Proyecto: Formación Planetaria con el Observatorio ALMA.
Entrega: 20 enero 2026

Uno de los principales objetivos del Observatorio ALMA es estudiar las nubes densas de gas y polvo donde nacen las estrellas y donde se están formando planetas alrededor de estrellas jóvenes. Tal como señala su misión, "ALMA can resolve Earth-forming zones within protoplanetary disks". Esto se logró de manera contundente a partir de la icónica observación del año 2014 del disco de HL Tau, donde ALMA reveló por primera vez una estructura de anillos y brechas con resolución sin precedentes (ALMA Partnertship et al. 2015).

A partir de esa imagen fundacional, numerosos resultados transformadores, como los obtenidos por el proyecto DSHARP y varios estudios posteriores, han consolidado a ALMA como el principal instrumento para explorar la arquitectura de los discos protoplanetarios.

El objetivo de este trabajo es analizar imágenes de discos protoplanetarios de alta resolución y caracterizar sus estructuras. Para ello, se debe seguir una serie de pasos metodológicos. El primero consiste en **deproyectar** la imagen, es decir, corregir los efectos geométricos asociados a la inclinación y orientación del disco para recuperar su morfología intrínseca en el plano del disco.

Descarga de datos para el proyecto: 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 o HD163296 (ver Figura 1). **Pueden elegir cualquiera que tenga anillos y brechas para el proyecto.**

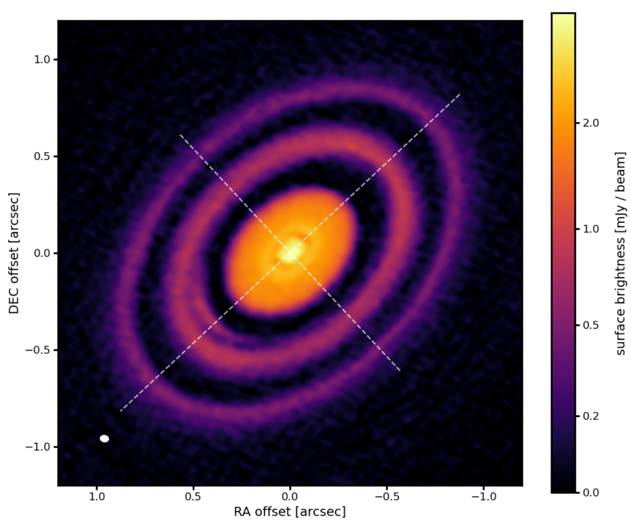

Figure 1: Resultado de los primeros pasos del notebook. Imagen del disco IM Lup del proyecto DSHARP.

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 observados.

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

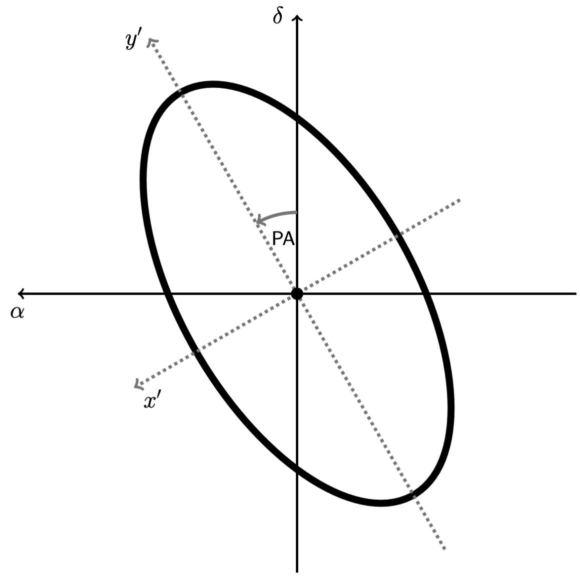

Figure 2: Esquema de coordenadas de un disco rotado en el plano del cielo un ángulo PA, relativo a las coordenadas ecuatoriales (α, δ). Las coordenadas (x', y') están alineadas al semieje menor y mayor del disco, respectivamente.

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

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

3. La rotación y deproyección deben hacerse pixel por pixel. Esto es bastante intensivo computacionalmente dado el tamaño de 4000 × 4000 de la imagen, así que se recomienda utilizar `astropy` para recortar una subimagen de 1000 × 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, reproyecta 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 subestructuras?

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 θ.

6. Selecciona una brecha (*gap*) entre dos anillos y cuantifica su profundidad midiendo el contraste de flujo entre (i) el mínimo del *gap* y (ii) el máximo del anillo exterior adyacente. Define la profundidad del *gap* como

$$\delta_{\mathrm{gap}} = 1 - \frac{I_{\mathrm{gap}}}{I_{\mathrm{ring}}},$$

donde I_{gap} es la intensidad promedio en el mínimo del *gap* e I_{ring} la intensidad promedio en el máximo del anillo. Reporta el valor obtenido de δ_{gap} y discute si la brecha es profunda o moderada en comparación con brechas típicas observadas en DSHARP.

7. Usa tu perfil radial para crear una imagen 2D promediada azimutalmente (pista: puedes usar `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.