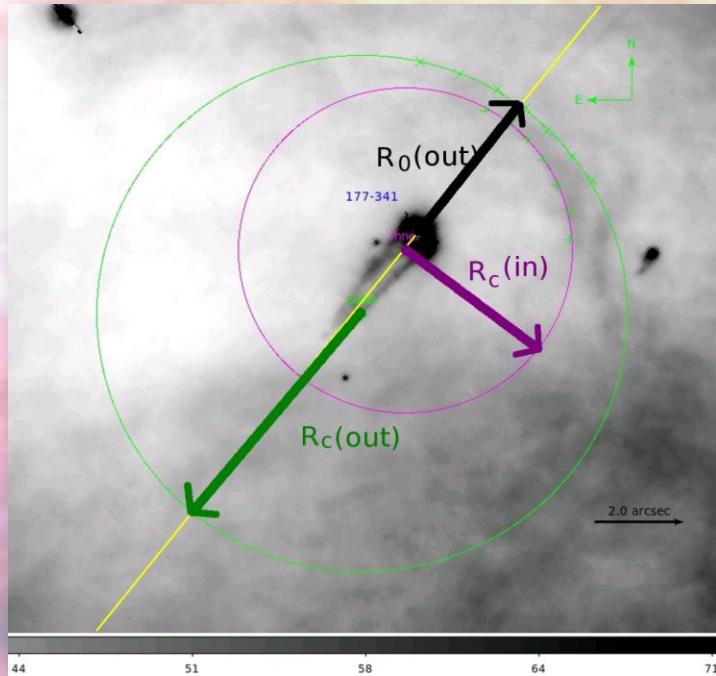
PARÁMETROS OBSERVACIONALES MEDIDOS



De las observaciones se midieron los siguientes parámetros observacionales:

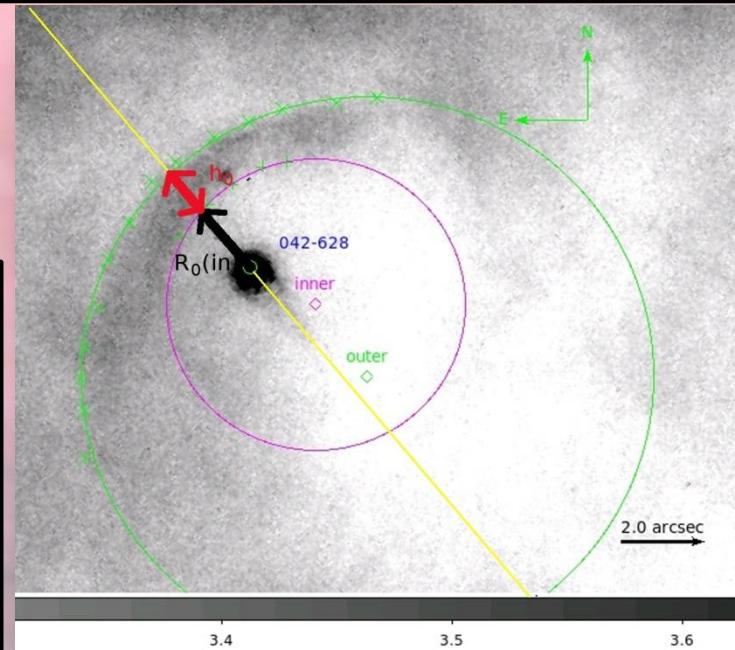
- R_0 Radio del choque a lo largo del eje de simetría.
- R_c Radio de curvatura: es el radio del círculo que se ajusta a los puntos del choque.

PARÁMETROS OBSERVACIONALES MEDIDOS



De las observaciones se midieron los siguientes parámetros observacionales:

- $R_0(\text{out})$ Radio del choque a lo largo del eje de simetría.
- $R_c(\text{out})$ Radio de curvatura: es el radio del círculo que se ajusta a los puntos del choque.



- h_0 Ancho de la cáscara chocada a lo largo del eje de simetría.
- D Distancia proyectada desde la fuente a θ^1 Ori C.
- Se midió el brillo superficial en los diferentes filtros.

CALIBRACIÓN FINAL DEL FLUJO

- Se estimaron las constantes de calibración.

Cuadro 3.1: Valores de los coeficientes de calibración.

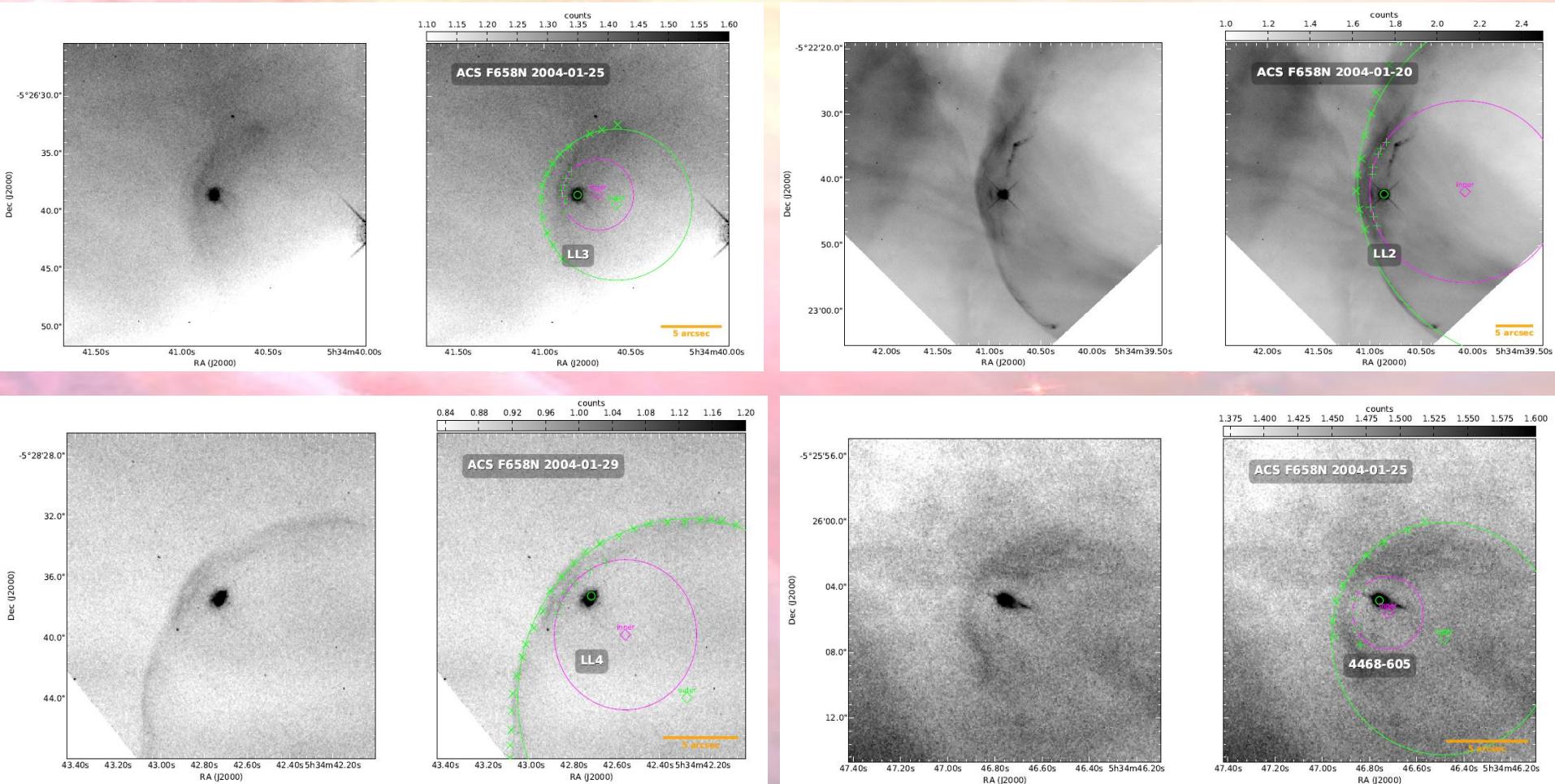
Cámara-filtro	Coeficiente de calibración	Unidades
ACS-F658N (Imágenes de Bally)	0.00250	erg electrones ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F656N (Imágenes de Robberto)	0.16896	erg counts ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F656N (Mosaico)	0.01868	erg counts ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹
WFPC2-F658N (Mosaico)	0.01886	erg counts ⁻¹ cm ⁻² sr ⁻¹

- Se hizo la corrección por extinción, usando la ecuación $F_\lambda = F'_\lambda \times 10^{C_{H\beta}(1+f_\lambda)}$ junto con un mapa de extinción.
- Se estimó el brillo superficial de H α de la cáscara y del fondo nebuloso, corregido por la contaminación de la línea de [NII] .

Resultados Empíricos

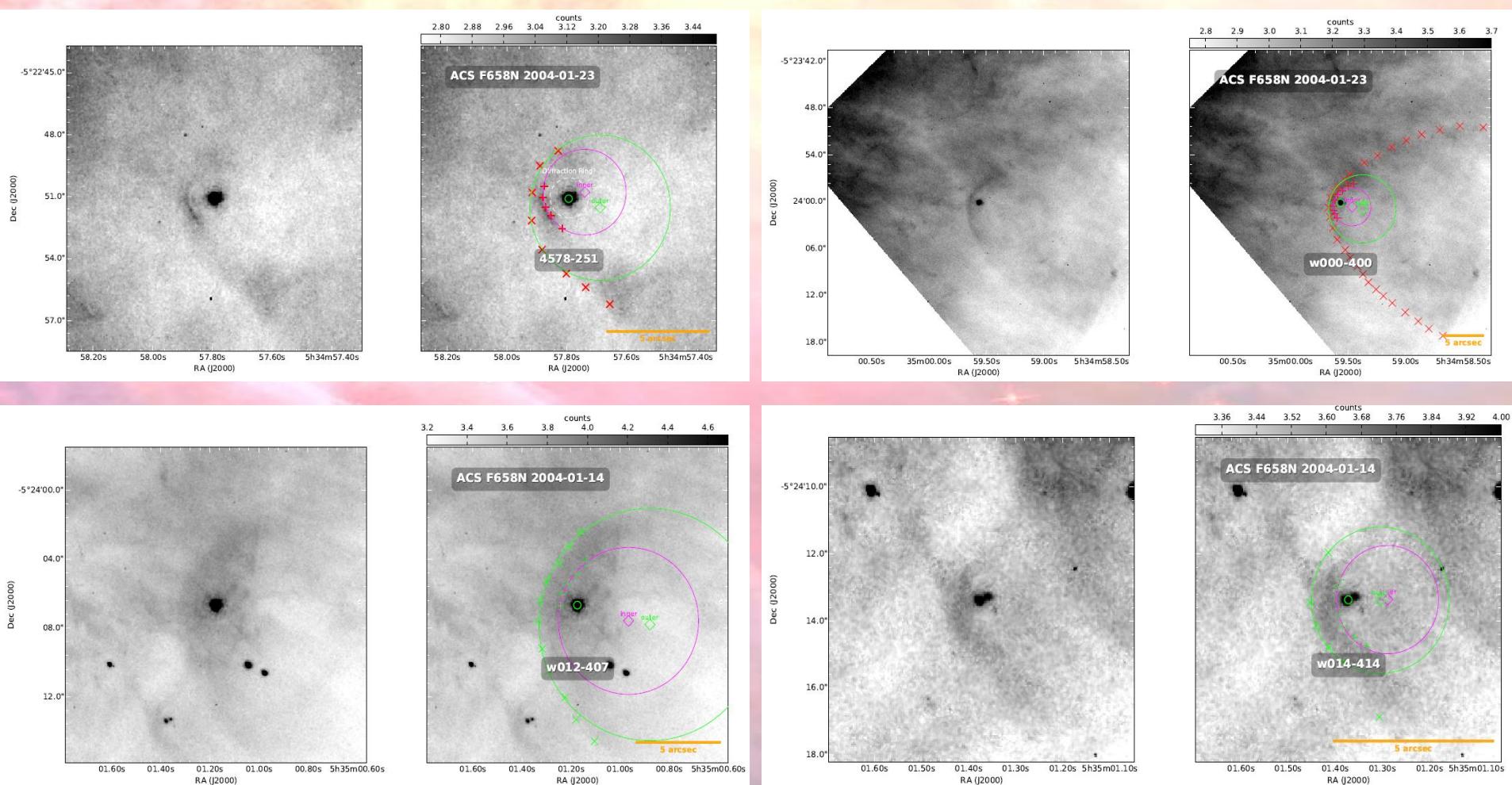
CATÁLOGO: LOS CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

Se muestran una selección de 12 objetos del catálogo.



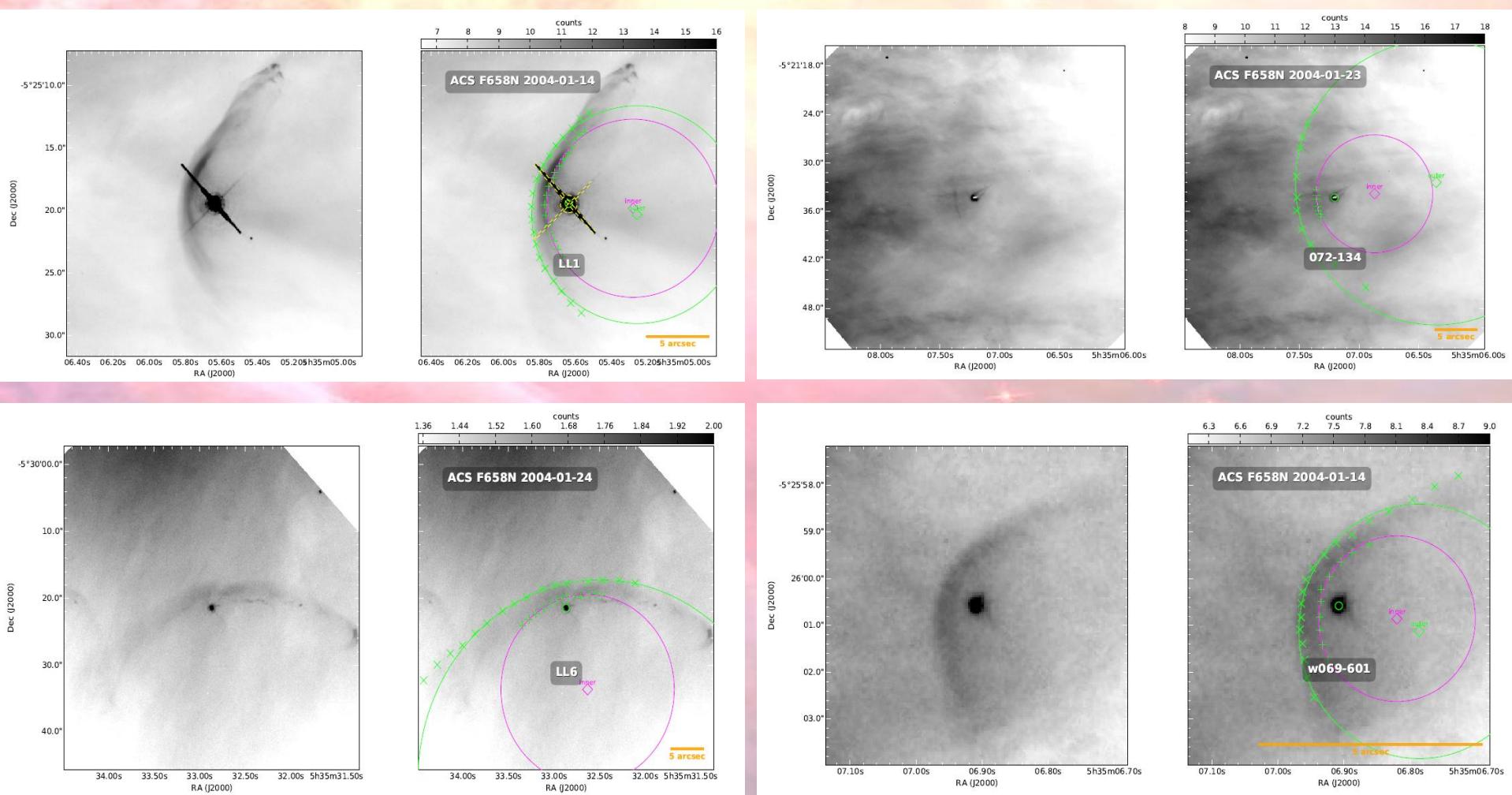
Resultados Empíricos

CATÁLOGO: LOS CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN

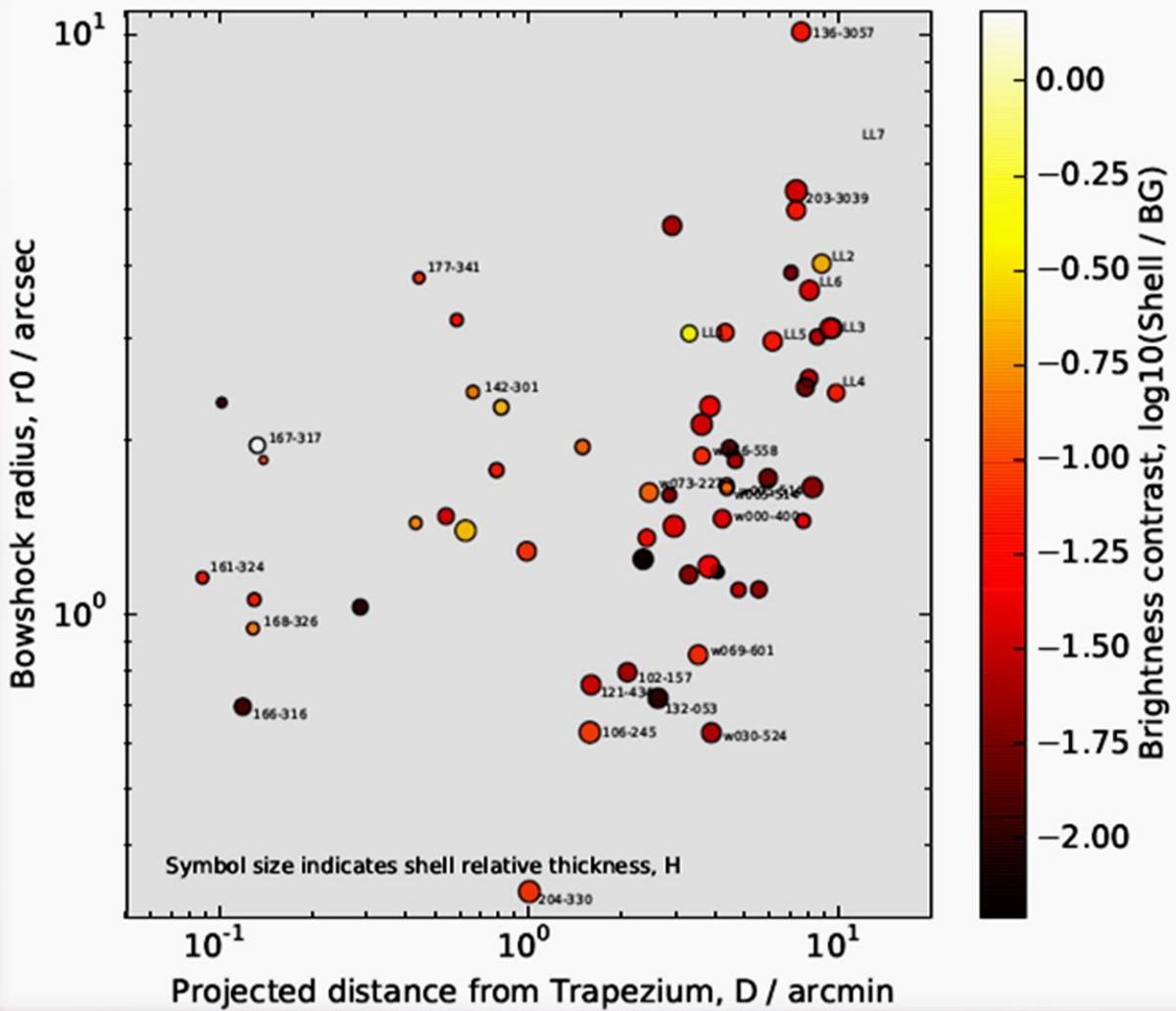


Resultados Empíricos

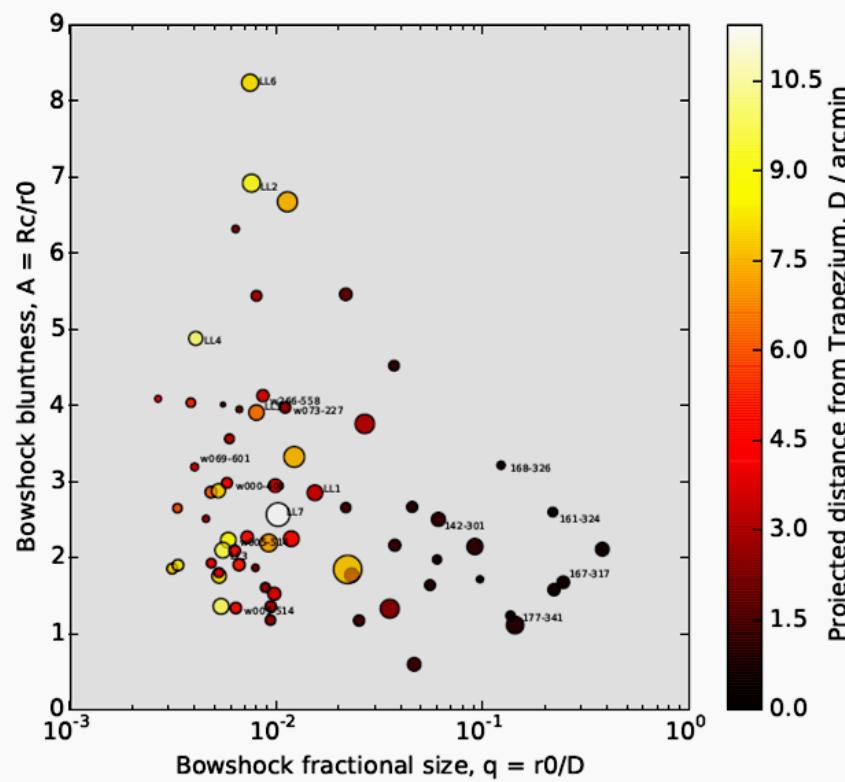
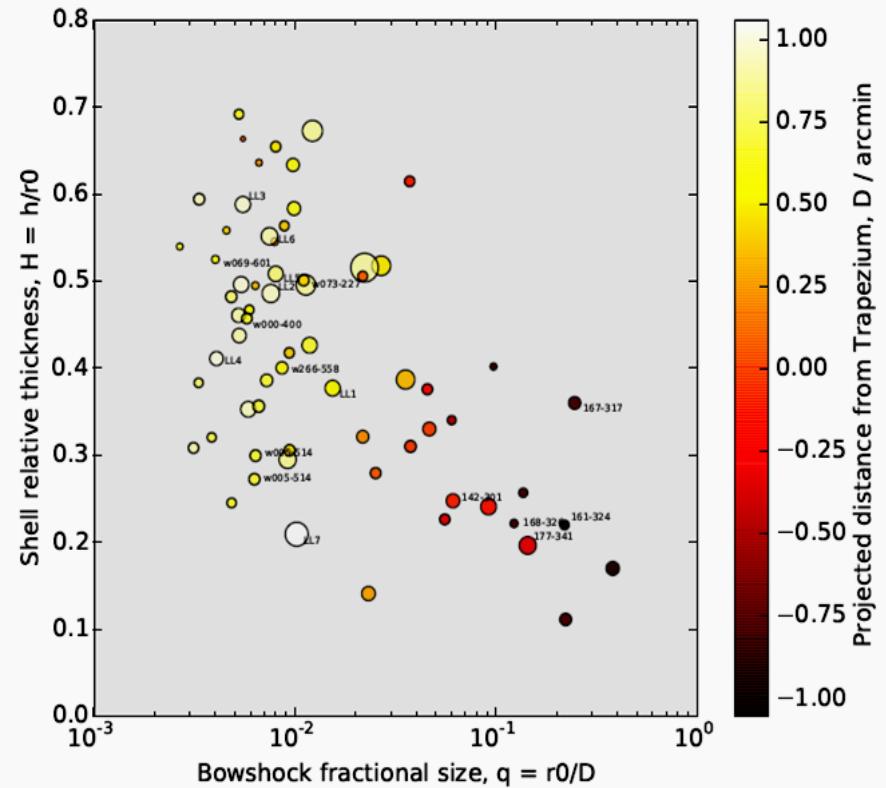
CATÁLOGO: LOS CHOQUES DE PROA EN LA NEBULOSA DE ORIÓN



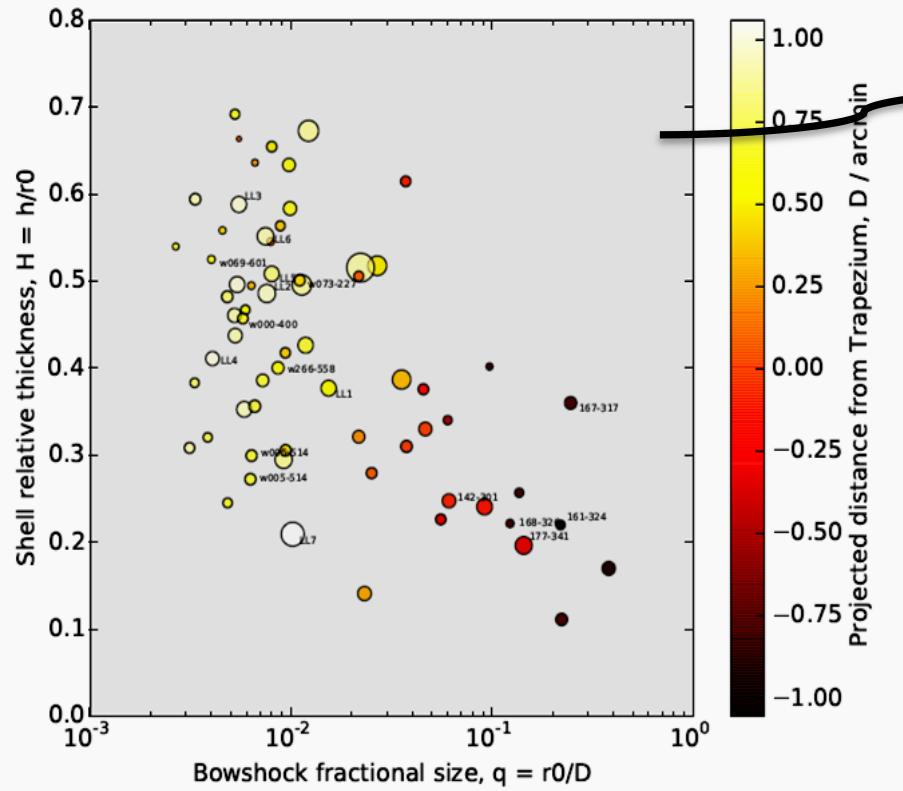
MÁS SOBRE LAS OBSERVACIONES



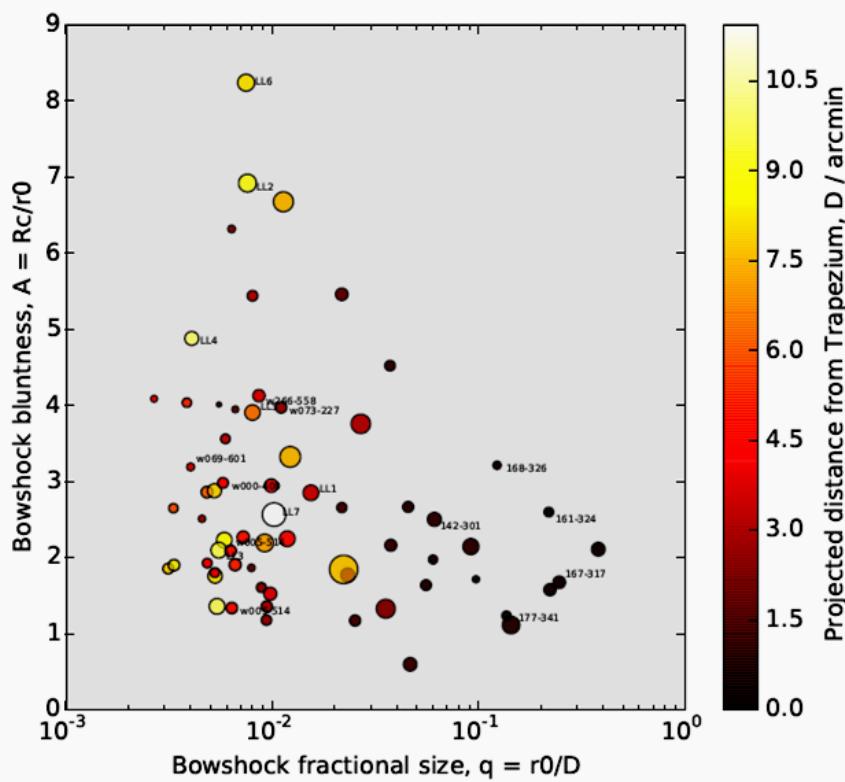
MÁS SOBRE LAS OBSERVACIONES



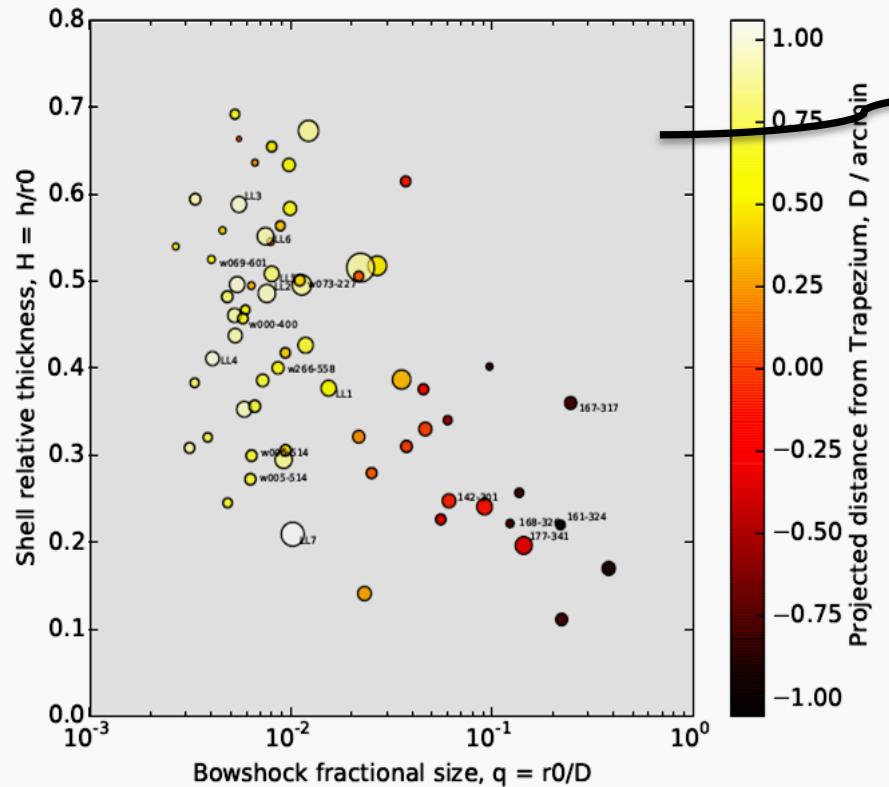
MÁS SOBRE LAS OBSERVACIONES



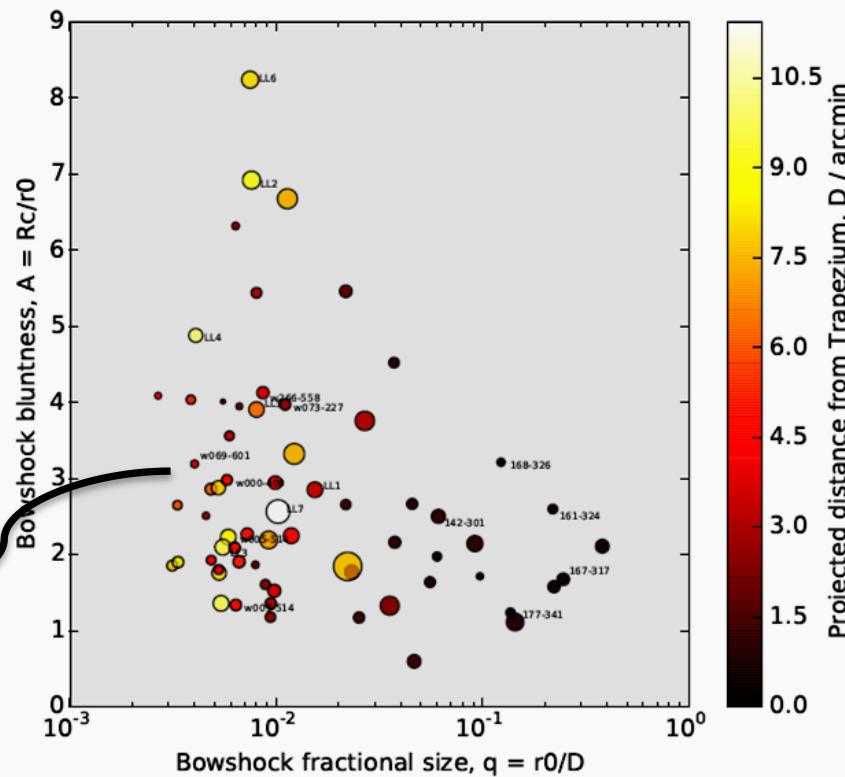
Los arcos más distantes del Trapecio tienden a tener cáscaras más anchas que los arcos más interiores.



MÁS SOBRE LAS OBSERVACIONES

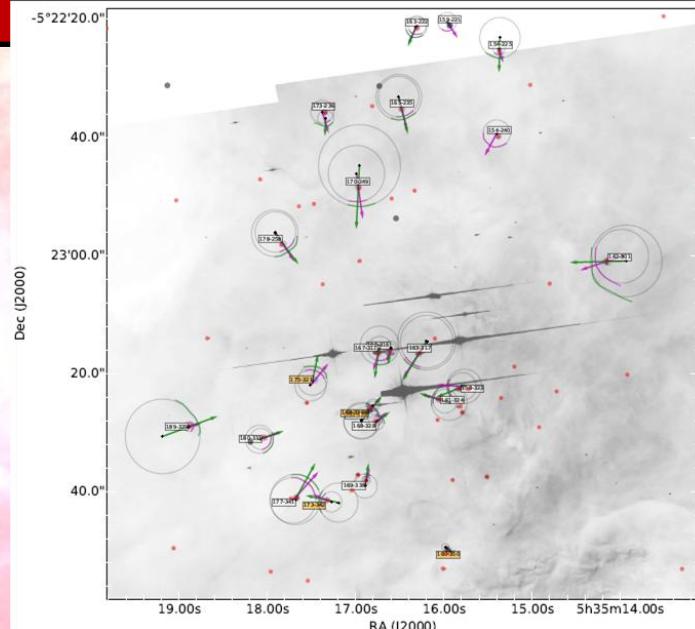


Los arcos más distantes del Trapecio tienden a tener cáscaras mas anchas que los arcos más interiores.

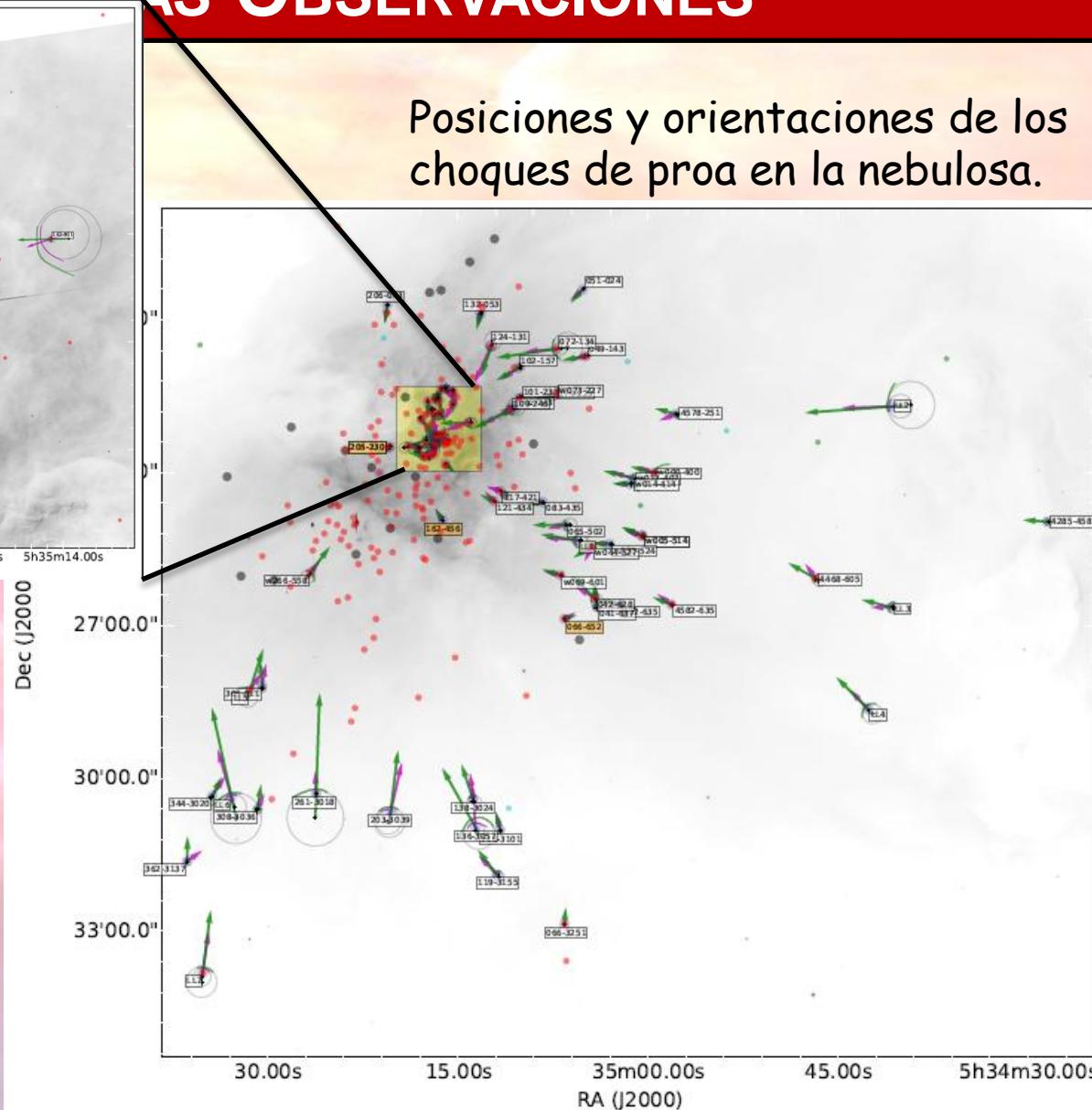


Los arcos más distantes tienden a tener cáscaras más abiertas que los arcos más interiores.

MÁS SOBRE LAS OBSERVACIONES



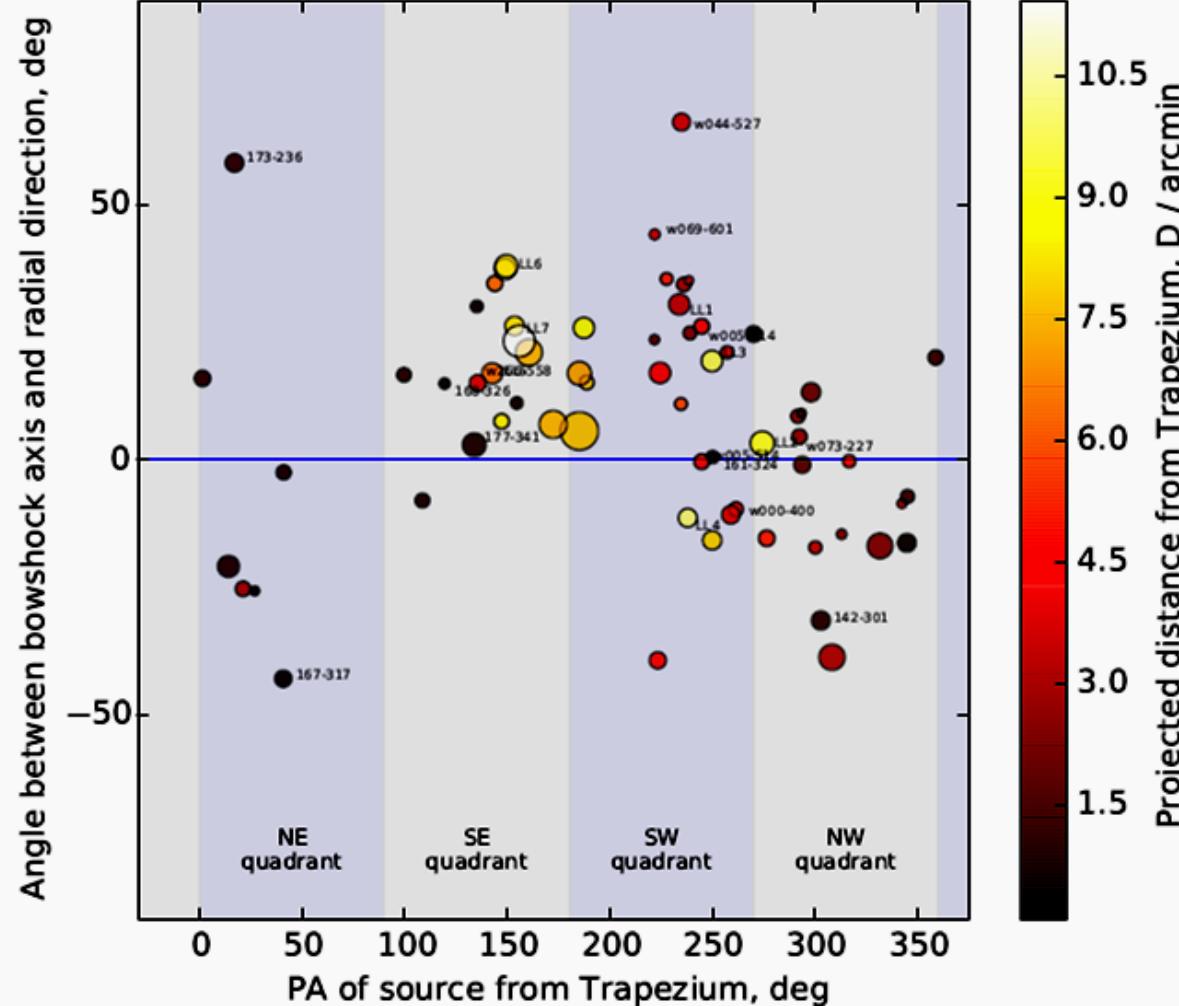
Los símbolos de color rojo son proplyds.
Aunque varios choques de proa están asociados a proplyds...
Muchos proplyds no tienen choques.



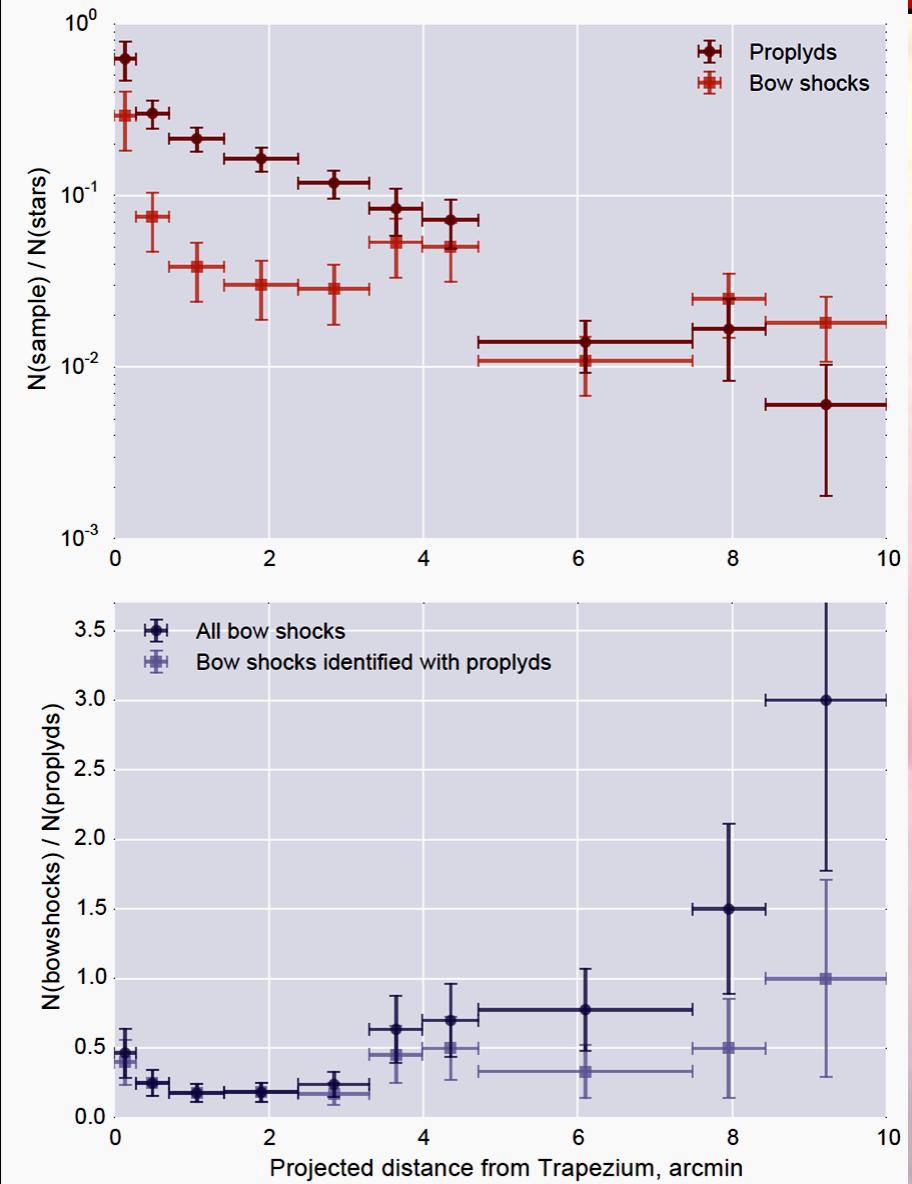
POSICIONES ANGULARES DE LOS CHOQUES DE PROA

Detalles sobre las orientaciones de los arcos.

La orientación de los ejes de simetría de los arcos es siempre cercana a la dirección radial, pero hay desviaciones sistemáticas y significativas de hasta $\approx 30^\circ$, particularmente en el sur de la nebulosa.



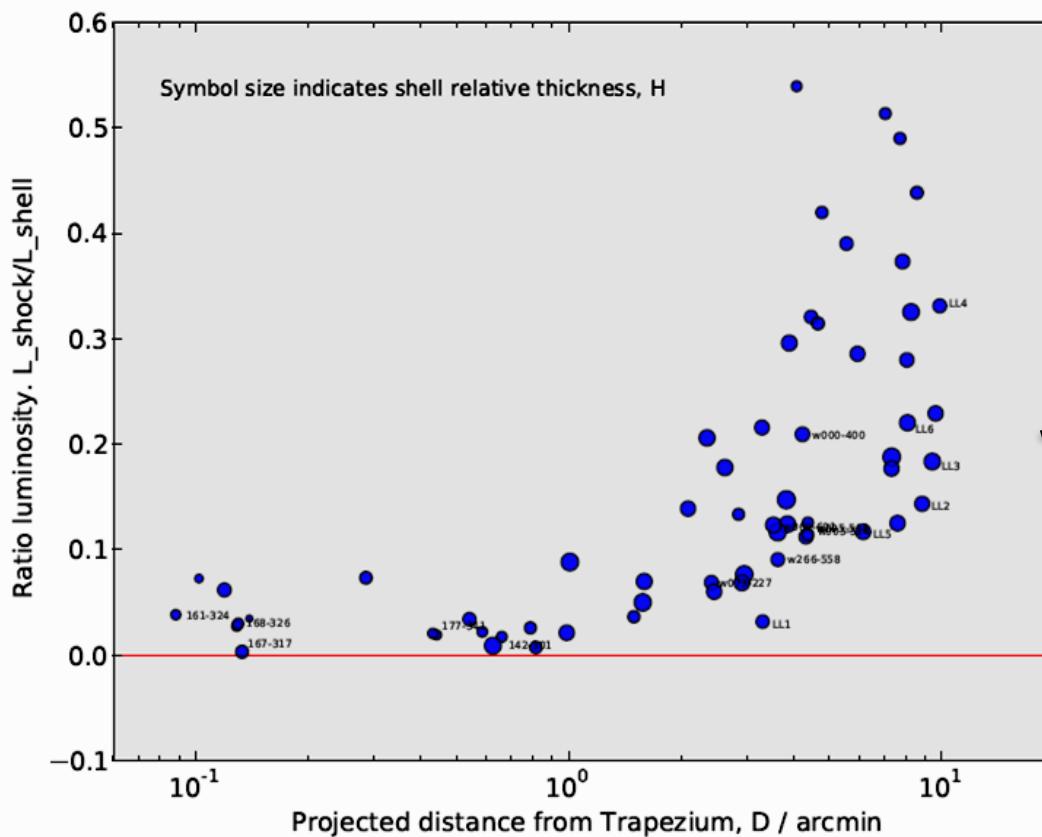
POBLACIONES



La fracción de proplyds entre el número de estrellas muestra una repentina caída después de unos 200 arcsec.

Una comparación de la distribución de las posiciones de los arcos con las distribuciones de las estrellas y de los proplyds en el cúmulo de la Nebulosa de Orión indica que hay al menos tres poblaciones distintas de arcos estacionarios, con las dos interiores asociadas a los proplyds pero la exterior no.

EMISIÓN DEL CHOQUE VERSUS EMISIÓN DE LA CÁSCARA



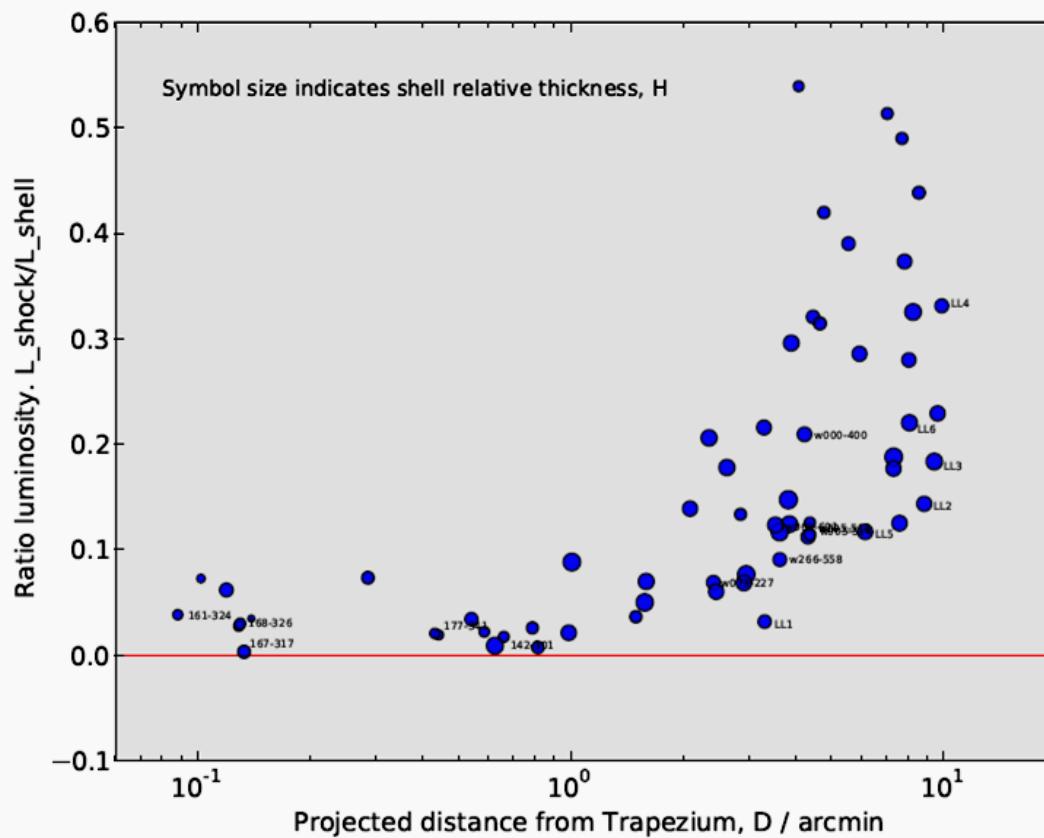
Cociente entre la luminosidad bolométrica del choque y la luminosidad bolométrica de la cáscara es

$$\frac{L_{\text{shock}}}{L_{\text{shell}}} = \frac{0.5mM_0c_0^3}{N_2\Lambda_2 h}$$

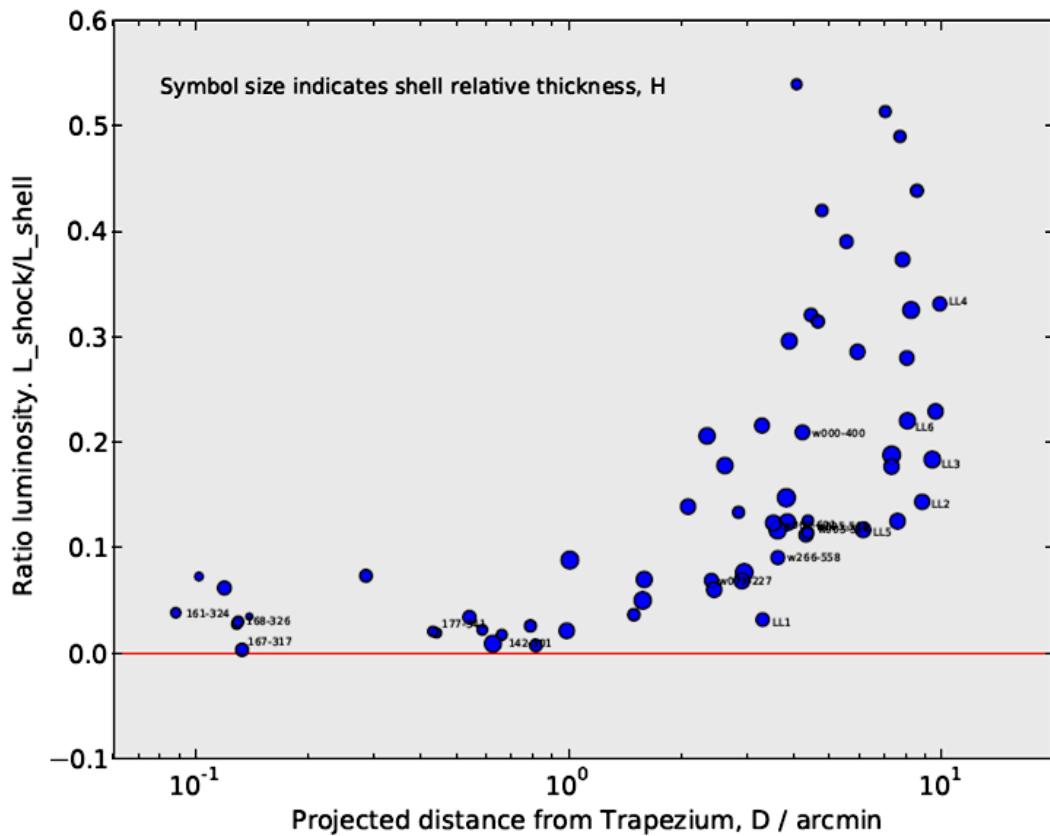
El cociente de brillo superficial de H α entre el choque y la cáscara es

$$\frac{S_{\text{H}\alpha}^{\text{shock}}}{S_{\text{H}\alpha}^{\text{shell}}} = 0.125 \frac{L_{\text{shock}}}{L_{\text{shell}}}$$

EMISIÓN DEL CHOQUE VERSUS EMISIÓN DE LA CÁSCARA



EMISIÓN DEL CHOQUE VERSUS EMISIÓN DE LA CÁSCARA



Se demostró que la emisión H α de los arcos está dominada por gas que está en equilibrio térmico a la misma temperatura que la nebulosa (10^4 K) y que la emisión de gas más caliente producido por los choques es despreciable.

DENSIDAD PROMEDIO EN LA CÁSCARA

La densidad promedio en la cáscara es

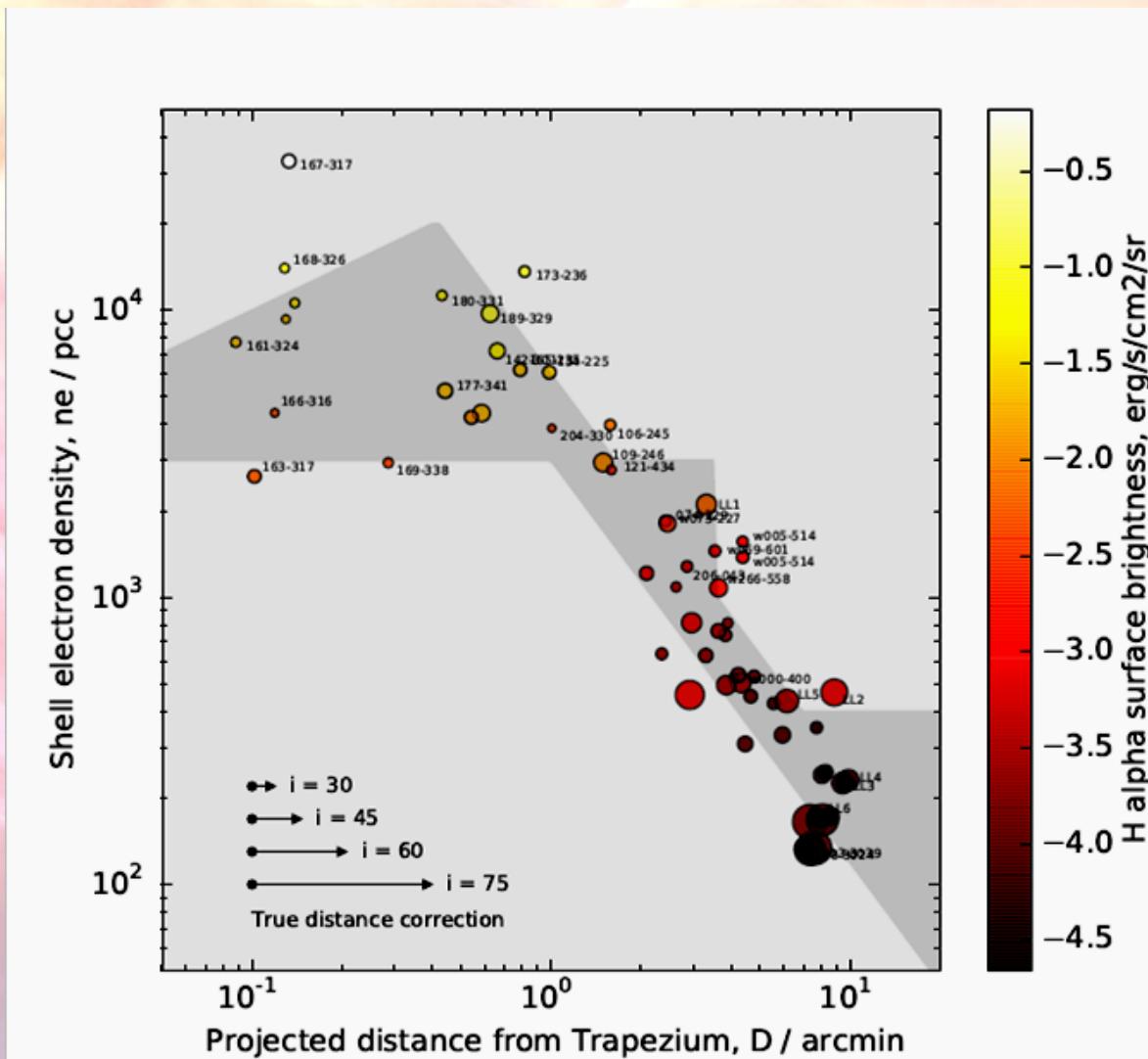
$$N_{\text{H}}^2 = \frac{4\pi S_{\text{H}\alpha}}{\alpha_{\text{H}\alpha} E_{32} \Delta\zeta}$$

donde

- $S_{\text{H}\alpha}$ es el brillo superficial de H α

- $\Delta\zeta$ es el camino de la línea de visión

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



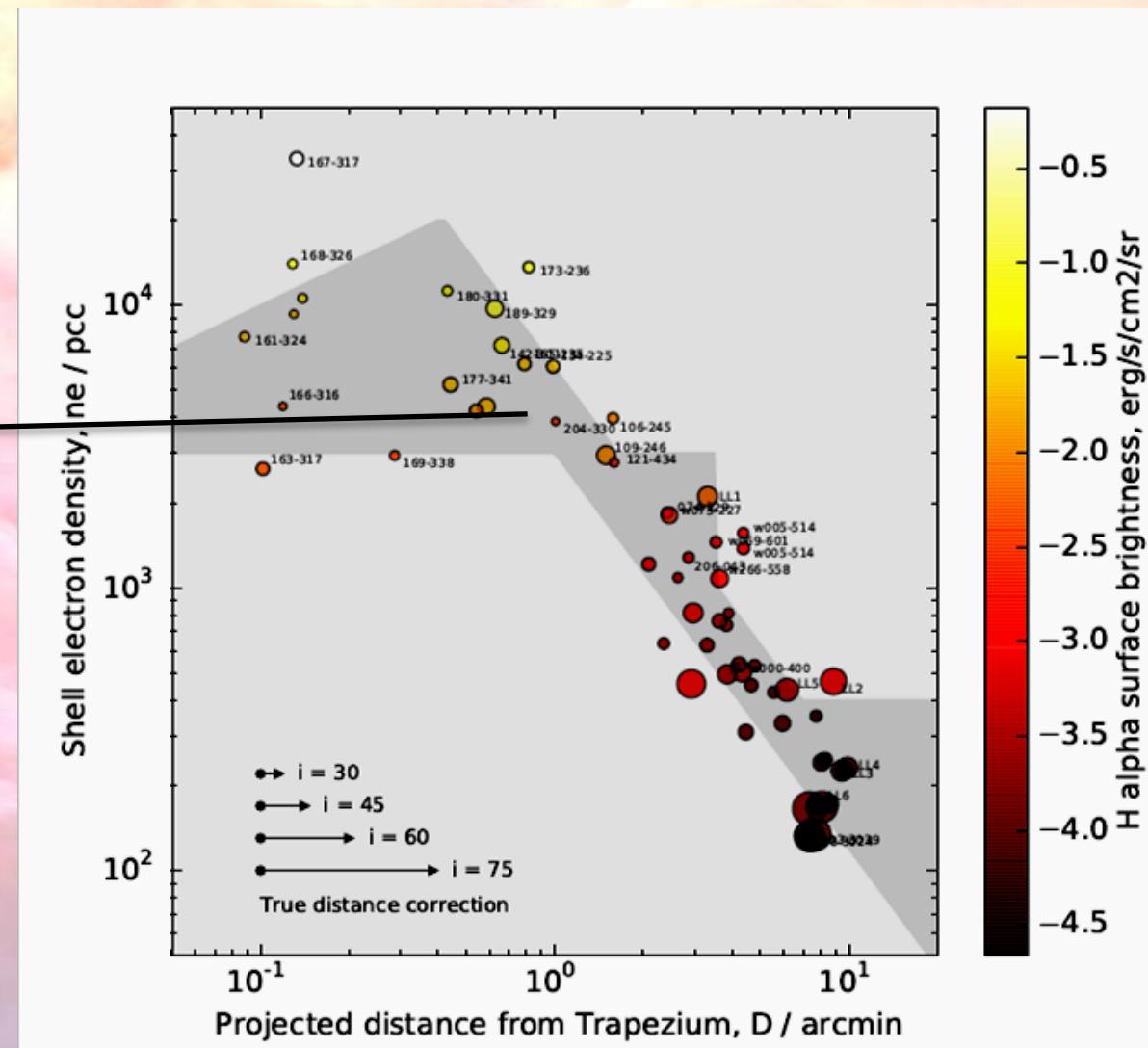
DENSIDAD PROMEDIO EN LA CÁSCARA

Los valores de la densidad en la cáscara es congruente con el comportamiento del gas nebuloso en la nebulosa medidos por O'Dell & Harris (2010).

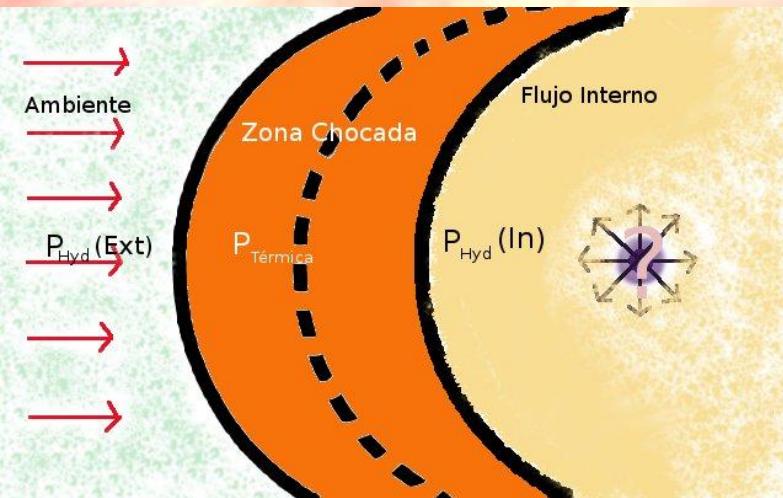


Se estimó la presión térmica en la cáscara

$$P_{\text{Térmica}} = 2N_{\text{H}} kT$$



INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS



Suposiciones para este modelo:

- 1) En los vientos domina la presión hidrodinámica.

$$P = \frac{\dot{M}v}{4\pi R^2}$$

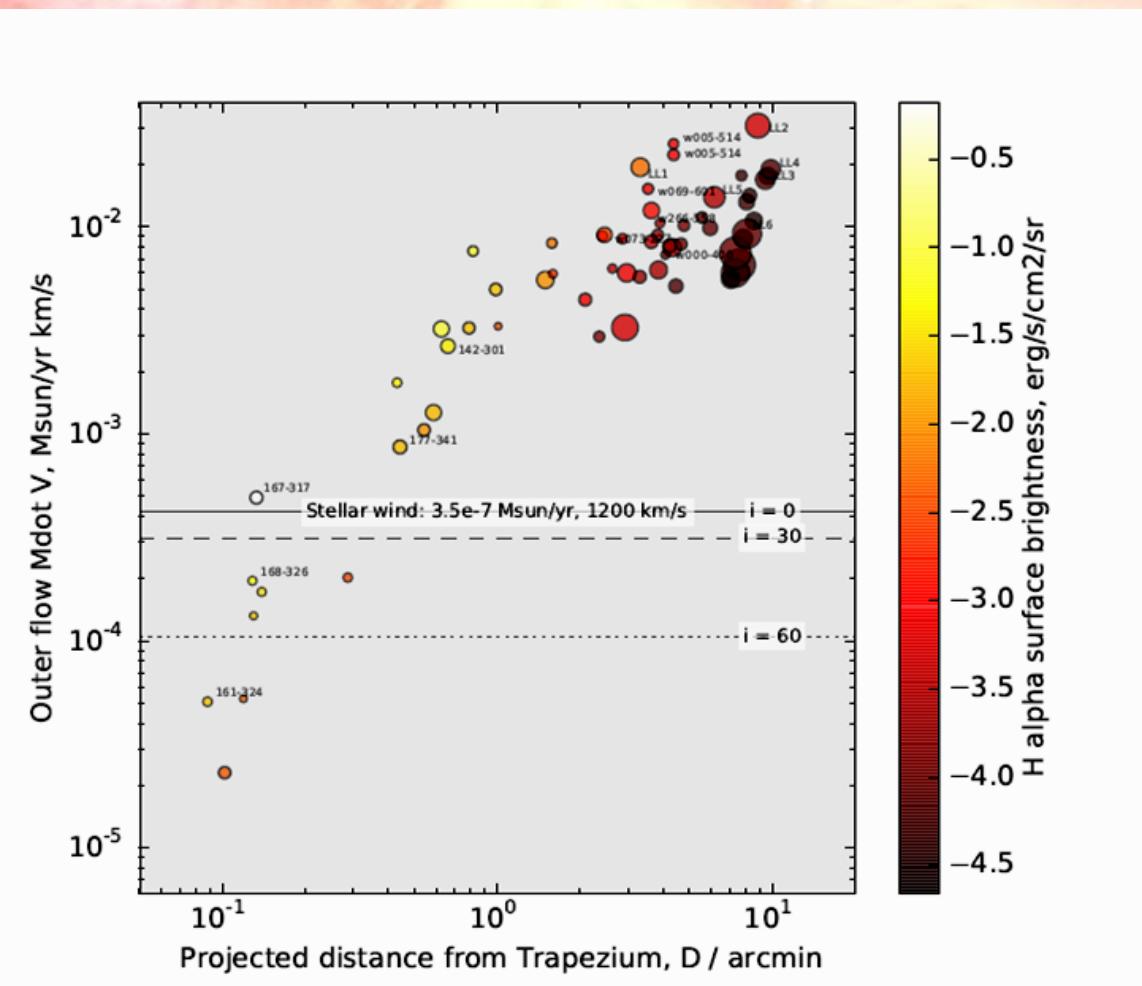
Y en la cáscara chocada domina la presión térmica.

- 2) Las cáscaras chocadas están en estado estacionario.

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

- 3) La aceleración debido a la gravedad es despreciable.

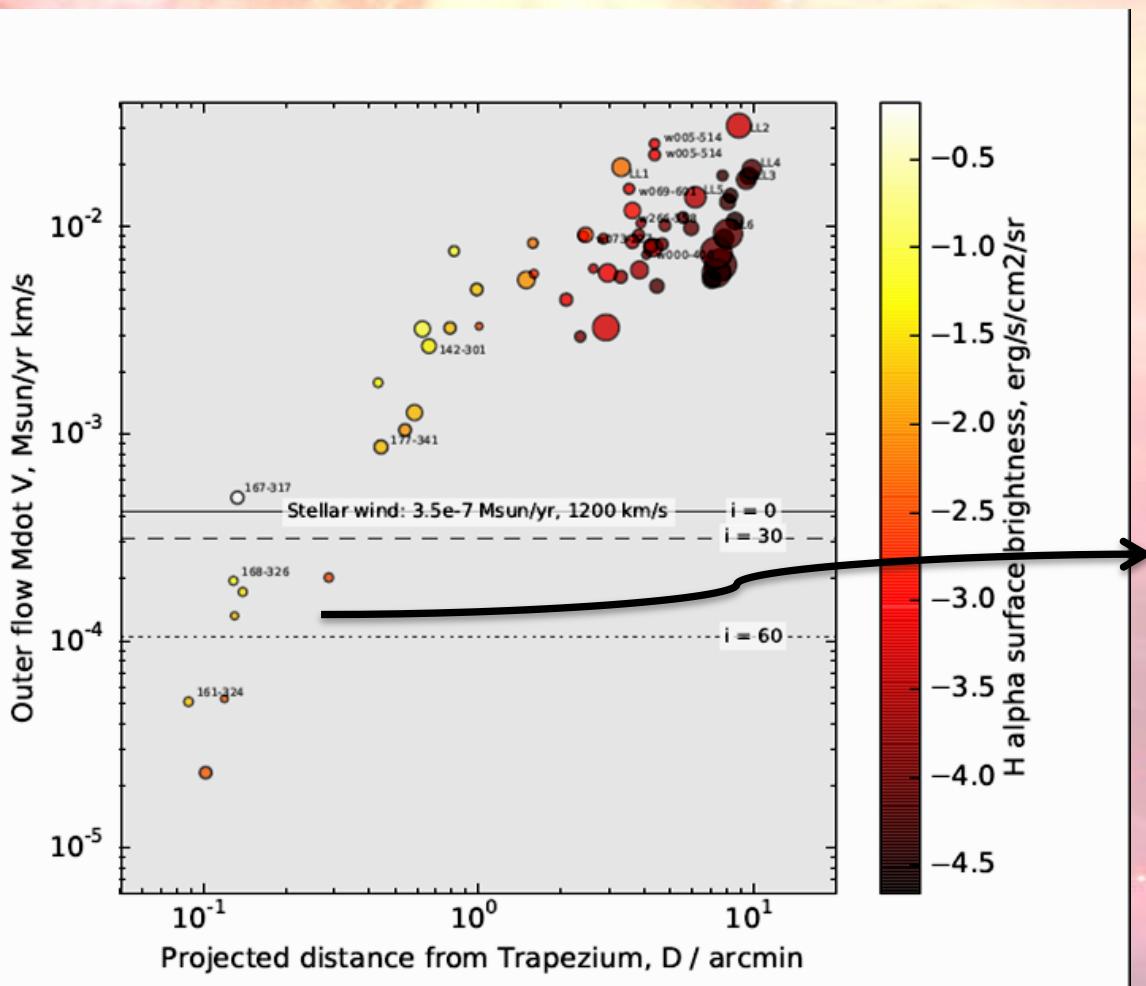
INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS



Flujo de momento externo

$$\dot{M}V = 4\pi D^2 P_{\text{Termica}}$$

INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS

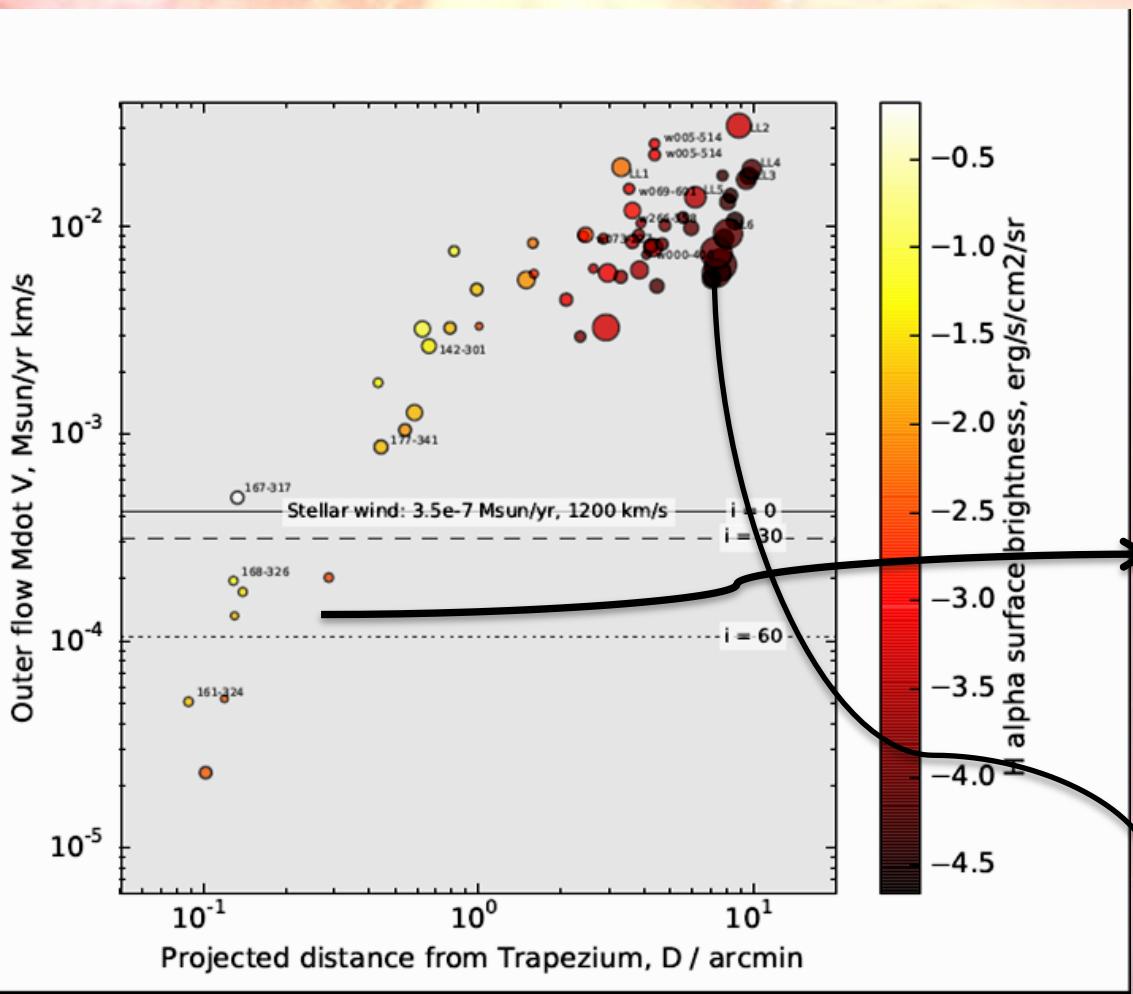


Flujo de momento externo

$$\dot{M}V = 4\pi D^2 P_{\text{Termica}}$$

El flujo de momento de los vientos estelares es suficiente para confinar la población de arcos interiores.

INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS



Flujo de momento externo

$$\dot{M}V = 4\pi D^2 P_{\text{Termica}}$$

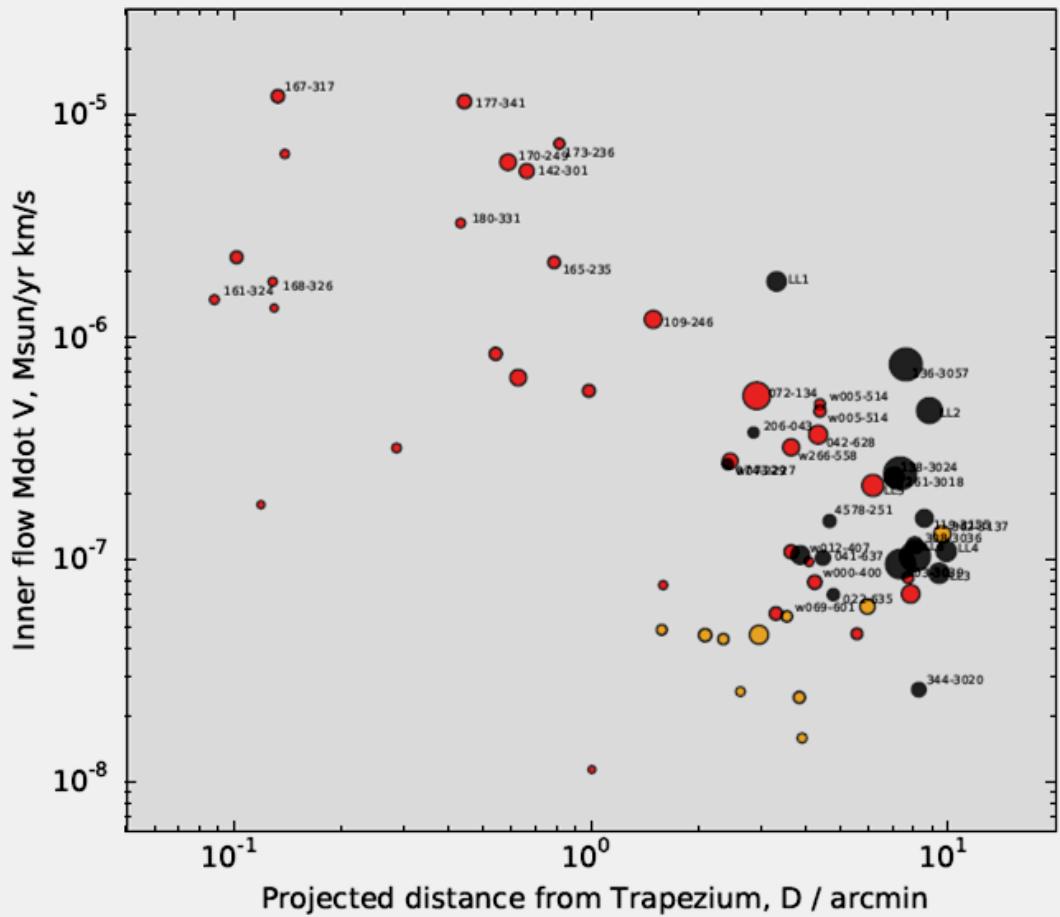
El flujo de momento de los vientos estelares es suficiente para confinar la población de arcos interiores.

Los arcos más distantes requieren un flujo de 10 a 100 veces más grande para ser confinados.

INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS

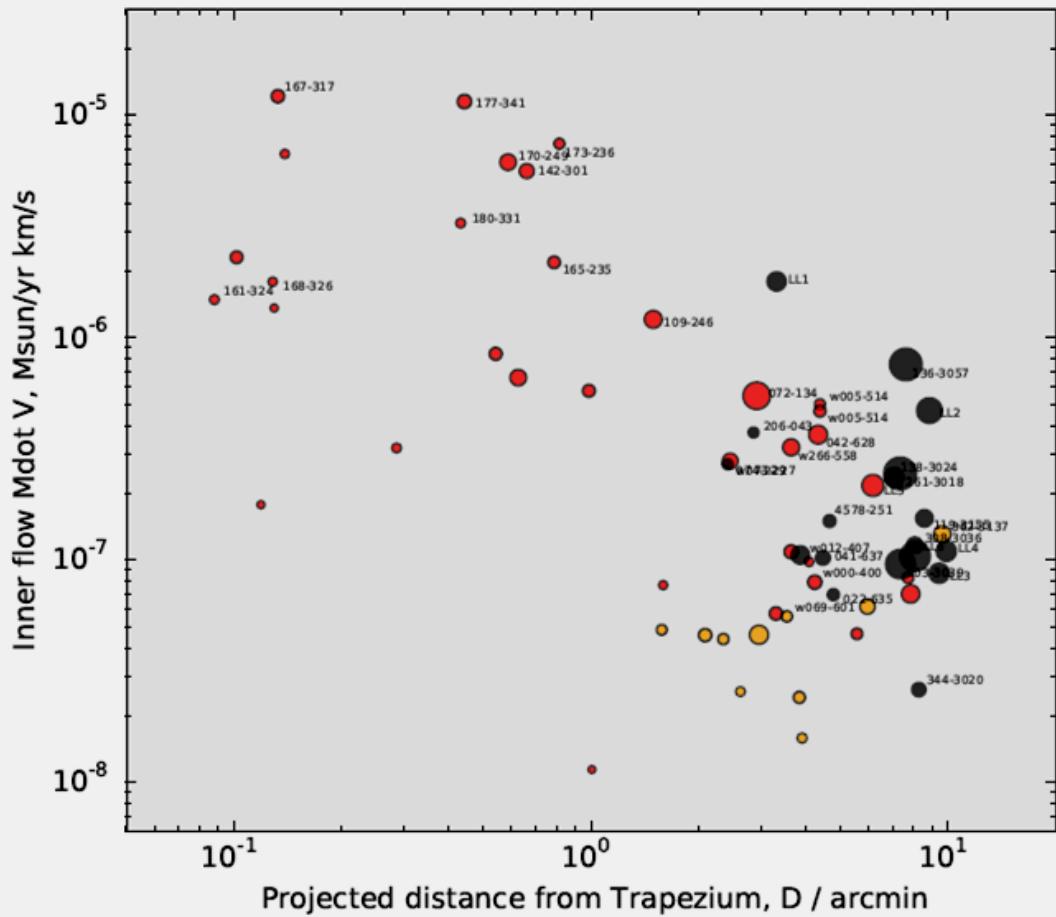
Flujo de momento interno

$$\dot{M}_w V_w = 4\pi R_0^2 P_{\text{Térmita}}$$



INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS

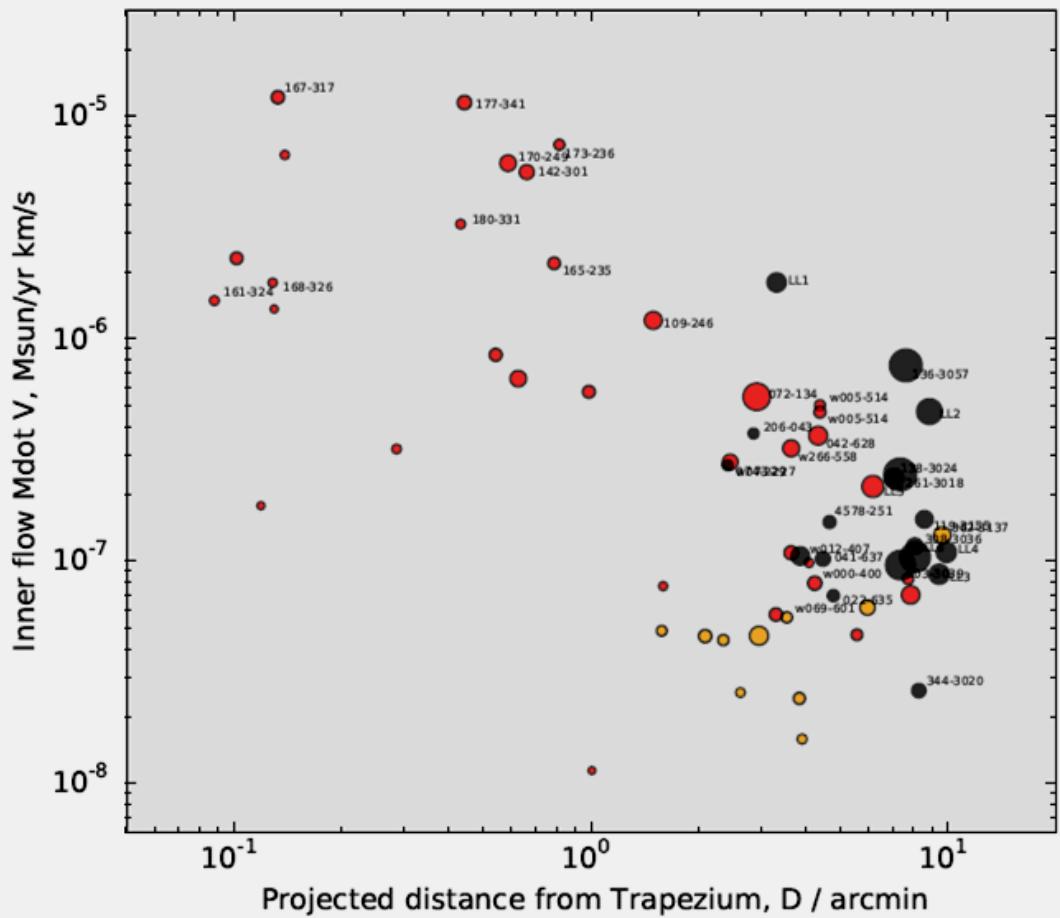
Flujo de momento interno



$$\dot{M}_w V_w = 4\pi R_0^2 P_{\text{Termica}}$$

El flujo de momento interno no depende de la distancia para los arcos dentro de 1 arcmin del Trapecio, que son todos asociados a proplyds..

INTERACCIÓN DE DOS VIENTOS



Flujo de momento interno

$$\dot{M}_w V_w = 4\pi R_0^2 P_{\text{Termica}}$$

El flujo de momento interno no depende de la distancia para los arcos dentro de 1 arcmin del Trapecio, que son todos asociados a proplyds..

Los arcos más distantes, de los cuales sólo la mitad están asociados a proplyds, muestran un flujo de momento 10 veces más débil, con una tendencia a ser más fuerte para los que no son proplyds.

CONCLUSIONES

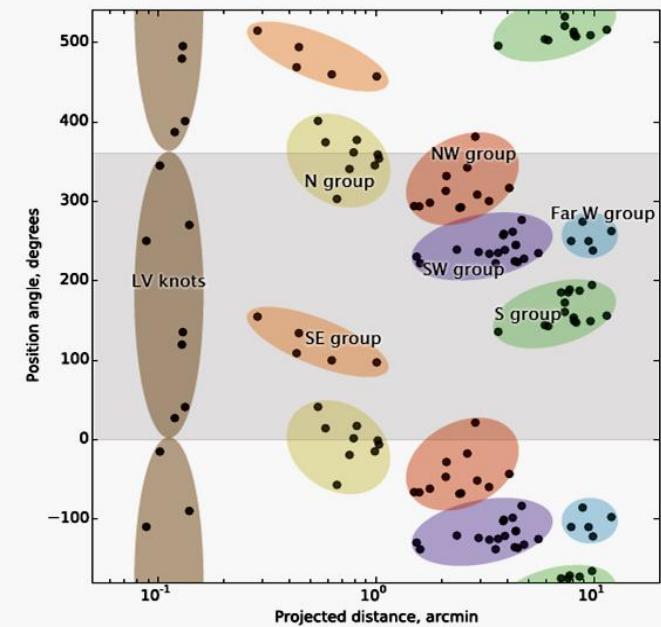
- ✓ Hemos catalogado arcos de proa estacionarios en la Nebulosa de Orión, identificando y midiendo parámetros observacionales de 73 objetos de los cuales 20 no han sido reportados previamente.
- ✓ Se encontró que el radio de los choques depende muy poco de la distancia proyectada.
- ✓ Hay una dependencia significativa de la forma de los arcos con la distancia. Los objetos situados a grandes distancias del Trapecio tienden a tener cáscaras más anchas y más abiertas que los que se encuentran en el interior de la nebulosa de Orión.
- ✓ La orientación de los ejes de simetría de los arcos es siempre cercana a la dirección radial, pero hay desviaciones sistemáticas y significativas de hasta $\approx 30^\circ$, particularmente en el sur de la nebulosa.
- ✓ Una comparación de la distribución de las posiciones de los arcos con las distribuciones de las estrellas y de los proplyds en el cúmulo de la Nebulosa de Orión, indica que hay al menos tres poblaciones distintas de arcos estacionarios, con las dos interiores asociadas a los proplyds pero la exterior no.

CONCLUSIONES

- ✓ Demostramos que la emisión Ha de los arcos esta dominada por gas que esta en equilibrio térmico a la misma temperatura que la nebulosa (10^4 K) y que la emisión de gas más caliente producido por los choques es despreciable.
- ✓ Determinamos la densidad y presión térmica en las cáscaras a partir de nuestras observaciones de sus radios, anchos y brillo en Ha.
- ✓ Encontramos que el flujo de momento de los vientos estelares de las estrellas masivas del Trapecio es suficiente para confinar la población mas interior de arcos, pero que los arcos mas distantes que 0.05 pc requieren un flujo de momento 10 a 100 veces mas grande.
- ✓ El flujo interno de momento no depende de la distancia para los arcos dentro de 0,2 pc del Trapecio, que son todos asociados a proplyds. Los arcos más distantes que 0,2 pc, de los cuales solo la mitad son asociados a proplyds, muestran un flujo interno de momento que es 10 veces más débil y con una tendencia a ser más fuertes en las fuentes que no son proplyds.

TRABAJO A FUTURO

- ✓ Estudiar y analizar el flujo suave y ligeramente supersónico de champaña proveniente del núcleo de la Nebulosa de Orión y su interacción con el viento estelar de las estrellas Jóvenes.



- ✓ La figura nos muestra que los objetos de nuestros catálogos están divididos en 6 grupos de acuerdo a su posición angular con respecto a θ¹ Ori C en el plano del cielo. Entonces se realizará un estudio más detallado de estos grupos.