

Capítulo 4

Ajuste del modelo a los perfiles de brillo

En este capítulo realizaremos las mediciones correspondientes a las observaciones para obtener los parámetros necesarios para describir las diferentes propiedades de los glóbulos y, finalmente, comparar con el modelo en el siguiente capítulo.

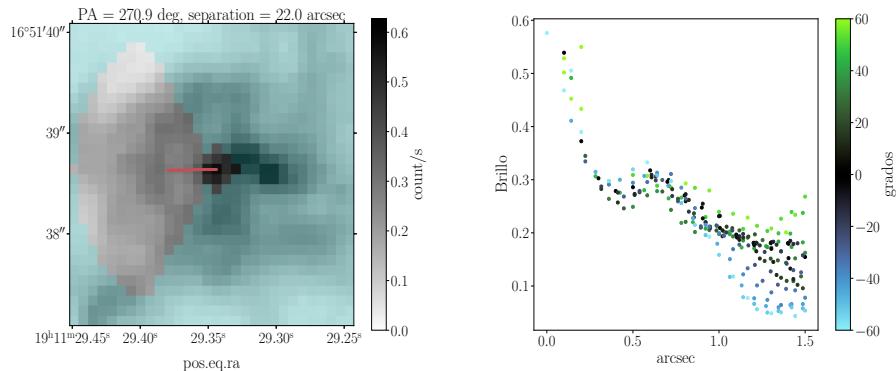
La medición de los diferentes parámetros a los 168 glóbulos encontrados lo haremos de la siguiente manera:

Una vez que sabemos donde se encuentran los glóbulos vamos a encontrar su pico de emisión en $H\alpha$, el cual será el centro de nuestro glóbulo, después identificaremos su eje de simetría considerado en el modelo. Como en nuestro caso nos interesa más describir el glóbulo y su cáscara chocada solo vamos a trabajar con una máscara para poder identificar bien estas dos partes. Esta máscara la vamos a considerar de la siguiente manera : Vamos a tomar solo los píxeles que estén a una distancia menor o igual a $0.2''$ y también los que estén a una distancia máxima de $1.5''$ y a un ángulo máximo de 60° con respecto al eje de simetría.

Después graficamos el brillo de cada píxel dentro de esta máscara como función de la distancia al centro del glóbulo, como vemos en la figura 4.1 A estos puntos le vamos a ajustar dos gaussianas y una constante.

Este ajuste es por la siguiente razón: El ancho de la primer gaussiana centrada en cero nos dirá el tamaño del glóbulo, esto suponiendo que el pico de emisión que encontramos se da justo en el centro del glóbulo. La segunda gaussiana ajustada nos indica la ubicación de la cáscara chocada y su ancho. Esperamos ver un pico de emisión en esta cáscara chocada debido a las recombinaciones que hay en esta parte, es por eso que también le ajustamos una gaussiana a la cáscara chocada. La distancia entre los picos de estas dos gaussianas no dirá el radio de la cáscara chocada. Finalmente, la constante es más un promedio del brillo del fondo en esta región. Un ejemplo más claro de estos ajustes lo podemos ver en la figura 4.2.

Hay que mencionar que el eje de simetría se define por el radio entre la estrella y el centro del glóbulo.



(a) Ejemplo de máscara usada para los glóbulos. (b) Brillo de la máscara como función de la distancia.

Figura 4.1: En la imagen de la izquierda vemos un ejemplo de la máscara que vamos a utilizar para hacer el ajuste a los perfiles de brillo, en este caso utilizando las observaciones del HST. La línea roja representa el eje de simetría considerado en el modelo. Vamos a considerar solo los píxeles que están en un círculo de $0.1''$ alrededor de pico de emisión y los que se encuentren a una distancia menor a $1.5''$ y que tengan un ángulo menor de 60° con respecto al eje de simetría. En la imagen de la derecha vemos como es el brillo de estos píxeles considerados en la máscara como función de la distancia al pico de emisión, y considerando su ángulo con respecto al eje de simetría.

En este ajuste le dimos menos peso a los píxeles más alejados del centro del glóbulo y también a los que tenían un gran ángulo con respecto al eje de simetría.

Este ajuste se hizo a las observaciones con el HST y para el caso del JWST se hizo para el filtro f090w y para una combinación de filtros para ver solo el gas ionizado, en esta última combinación se usaron los filtros f150w, f210m, f335m y f444w. De esta manera obtuvimos varias mediciones independientes a los ajustes, con distintas resoluciones. Así tenemos una mejor certeza de que realmente estamos detectando una cáscara y del tamaño de los diferentes parámetros ajustados.

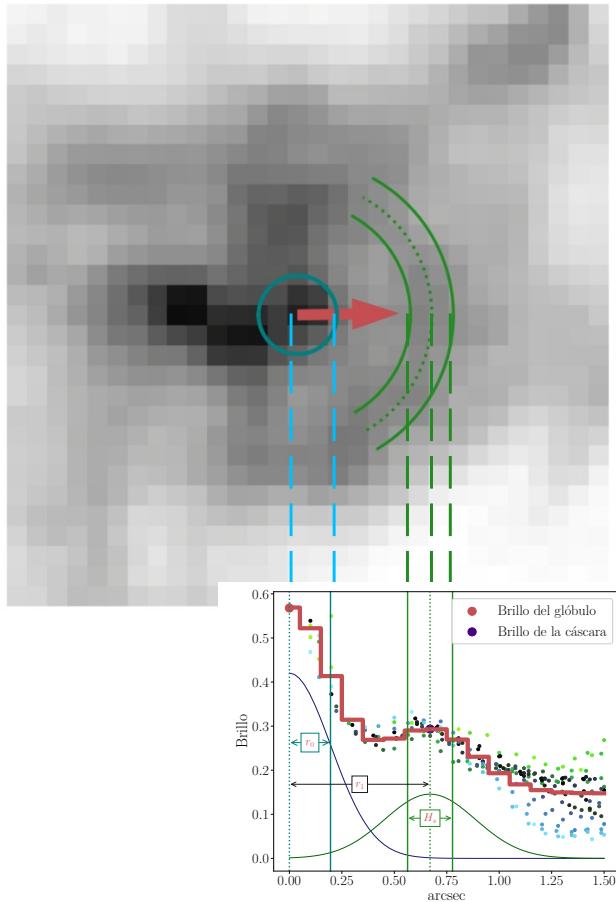


Figura 4.2: Ejemplo del ajuste de las dos gaussianas y una constante a los perfiles de brillo. En este ejemplo vemos como obtuvimos los diferentes parámetros a través del ajuste. Los brillos de la parte interna como de la cáscara son el máximo de la primer y segunda gaussiana, respectivamente. La σ de la primera gaussiana centrada en cero no dice el tamaño de la parte interna. Para el ancho de la cáscara, lo consideramos a partir de la σ de la segunda gaussiana. Para el radio de la cáscara, lo tomamos como la distancia entre los picos de ambas gaussianas. Este es un ajuste a las observaciones del HST y podemos ver como se ve el ajuste directamente en la imagen. Para la visualización del ajuste, la imagen del glóbulo fue rotada 180°.

Mencionar que es el
mismo ejemplo que en Fig 4.1

4.1. Medición del radio en la parte neutra

Por otra parte, como en estos dos casos anteriores tenemos solo la emisión de gas ionizado la medición para los radios de la parte neutra no estaría del todo bien. Por lo que para la medición de la parte neutra se utilizó la combinación de los filtros f150w, f210m y f335m del JWST para ver la emisión neutra.

En este caso ajustamos solo una gaussiana y una constante al perfil de brillo ya que aquí no podríamos ver la cáscara chocada. El ajuste se realizó de la siguiente manera: Dado que el valor medio de los radios de los glóbulos en el anterior ajuste es de $0.14''$ con una variación de $\pm 0.04''$ decidimos poner una máscara de $0.2''$ alrededor del pico de emisión y unos conos con un pequeño ángulo de apertura, estos conos son perpendiculares al eje de simetría considerado en el modelo y tienen una longitud de $1.5''$. Con esta máscara considerada esperamos tener toda la emisión neutra en el círculo pequeño que consideramos, los conos nos servirán para calcular mejor la constante ajustada.

Debido a que tanto el radio de la parte neutra, r_0 , como el ancho de la cáscara chocada, H_s , se midieron usando la sigma de la gaussiana ajustada, primero los relacionamos con la anchura a altura media y después los corregimos tomando en cuenta el ancho del telescopio. De esta manera tenemos una medición más realistas de estas dos cantidades.

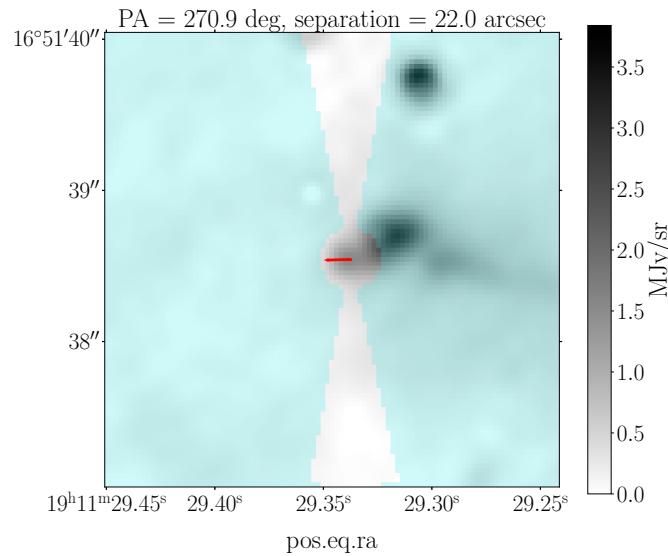


Figura 4.3: Ejemplo de la máscara usada para la medición del radio en la parte neutra del glóbulo. Para ver solo la emisión del gas neutro (PAHs) se usó la combinación de los filtros f150w, f210m y f335m. Estas son observaciones del JWST.

Agregar.
subsecciones

4.2. MEDICIÓN DE ERRORES EN LAS OBSERVACIONES 33

4.2. ~~Medición de errores en las observaciones~~

Para el caso de los errores vamos a considerar que estos están dados por fluctuaciones no relacionadas en el brillo de la nebulosa o por efectos sistemáticos debido a la inadecuación del modelo y no por el ruido de fotones. Así que vamos a estimar estos errores comparando las distintas mediciones hechas, ~~las cuales~~ son independientes.

Suponiendo que

4.2.1. ~~Incertidumbres~~ En el caso del radio y ancho de la cáscara podemos notar que estos siguen una buena tendencia si comparamos las mediciones realizadas con el HST y el JWST. ~~Dado que estas mediciones son independientes~~ vamos a considerar el error estándar, el cual está dado por

$$\epsilon_x = \frac{\sigma(x_{HST} - x_{JWST})}{\sqrt{2}}$$

Repetir

falta σ

explicar que es la

donde x_{HST} son las mediciones hechas con el HST y x_{JWST} las mediciones hechas con el JWST.

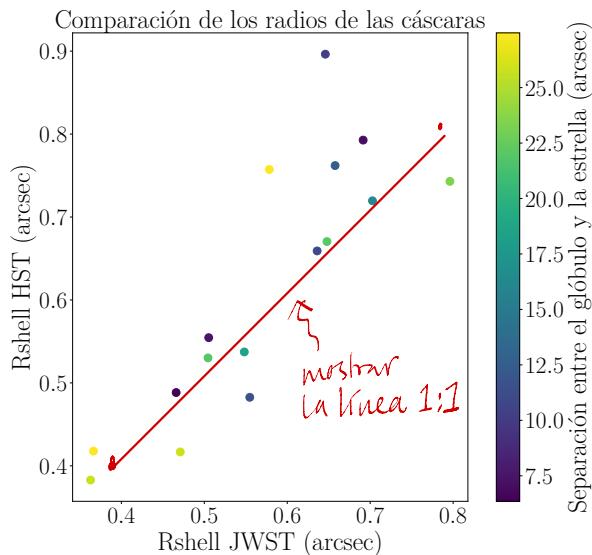


Figura 4.4: Comparación de los radios de la cáscara obtenidos a partir de los ajustes a ambos telescopios.

4.2.2. ~~Incertidumbres en r_s~~

Para el caso de la parte interna tenemos una medición para el radio en la parte neutra con un combinación de filtros del JWST y una aproximación con el HST, ya que en este último vemos solo el gas ionizado. Aunque no hay una buena correlación entre estas dos mediciones, su valor promedio y desviación estándar se parecen mucho, por lo que vamos a considerar un radio constante

Mostrar
histograma
de las
mediciones de r

4.2.3 Incertidumbres en B_s y B_o

que será igual para todos los glóbulos el cuál será el promedio de los valores típicos de estas dos mediciones con un error de $\pm 0.03''$.

Para los errores en los brillos, tanto de la parte interna como el de la cáscara chocada, vamos a considerar como error la siguiente desviación estándar

$$\epsilon_B = \sqrt{\text{Var}((y - \bar{y})^2, w_1 * w_2)}$$

donde y son los valores observados menos el ajuste, w_1 es el peso considerado en el modelo y w_2 es la gaussiana ajustada a la parte correspondiente, es decir, para la parte interna w_2 es la primera gaussiana ajustada, la cual tiene su pico en $0''$ y para la cáscara w_2 es la segunda gaussiana ajustada (Capítulo 4).

4.3. 1 Estimación de la densidad ionizada a partir del brillo superficial de $H\alpha$

Para estimar la densidad ionizada, usamos primero la definición de Emission Measure (EM)

$$\text{EM} = \int_z n_i n_e dz$$

donde n_i es la densidad de iones, n_e la densidad electrónica y en este caso estaremos integrando sobre nuestra línea de visión. Como esta EM depende tanto de la densidad de electrones como de iones, en nuestro caso vamos a considerar un equilibrio de ionización entre el flujo fotoevaporativo y el viento estelar, por lo que $n_e = n_i$.

Si suponemos una simetría esférica entre esta interacción del flujo fotoevaporativo y el viento estelar, podemos tomar, por geometría, que

$$\text{EM} = 2\sqrt{2rhn^2}$$

Esto ya que de la figura 4.5 tenemos que por geometría $r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = (r+h)^2 = r^2 + 2rh + h^2 \approx r^2 + 2rh \Rightarrow l = 2\sqrt{2rh}$. De esta manera, usando la EM tenemos que

$$n = \sqrt{\frac{\text{EM}}{l}} = \sqrt{\frac{\text{EM}}{2\sqrt{2rh}}}$$

Entonces,
 $\text{EM} = n^2 l$
 donde n es
 la densidad promedio
 rms y l es la
 profundidad del gas
 dentro a lo largo de
 la línea de vista.

4.3.1. Uso de la EM a partir de las observaciones

Para medir la EM a partir de las observaciones en $H\alpha$ usamos lo siguiente. Primero para la intensidad I en unidades cgs ($\text{fotones s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$) tenemos que

$$\frac{I}{\text{cgs}} = \int \frac{f_{H\alpha} \alpha_B n_e n_p}{4\pi} dz$$

donde $f_{H\alpha}$ es la fracción de todas las recombinaciones a los niveles $n \leq 2$, α_B el coeficiente de recombinación para el caso B, n_e la densidad electrónica, n_p

Luego, decir que vas a considerar una cáscara estérica con radio r y anchura h con $h \ll r$ y con densidad uniforme n .

y luego explicar que esto se aplica a las cáscaras de interacción con $r=r_s$ y $h=h_s$,
 Vede más que se aplica a la base del flujo fotoevaporativo,
 en donde se usa la aproximación del anillo efectivo
 $r=r_o$, $h=co_r$

4.3. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD IONIZADA A PARTIR DEL BRILLO SUPERFICIAL DE H_α35

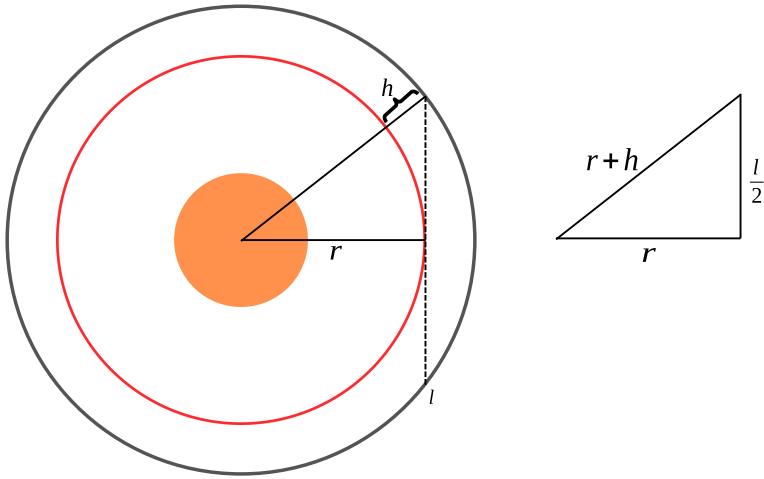


Figura 4.5: Como la medida de emisión se mide a lo largo de la línea de visión, vamos a tener un máximo en la línea punteada l y si consideramos una simetría esférica vamos a tener esta configuración donde h será el ancho de la cáscara chocada, r el radio del centro del glóbulo hasta donde inicia el flujo fotoevaporativo chocado y $h < r$.

la densidad de iones y todo esto se integra a lo largo de la línea de visión. Si consideramos como constantes tanto a la fracción de fotones como al coeficiente de recombinación a lo largo de la línea de visión entonces tenemos que

$$\frac{I}{cgs} = \frac{f_{H\alpha}\alpha_B}{4\pi} \int n_e n_p dz = \frac{f_{H\alpha}\alpha_B}{4\pi} EM \approx \frac{1.17 \times 10^{-13}}{4\pi} EM.$$

Por otro lado para el brillo B en las observaciones con HST tenemos que multiplicar por 0.0137 para tener el brillo en unidades $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$, por lo que para comparar con I tenemos que dividir entre la energía de H_α

$$\frac{B}{cgs} = \frac{0.0137}{(h\nu)_{H\alpha}}$$

por lo que podemos conocer la EM a partir de las observaciones como

$$\frac{\frac{B}{cgs}}{\frac{I}{cgs}} = \frac{\frac{0.0137}{(h\nu)_{H\alpha}}}{\frac{1.17 \times 10^{-13}}{4\pi} EM} \Rightarrow EM = \left(\frac{I}{B}\right) \frac{4\pi 0.0137}{1.17 \times 10^{-13} (h\nu)_{H\alpha}}$$

como todo está en unidades cgs, entonces nuestra EM tendrá unidades de cm^{-5} .

Es importante mencionar que en este caso estamos considerando que l es perpendicular a el eje de simetría considerado en el modelo.

Si consideramos que el eje de simetría del glóbulo tienen un ángulo i con respecto a una línea perpendicular a nuestra línea de visión como se ve en la

*No entiendo porque
tienes dos cantidades
distintas I y B .
Creo que solamente
debes tener una u otra.*

*¿cuál es la cantidad
que medimos, I o B ?
¿y a qué corresponde
la otra?*

*play
que
explicar
mismo
este número*

Hay que mejorar esta explicación. Hay varias etapas de suposiciones y aproximaciones que están mezcladas aquí de manera bastante opaca.

La primera etapa es la estructura del flujo

36

CAPÍTULO 4. AJUSTE DEL MODELO

foto evaporativo.

La suposición

es que la densidad en el flujo es separable

se puede escribir

Luego se puede demostrar que $g(\theta) = \cos^{1/2} \theta$

$$n_i = n_1 \cos^{1/2} i$$

Entonces como $n(r, \theta) = g(\theta)f(r)$



La segunda etapa es de suposición que la estructura angular de densidad en la cáscara es igual a la del flujo fotoevaporativo. (entonces también $\cos^{1/2} \theta$)

Figura 4.6: En el eje de simetría tenemos una densidad máxima en la cáscara chocada n_1 (color más oscuro) y esta densidad va cayendo con el ángulo que tiene con respecto al eje de simetría (color más claro).

La tercera etapa es relacionar esta estructura en θ con la integración a lo largo de la línea de vista. 4.4. Buenos ajustes

se puede mostrar que el punto tangencial es a $\theta = i$.

El ajuste descrito al inicio de este capítulo resultó ser muy bueno para los glóbulos en los que podíamos ver una cáscara. Con este ajuste ahora conocemos muchos parámetros de los glóbulos, entre ellos los distintos radios y el ancho de la cáscara chocada. Además conocemos el brillo tanto en la parte interna como en la cáscara chocada por lo que podemos obtener más información. En la Sección 4.3 vimos como obtener la densidad en la cáscara a partir de su brillo y con esto conocer la presión de la cáscara, la cual la tomaremos como $P_g = \rho c_s^2$. Esta presión la podremos comparar con la presión RAM del viento estelar. De igual manera podremos tener un estimado de la presión interna del glóbulo y comparar directamente con el modelo.

Estos glóbulos a los cuales les encontramos un buen ajuste están en un rango de separación a la estrella muy amplio, por lo que podemos conocer mejor la nebulosa y los glóbulos en general también.

que en el límite de $r \rightarrow 0$ todo el que dentro es un pequeño intervalo contorno es

luego, aproximamos $\int n^2(\theta) d\theta$ por $n^2(\theta=i) l$

luego en el caso de $\frac{h}{r}$ finito,

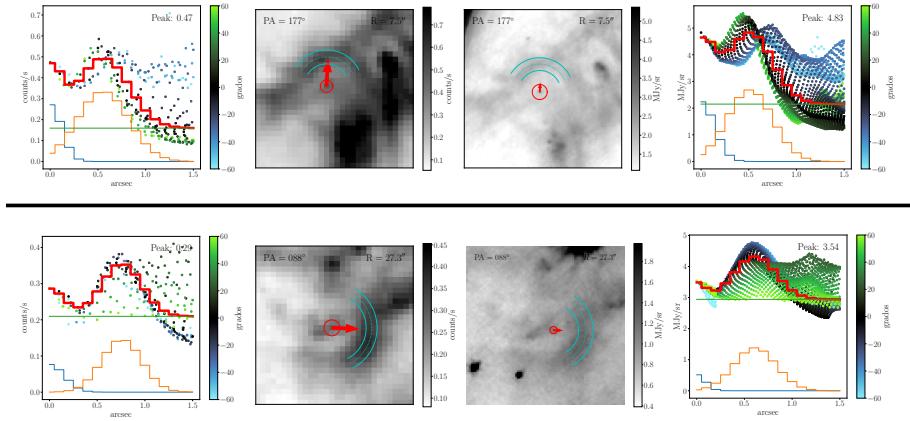


Figura 4.7: Ejemplo de buenos ajustes. Las imágenes del lado izquierdo son los ajustes y como se ven con el HST, mientras que del lado derecho son utilizando los datos del JWST. El ajuste a los datos del JWST se hizo para el gas ionizado (figura 3.5), pero la visualización de estos ajustes los vemos en el filtro f090w ya que se parece mucho a las imágenes del HST.

4.5. Ajustes recuperados

Gracias a que su hizo el ajuste a los perfiles de brillo en dos telescopios distintos y con distintas resoluciones se pudo obtener mejores resultados y una ventaja fue recuperar algunos ajustes. Esto ya que la cáscara se pudo detectar en un telescopio pero en el otro no, pero en ambos podíamos ver una cáscara.

En la figura 4.8 vemos como en ambos casos se puede ver una posible cáscara pero al momento de hacer el ajuste no detecta debido a la dispersión que tenemos en ciertas direcciones o por la falta de puntos, como es el caso de los datos del HST. Otro problema del porqué no se detectaba bien la cáscara, era debido a que esta solía tener un brillo muy bajo.

De esta manera se pudo tener una mayor muestra de la que ya se había obtenido inicialmente.

4.6. Glóbulos descartados

A pesar de tener una buena cantidad de glóbulos para aplicar a este modelo no se usaron todos por diferentes razones.

Algunos de ellos tenían un mal ajuste debido a la gran estructura de la nebulosa, había estrellas de fondo o se veían afectados por ~~la difracción del telescopio~~. Debido a esto en algunos casos no se alcanzaba a detectar bien la parte neutra o la cáscara chocada y en algunos casos la detección de estas regiones estaban mal en cuanto a sus tamaños.

*espigas de
difracción de
estrellas
brillantes*

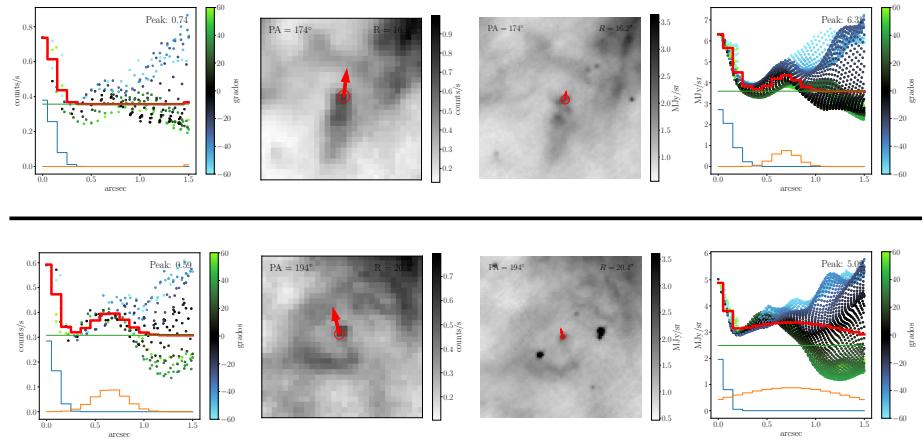


Figura 4.8: Ejemplo de ajustes recuperados. En el glóbulo de arriba vemos que la cáscara que se alcanza a ver tenuemente en ambas imágenes, pero solo se ~~detecta~~ recupera en el ajuste a los datos del JWST. En el glóbulo de abajo vemos a simple vista una cáscara pero debido a la dispersión de los puntos en una dirección esta no se ~~puede detectar~~ recupera bien en el caso del ajuste a los datos del JWST

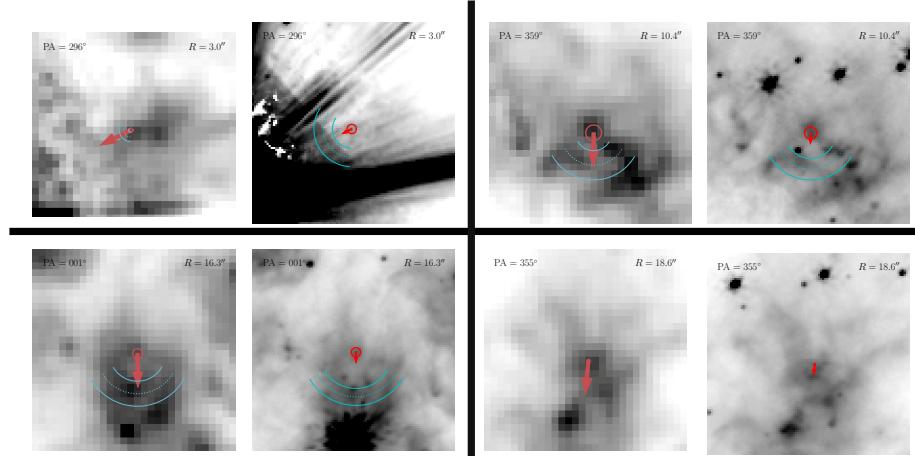


Figura 4.9: Ejemplo de glóbulos descartados. Del lado izquierdo es la imagen con el HST y del lado derecho con el JWST en el filtro f090w. El primer glóbulo es descartado por que se ve afectado por la difracción del telescopio y por la gran estructura de la nebulosa, esto se puede deber a lo cerca que está de la estrella central. En los otros ejemplos vemos como la presencia de fuentes cercanas afecta nuestras estimaciones de posibles cáscaras chocadas en las observaciones.

Resultados de los buenos ajustes	
Separación	$14.96 \pm 7.1''$
Radio del glóbulo	$0.135 \pm 0.03''$
Radio de la cáscara	$0.59 \pm 0.01''$
n_{casca}	$1.37 \pm 0.05 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$
P_{casca}	$1.89 \pm 0.06 \times 10^{-9} \text{ dyn cm}^{-2}$
X	4.4 ± 1
X_P	0.41 ± 0.01

Tabla 4.1: Valores típicos de los resultados obtenidos a partir de los ajustes. X es la fracción de radios r_1/r_0 y X_P es la fracción de presiones P_{shell}/P_{RAM} . Para estos valores se consideró el mejor ajuste a cada glóbulo tomando en cuenta las observaciones de ambos telescopios.

Hay que explicar
 si el +/- es
 el incertidumbre
 en los valores
 individuales o
 si es la
 dispersión
 entre los
 diferentes globulos.