

## Trabajo: Análisis de imagen de disco protoplanetario.

### Entrega: 2 julio 2024

El principal objetivo de diseño del Observatorio ALMA era capturar las estructuras esperadas en los discos de formación planetaria (discos protoplanetarios), lo cual ALMA ha conseguido desde la observación de los anillos en el disco alrededor de la estrella HL Tau el año 2014. Luego de esa imagen, han habido muchos resultados transformadores como los del proyecto DSHARP, entre otros. El objetivo de este trabajo es analizar las imágenes de discos protoplanetarios de alta resolución y poder caracterizar las estructuras que poseen. Esta caracterización requiere varios pasos, siendo el primero la deproyección de la imagen.

**Descarga de Imágenes:** Las imágenes se pueden descargar directamente desde el sitio web del proyecto [DSHARP](#). Trabajaremos con las que están en la columna “Fiducial Images”, específicamente con las de “continuum” (que corresponden a la emisión de los granos de polvo a 1.3 mm). Les recomiendo comenzar con una imagen como la del disco alrededor de la estrella IM Lup (ver Figura 1).

1. Ejecuta las primeras celdas del Jupyter notebook en la página de `GitHub` de la clase. Esto graficará la imagen centrada en el disco, posición (0, 0), y superpondrá el eje mayor y menor (el centro, el ángulo de posición (PA) y la inclinación provienen de Huang et al. 2018, determinados a partir de un ajuste gaussiano elíptico).
2. Rota y deproyecta la imagen. La geometría está definida en la Figura 2. La convención es que el *Position Angle* (PA) se define como cero hacia el norte (arriba) y aumenta hacia el este (izquierda). Ten en cuenta que el ángulo entre la ascensión recta (RA) positiva y el eje  $x'$  es el mismo ángulo, PA, y que aumenta en sentido antihorario. Por lo tanto, puedes utilizar la matriz de rotación estándar para relacionar el sistema de coordenadas a lo largo de los ejes menor y mayor del disco con los desplazamientos

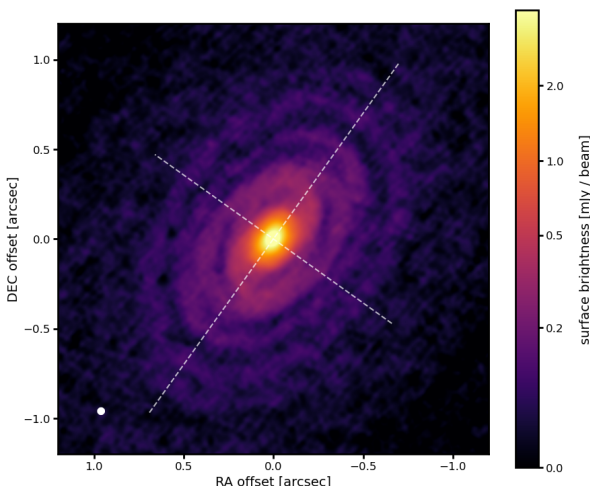


Figure 1: Resultado de los primeros pasos del notebook. Imagen del disco IM Lup del proyecto DSHARP.

observados.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = R(\text{PA}) \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix}$$

donde,  $R(\text{PA})$  es la matriz de rotación definida por

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

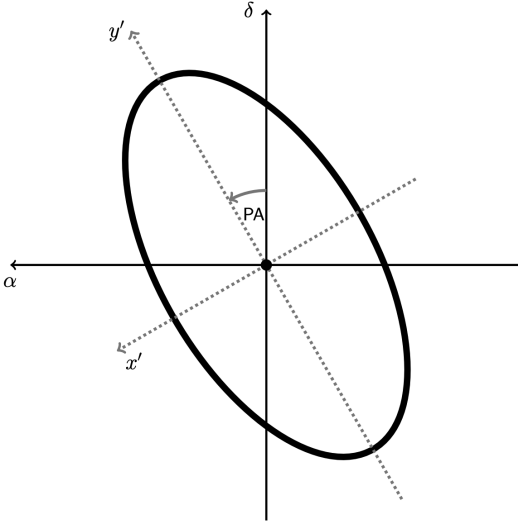


Figure 2: Esquema de coordenadas de un disco rotado en el plano del cielo un ángulo PA, relativo a las coordenadas ecuatoriales  $(\alpha, \delta)$ . Las coordenadas  $(x', y')$  están alineadas al semieje menor y mayor del disco, respectivamente.

3. La rotación y deproyección deben hacerse pixel por pixel. Esto es bastante intensivo computacionalmente dado el tamaño de  $4000 \times 4000$  de la imagen, así que se recomienda utilizar `astropy` para recortar una subimagen de  $1000 \times 1000$ . Luego, recorre esta subimagen en un loop y aplica la rotación y deproyección (pixel a pixel). Yo uso `scipy.interp2d`, pero puedes encontrar otras formas de hacerlo (por ejemplo, transformaciones afines / multiplicación de matrices). Grafica tus resultados, los cuales deberían parecer un disco de cara con anillos y una espiral prominente en el centro.
4. Ahora toma tu imagen rotada y deproyectada y conviértela a coordenadas polares:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right)$$

De manera similar, reprojecta tu imagen en este sistema de coordenadas. Ten en cuenta que la función tangente inversa tiene diferentes valores dependiendo del cuadrante  $x - y$ , así que asegúrate de considerar esto. Los anillos deberían aparecer como líneas verticales, es decir, de radio constante, en el mapa resultante. ¿Cómo se ven las espirales?

5. Grafica el perfil radial, es decir, la densidad de flujo en función del radio, tomando la media y la desviación estándar en cada punto radial. Esto efectivamente colapsará el gráfico 2D anterior a lo largo del eje  $\theta$ .

6. Elige una brecha (gap) entre dos anillos y determina la masa del planeta que podría estar detrás de su formación, utilizando las prescripciones de Dong & Fung (2017) (hint: debes usar su figura 4, y sus ecuaciones 16 y 3, asumiendo que la imagen ALMA nos muestra la densidad superficial de material).
7. Usa tu perfil radial para crear una imagen 2D promediada azimutalmente (pista: usa `numpy.meshgrid`). Esta debería parecerse a un montón de anillos sobre un fondo suave. Resta esta imagen de la imagen deproyectada y grafica los residuos. Esto es un ejemplo de *unsharp masking* y se usa aquí para mejorar las características no azimutales.
8. **Bonus.** Si tienes tiempo, transforma tu imagen promediada azimutalmente de vuelta al plano del cielo y réstala de la imagen original para mostrar los residuos en coordenadas ecuatoriales como se muestra a continuación.