

Aurora Durán

Sistemas Estelares Jóvenes Múltiples Observados por ALMA

Directores:

Dr. Laurent Loinard

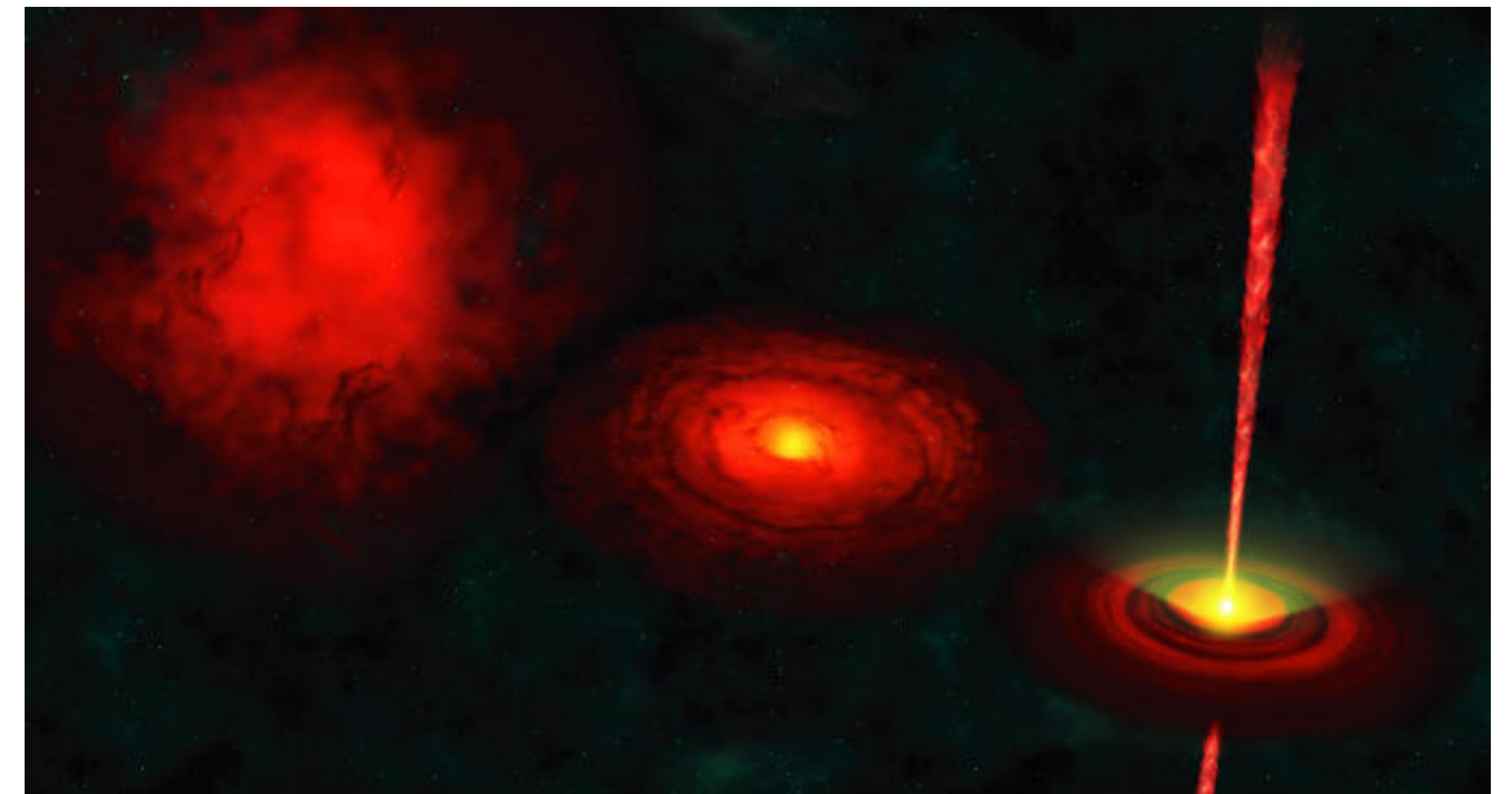
Dr. Emmanuel Caux



Introducción

Formación estelar y planetaria

- ❖ Inicia con el colapso de una región densa dentro de una nube molecular.
- ❖ La nube rota y se forma una estructura aplanada de gas y polvo.
- ❖ Por procesos magneto-centrífugos, material es expulsado perpendicularmente (jets).



© Addison Wesley

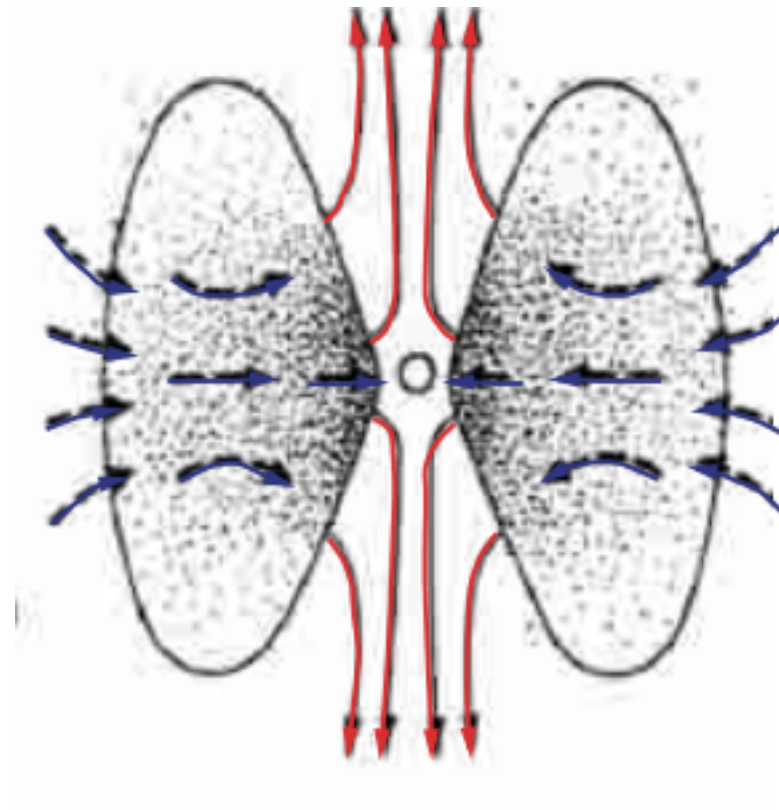
Formación estelar y planetaria

- ❖ Inicialmente clasificadas por Adams et al. (1987), basado en la pendiente de la distribución de la energía espectral (SED)

$$\alpha_{IR} = \frac{d \log(\nu F_\nu)}{d \log \nu}$$

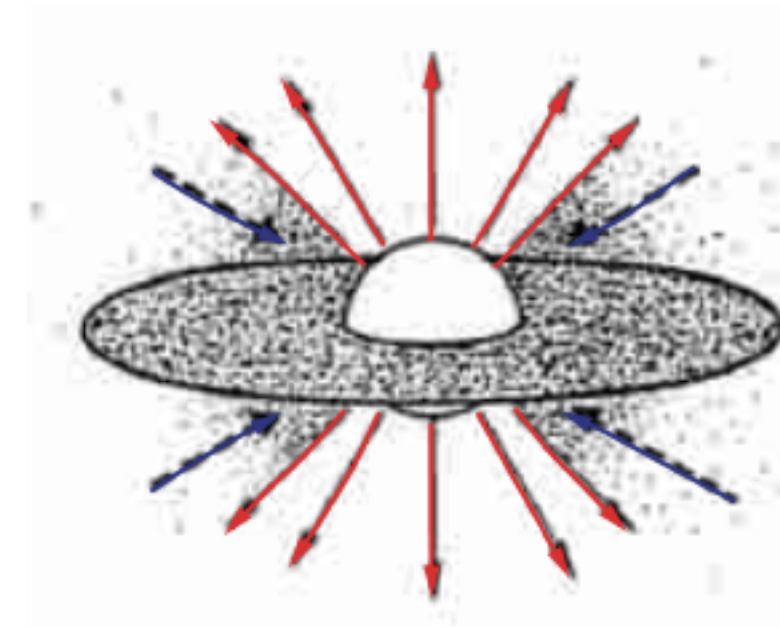
- ❖ Andre et al. (1993), incorporó etapas más tempranas
- ❖ Estas fases evolutivas, se clasifican en cuatro:
 - ◉ Clase 0, Clase I, Clase II y Clase III

Formación estelar y planetaria



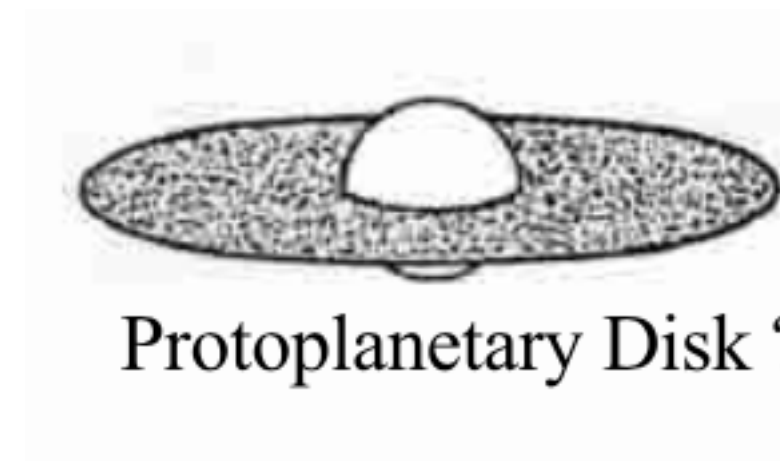
Clase 0

Envolvente masiva y opaca
Se detecta en infrarrojo lejano
y la parte milimétrica.



Clase I

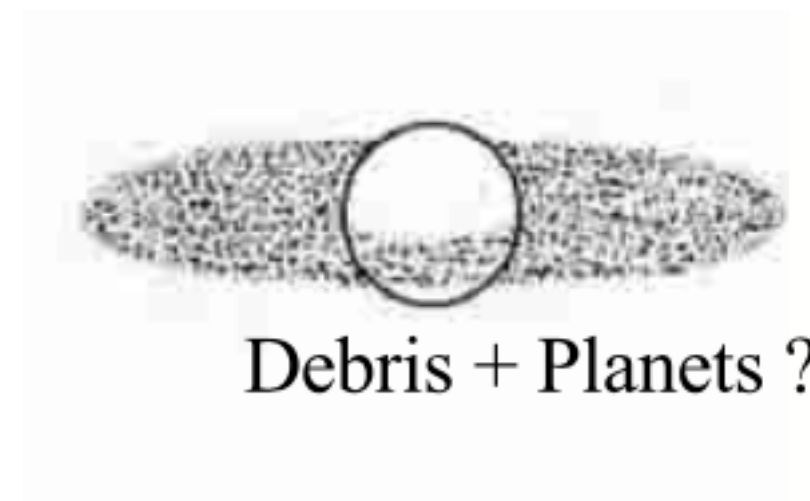
Infrarrojo se vuelve
importante.
Masa de la envolvente
disminuye
 $\alpha_{\text{IR}} > 0.3$



Protoplanetary Disk ?

Clase II

Envolvente acretada
y disipada.
 $-1.6 < \alpha_{\text{IR}} < -0.3$



Debris + Planets ?

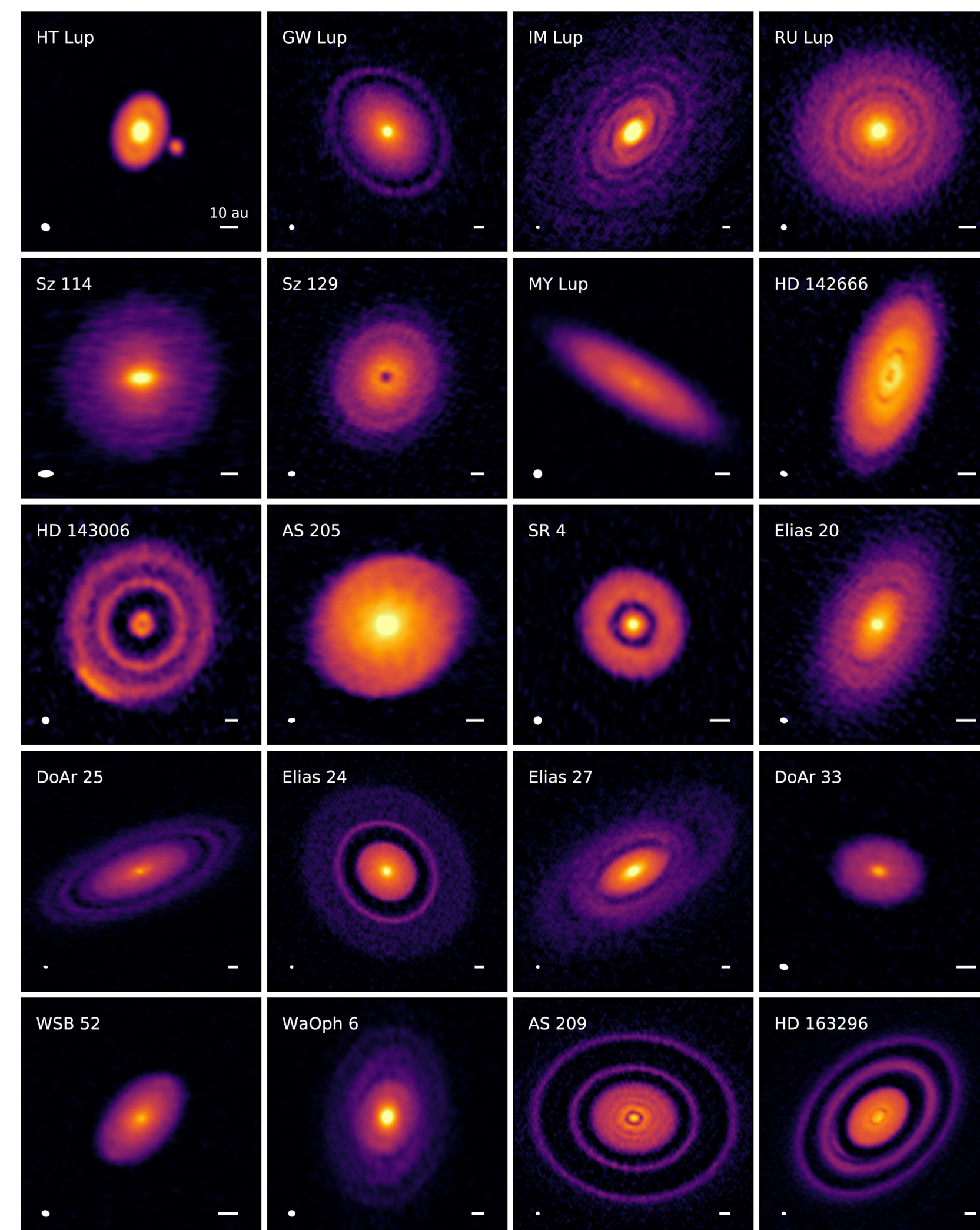
Clase III

Disco se disipa, aunque
puede existir un disco
de escombros.
 $\alpha_{\text{IR}} < -1.6$

Andre et al. 2002

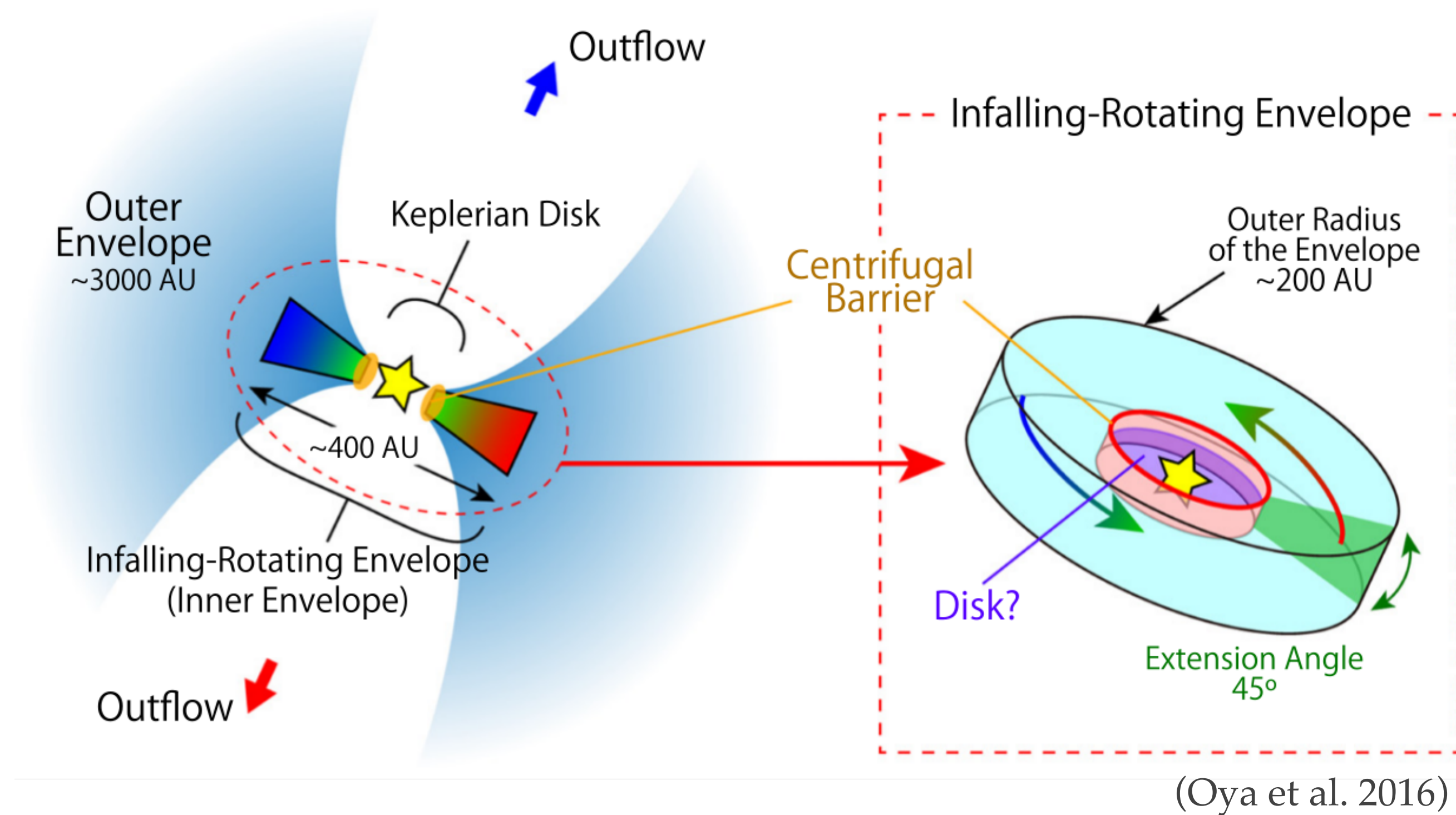
Formación estelar y planetaria

- ❖ Estrella de SP, probablemente con sistema planetario.
- ❖ Gran variedad de arquitectura de sistemas planetarios (Winn and Fabrycky, 2015).
- ❖ ALMA ha detectado evidencia de presencia de planetas en formación - Clase I o II.
- ❖ Formación planetaria empieza desde fases muy tempranas.



Formación estelar y planetaria

- ❖ Las primeras fases corresponden a las etapas de máxima acreción y mayor productividad de eyección

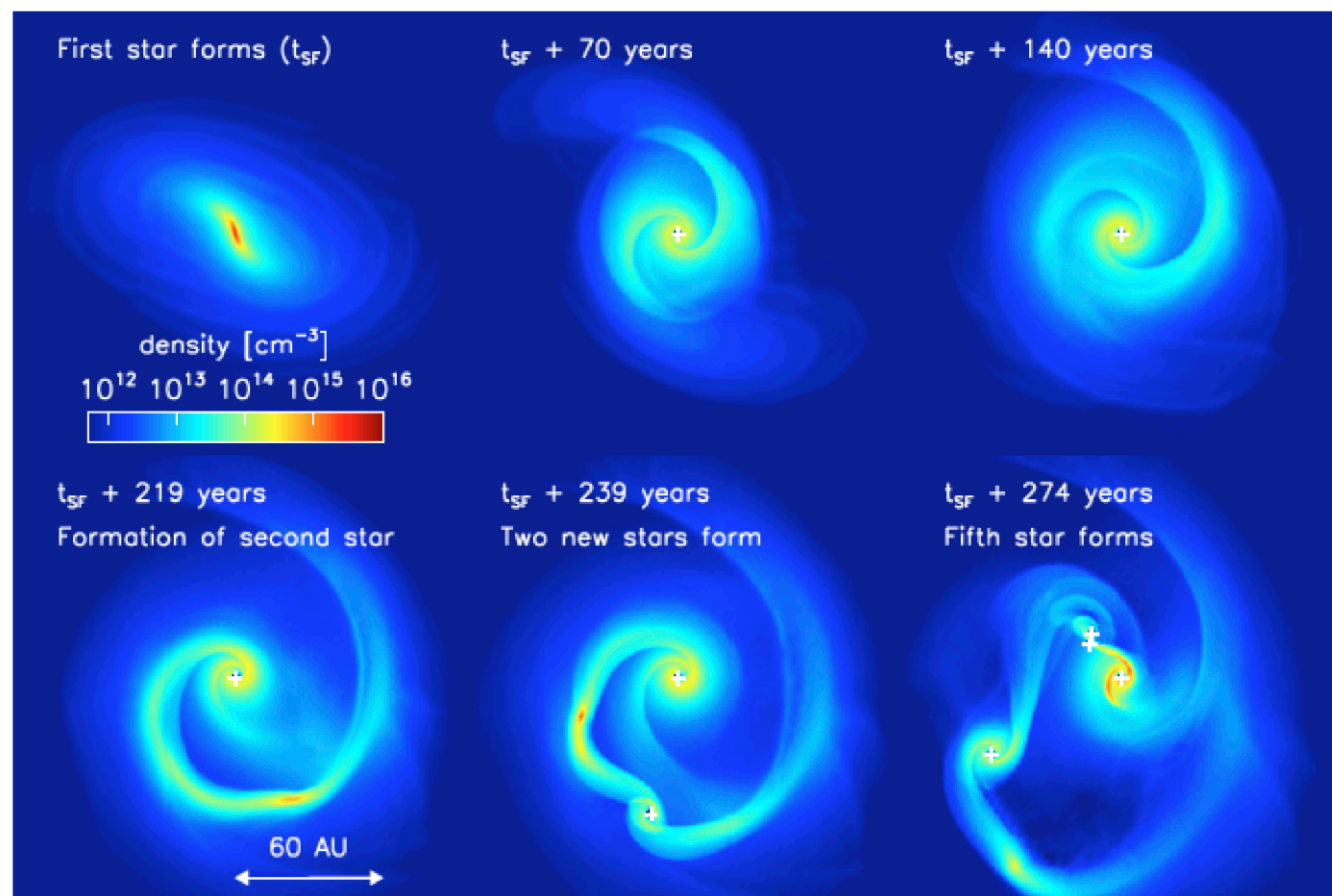


Formación estelar en sistemas múltiples

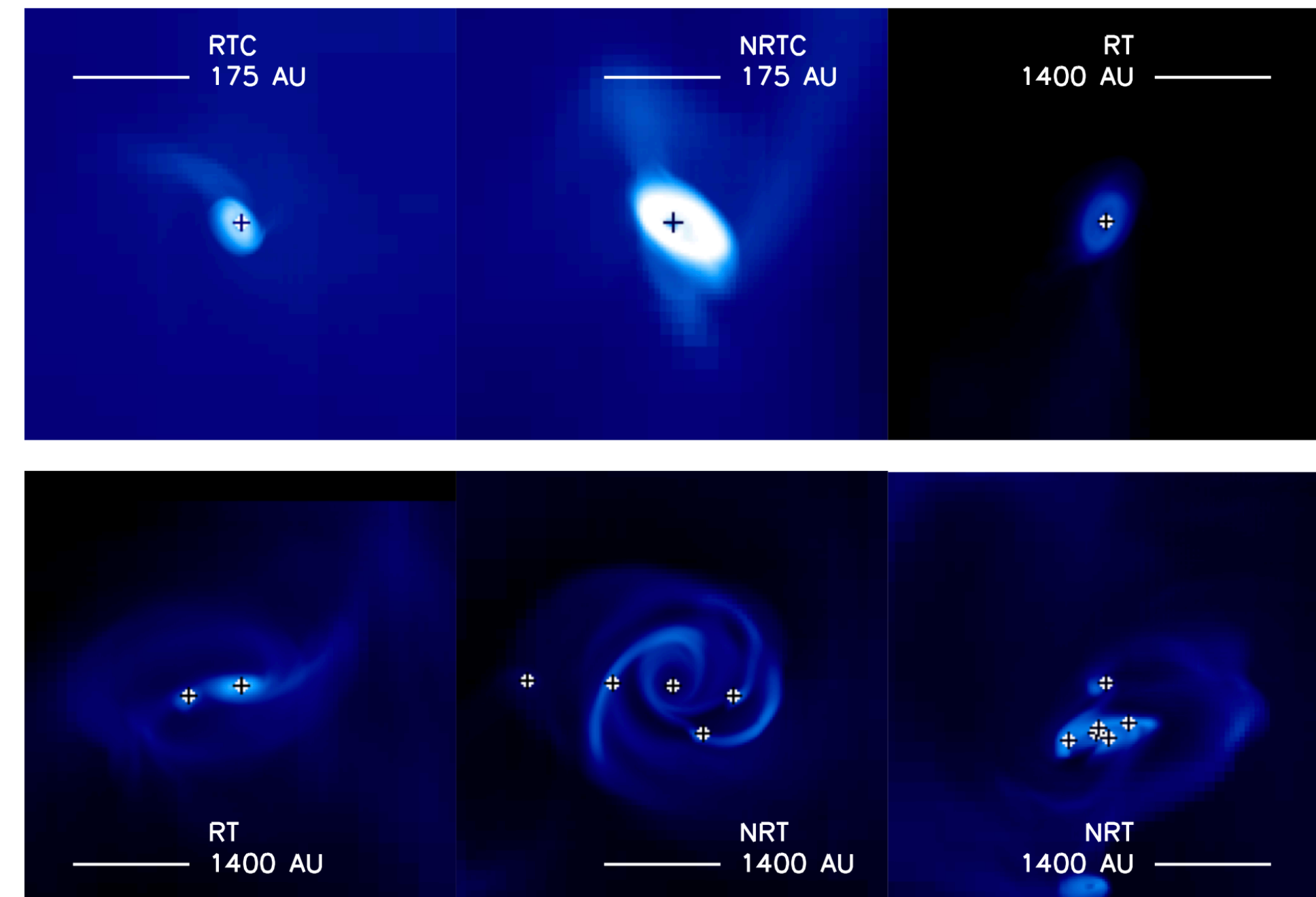
- ❖ Formación estelar ocurre frecuentemente en sistemas binarios o múltiples (e.g. Duchêne et al., 2007) .
- ❖ Entender como se forman y evolución temprana de sistemas estelares múltiples
- ❖ Dos teorías principales:
 - ★ Fragmentación por inestabilidad gravitacional de un disco previamente formado (Adams et al. 1989)
 - ★ Fragmentación turbulenta en la nube molecular madre (e.g. Goodwin et al., 2004; Padoan et al., 2007)

Formación estelar en sistemas múltiples

- ❖ Fragmentación por inestabilidad gravitacional de un disco previamente formado.
- ❖ Fragmentación turbulenta en la nube molecular madre.



Clark et al. 2011



Offner et al. 2010

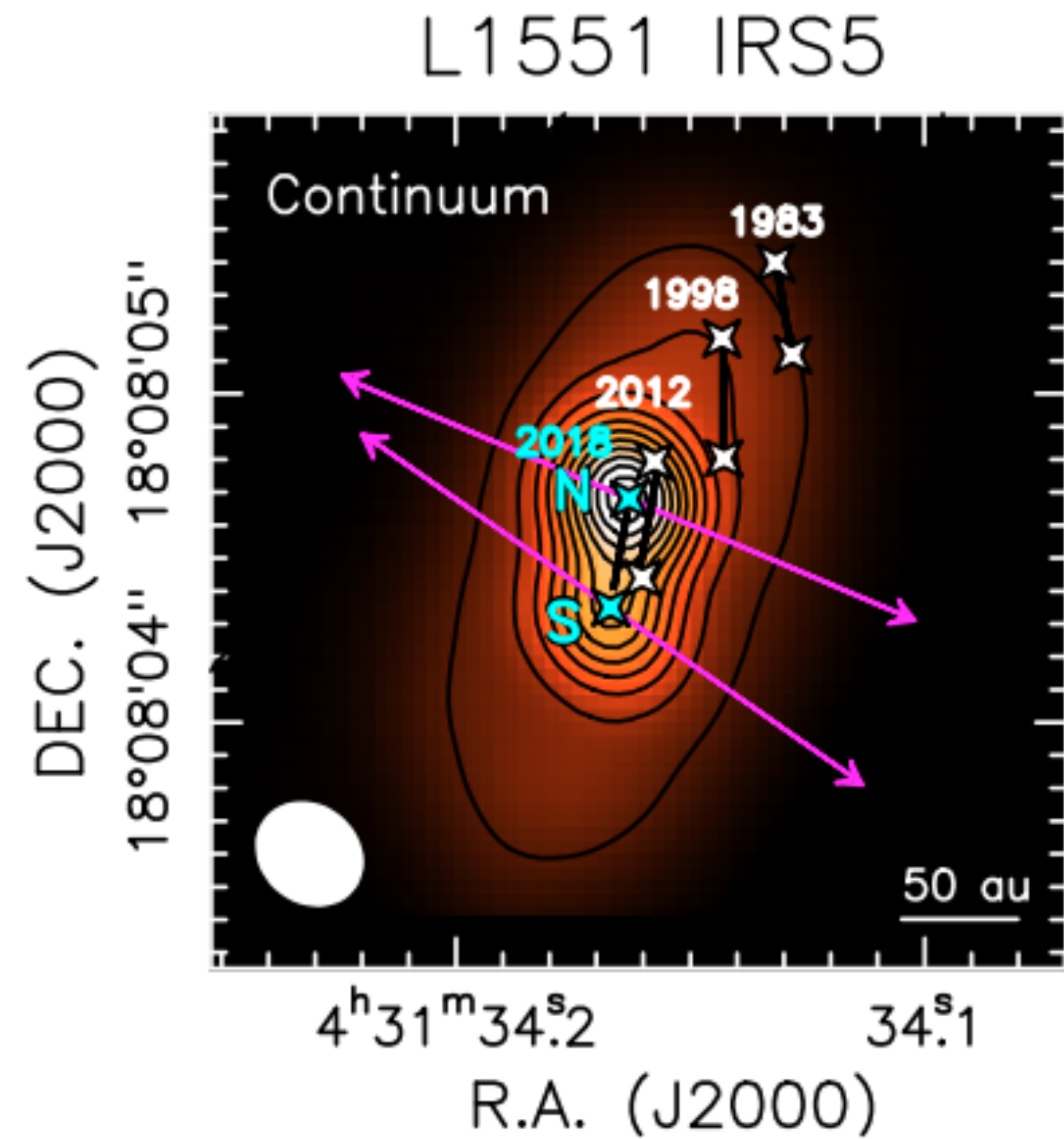
Descripción del Proyecto

Objetivos del Proyecto Doctoral

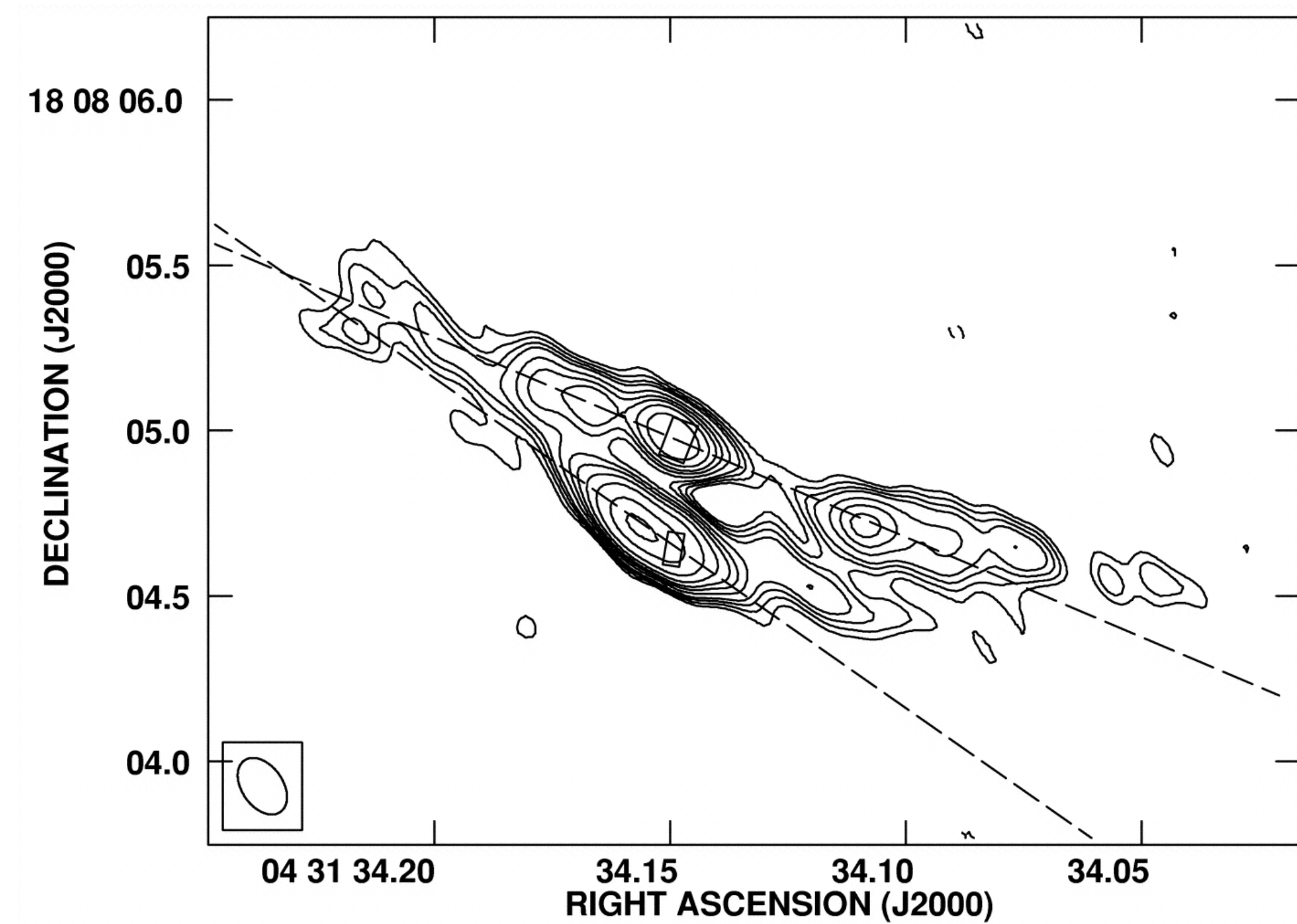
- ❖ **Caracterizar las arquitecturas de una muestra de sistemas múltiples jóvenes con la meta de distinguir entre los modelos teóricos que se proponen para explicar formación de sistemas múltiples.**
 - ➔ Orientación del plano orbital y el sentido de las órbitas.
 - ➔ Caracterizar la orientación de los discos alrededor de las estrellas individuales y su rotación.
 - ➔ Caracterizar el disco circumbinario (cinemática y rotación).
 - ➔ Establecer la dirección en los jets que emanan de la protoestrella.

Usando datos nuevos de continuo de $C^{18}O$ y SiO obtenidos con ALMA y datos de archivo del VLA.

Trabajos Previos

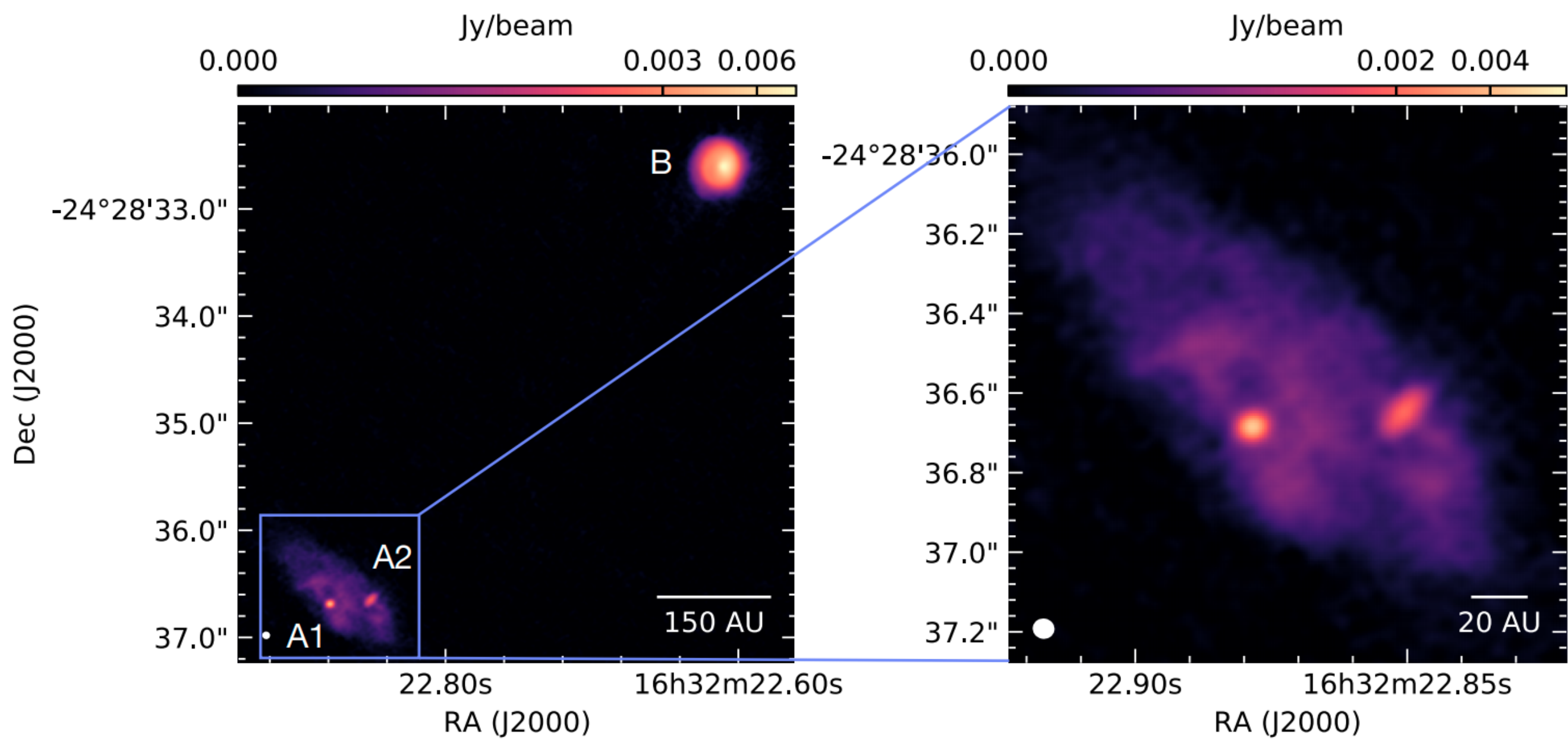


Bianchi et al. 2020
(inc. Durán)

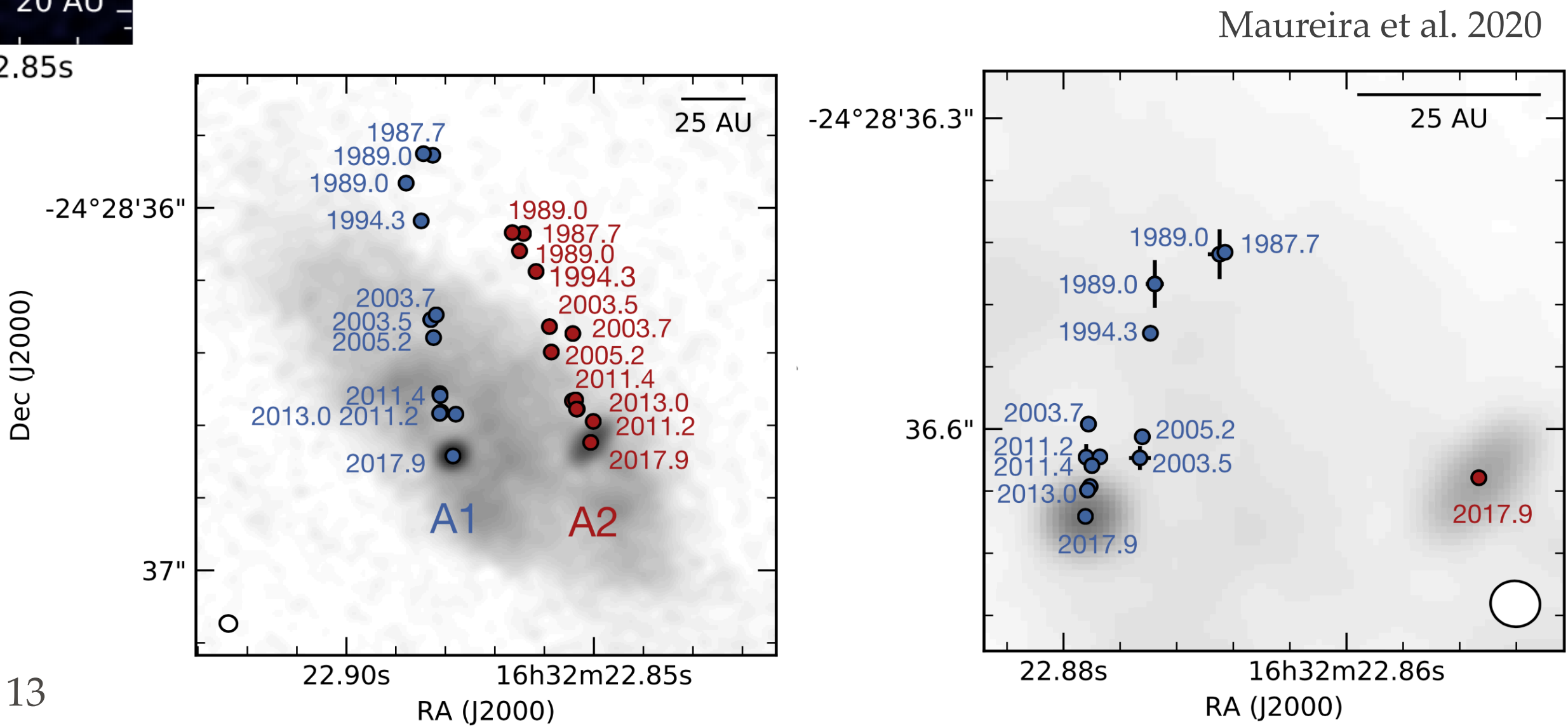


Rodríguez et al. 2003

Trabajos Previos



IRAS 16293-2422



Maureira et al. 2020

FAUST

- ❖ **Fifty AU ST**udy of the chemistry in the disk/envelope systems of Solar- like protostars.
- ❖ Proyecto grande de ALMA (100 horas).
- ❖ Caracterizar la composición química de una docena de protoestrellas (Clase 0 y I), a escalas espaciales desde 50 hasta 100 au.
- ❖ Resolución angular ~ 0.3 arcsec (resolución espacial de 50 au), permite separar las diferentes componentes (envolventes, disco, etc.)



Setup	Frecuencia (GHz)	Banda
1	214.0 - 219.0	6
	229.0 - 234.0	
2	242.5 - 247.5	6
	257.5 - 262.5	
3	85.0 - 89.0	3
	97.0 - 101.0	

PI's
Satoshi Yamamoto
Cecilia Ceccarelli
Claire Chandler
Claudio Codella
Nami Sakai

CoI's
Numerosos...
Incluyendo Durán, Caux, Loinard

Fuentes a estudiar

- ✓ Protoestrellas de Clase 0/I, dentro de 250 pc, $L \leq 25L_{\odot}$.
- Se seleccionaron 13 que abarcan una gran variedad de propiedades químicas.
- 6 de esa muestra son fuentes múltiples conocidas.

❖ L1551 IRS5

❖ VLA 1623A

❖ GSS30 (LFAM1)

❖ RCrA IRS7B

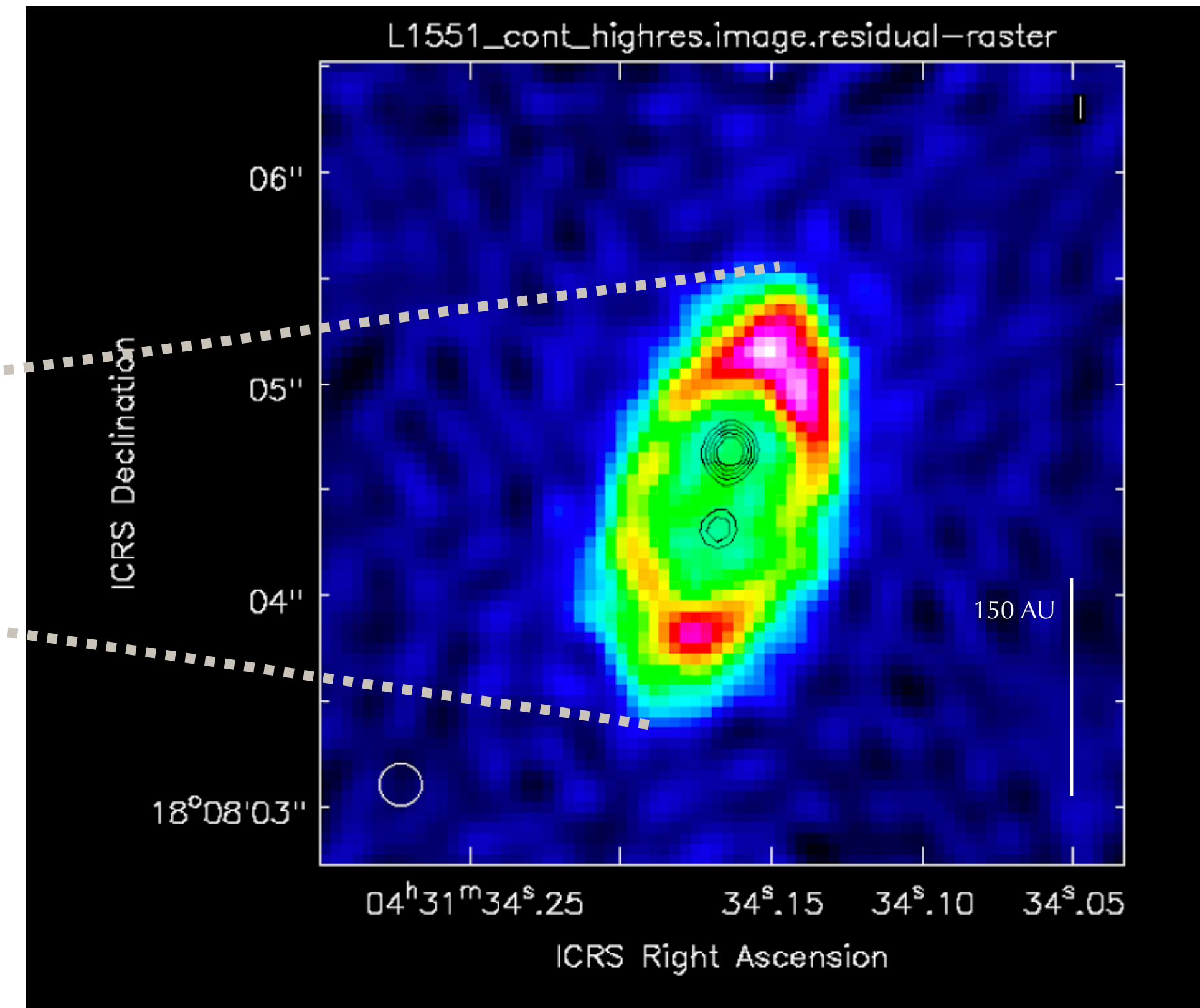
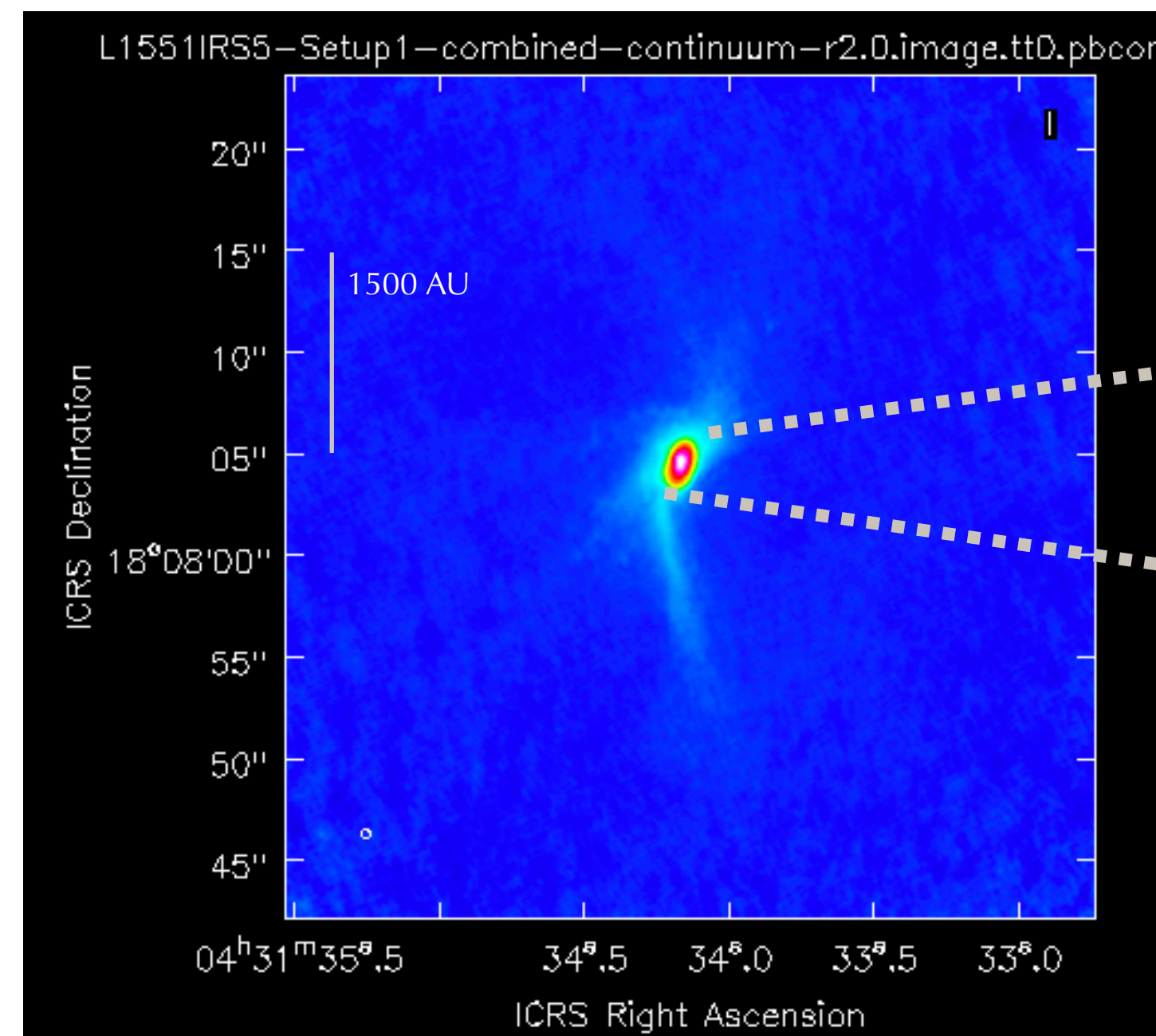
❖ BHB07-11 (B59)

❖ NGC 1333 IRAS4A

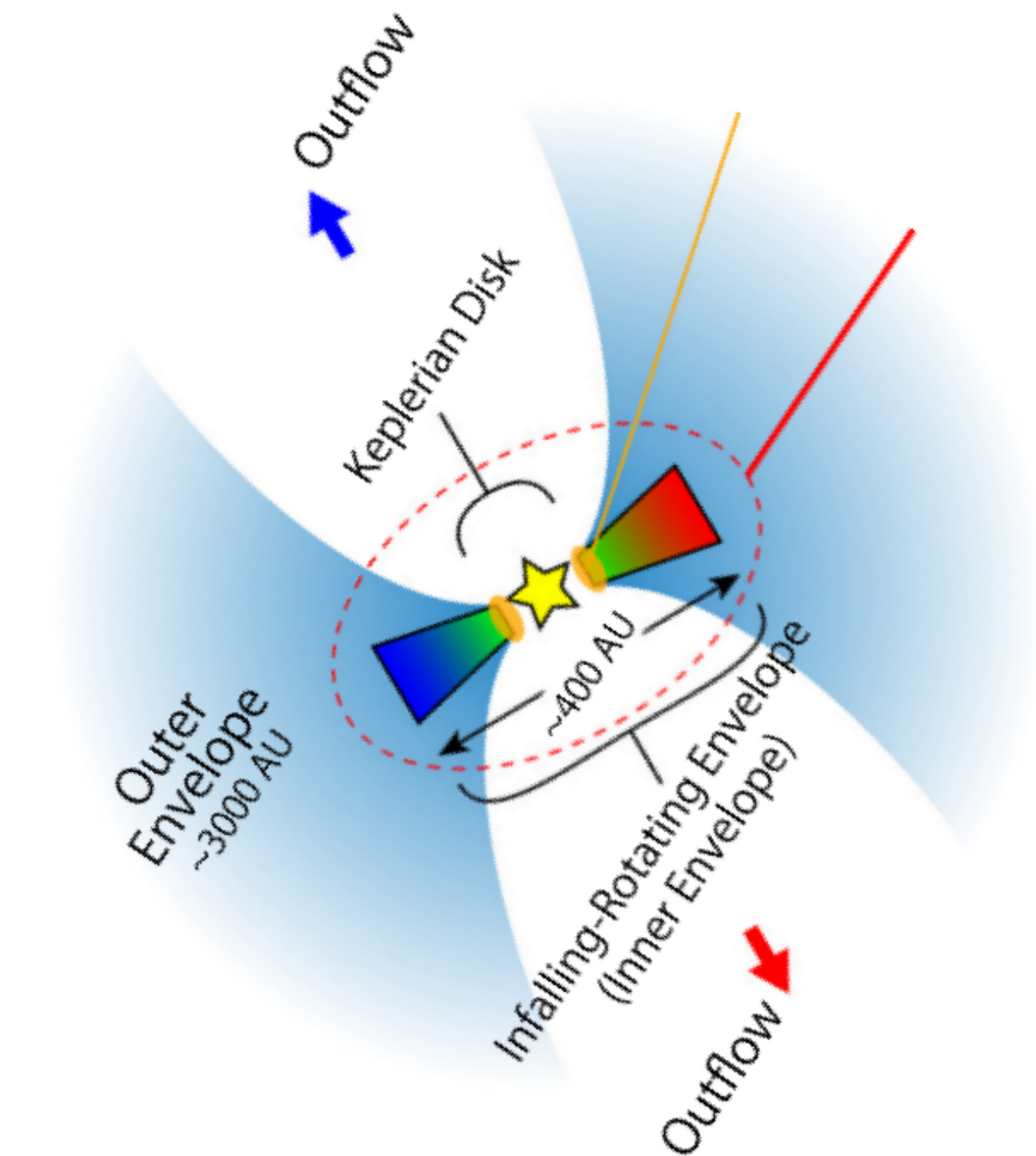
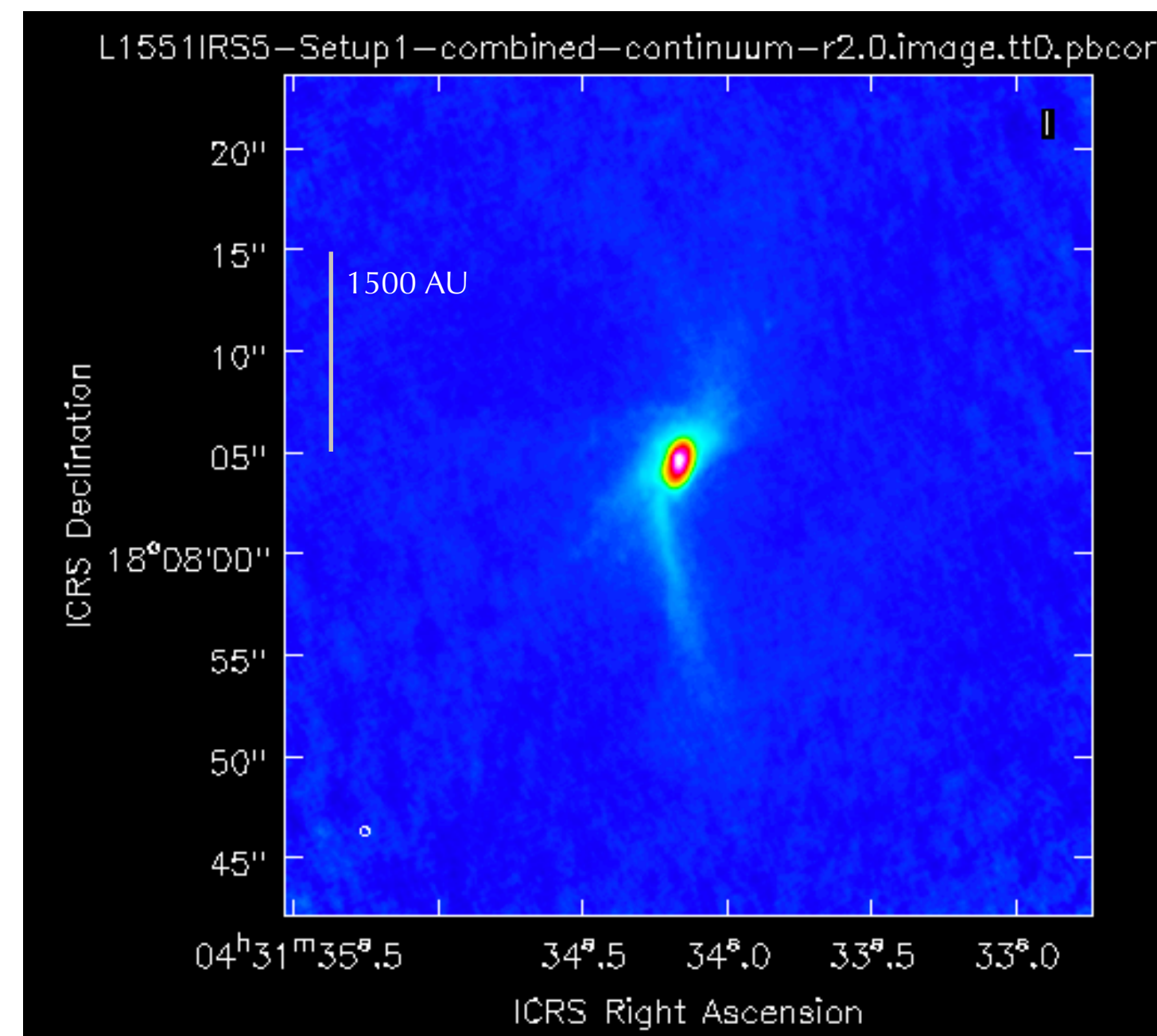
Actividades a desarrollar y breve metodología

- ❖ Los datos de ALMA están siendo calibrados (incluyendo autocalibración) usando las técnicas más recientes por otros miembros de la colaboración (Dra. Claire Chandler, NRAO).
- ❖ **Obtener diferentes imágenes de diferentes profundidades y resoluciones angulares que permitan caracterizar las estructuras presentes en los sistemas a diferentes escalas.**
- ❖ Incluir datos de C^{18}O y SiO para caracterizar outflows, jets y cinemática.
- ❖ Censo de las observaciones resueltas que existen, VLA y ALMA. Calibrar datos y hacer imágenes correspondientes - trazar movimientos orbitales de los sistemas, orientación de jets, orientación y sentido de rotación de los discos.
- ❖ El papel que juega la presencia de sistemas múltiples para sus estructuras.

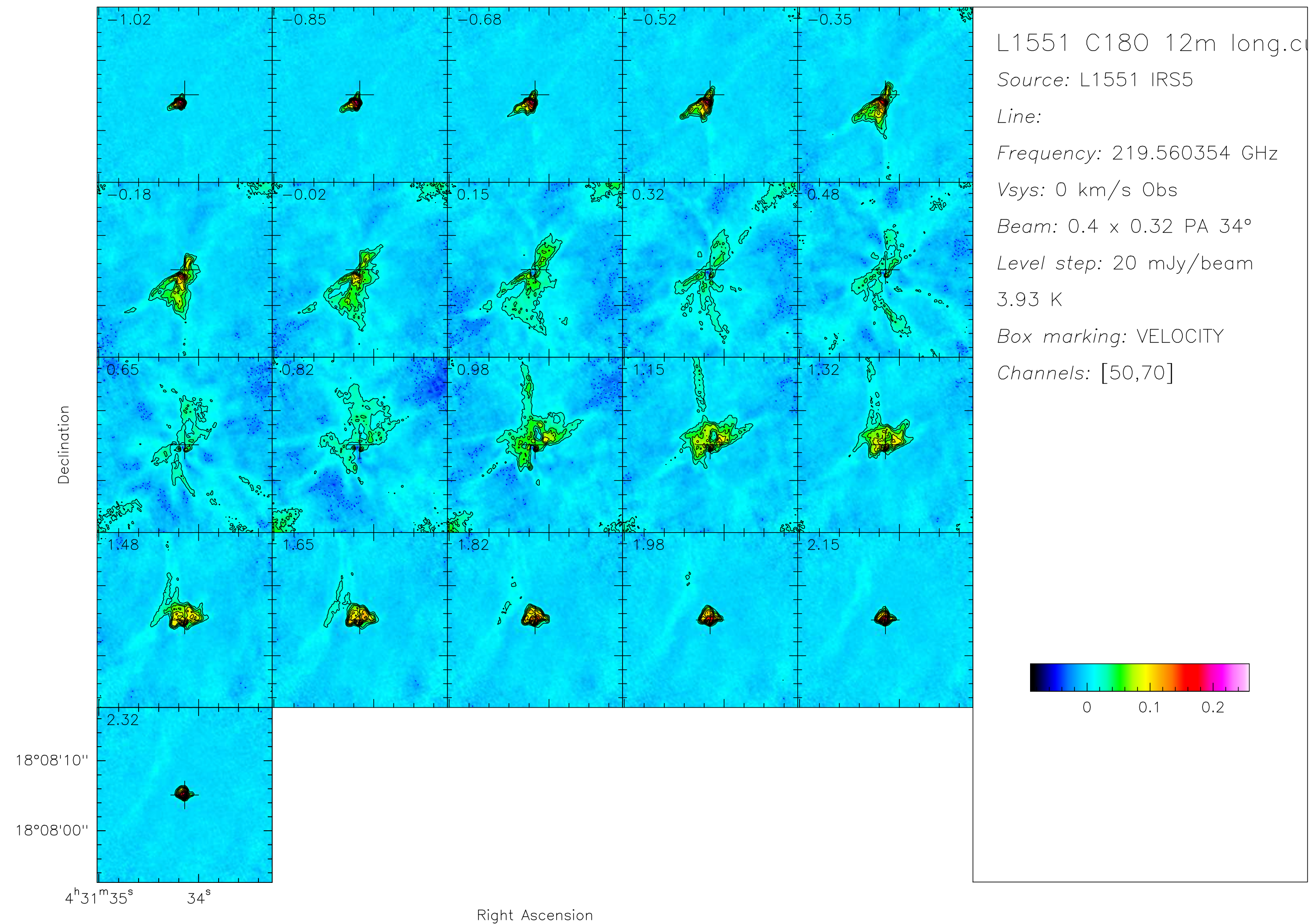
Actividades a desarrollar y breve metodología



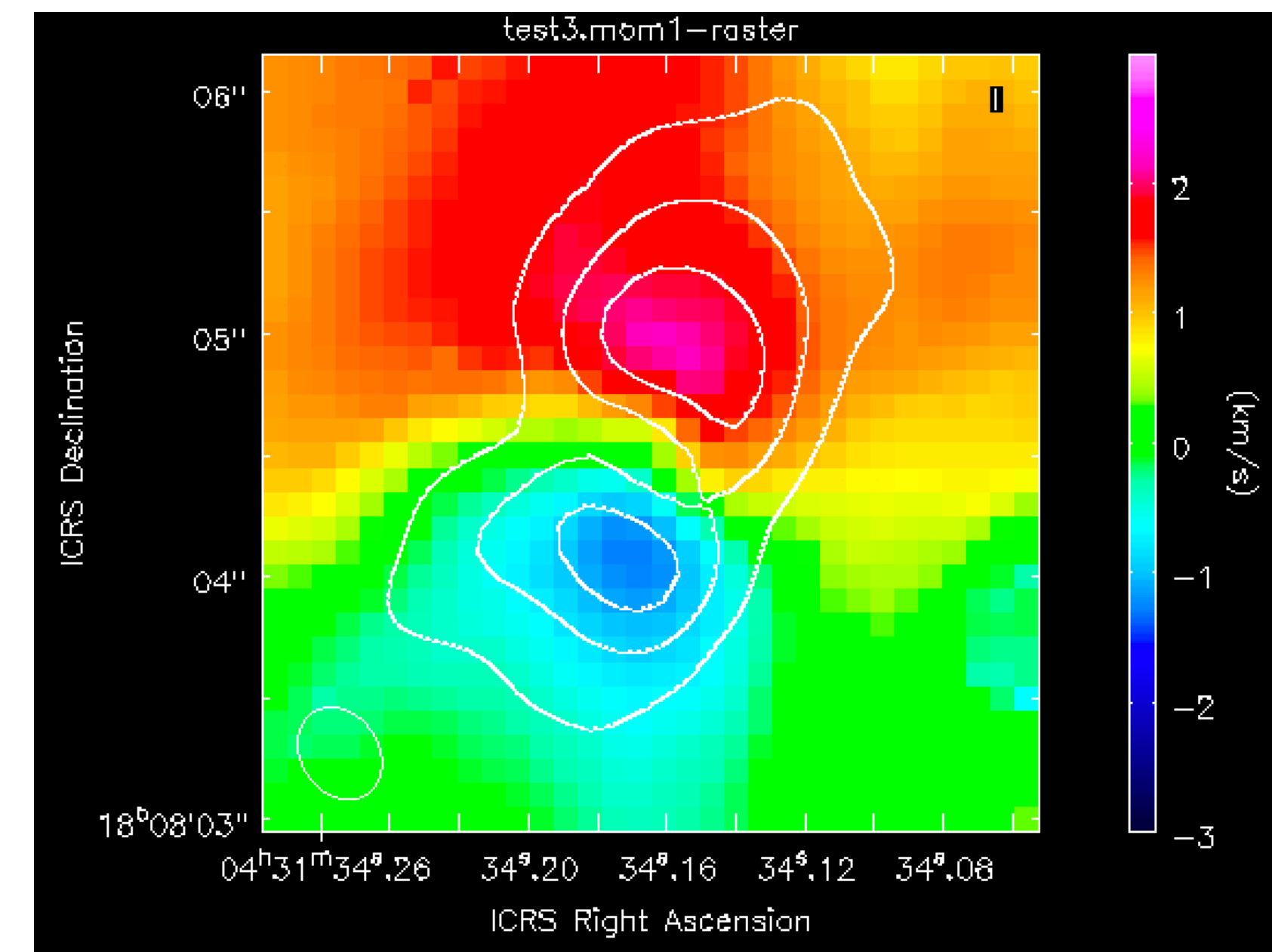
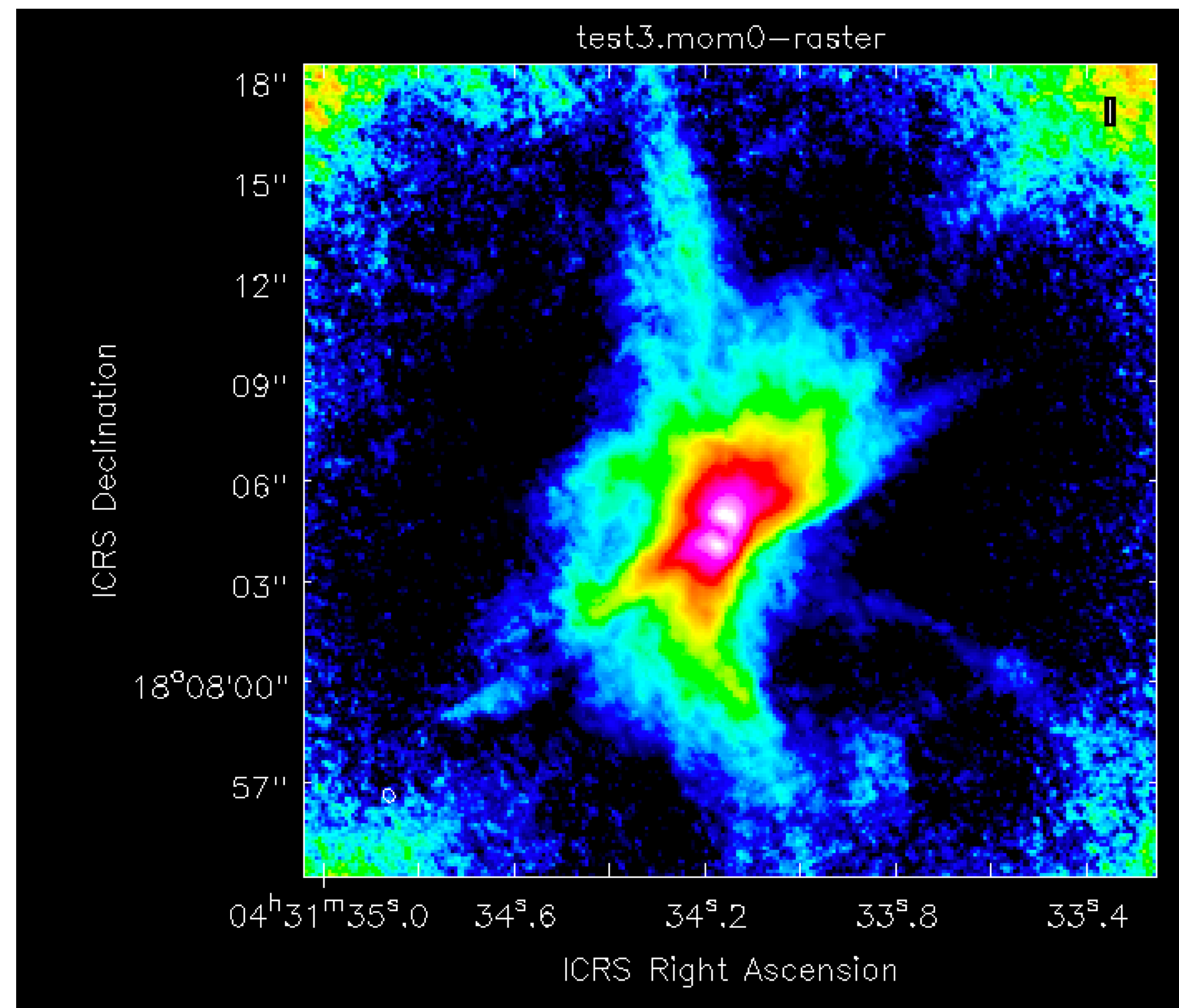
Actividades a desarrollar y breve metodología



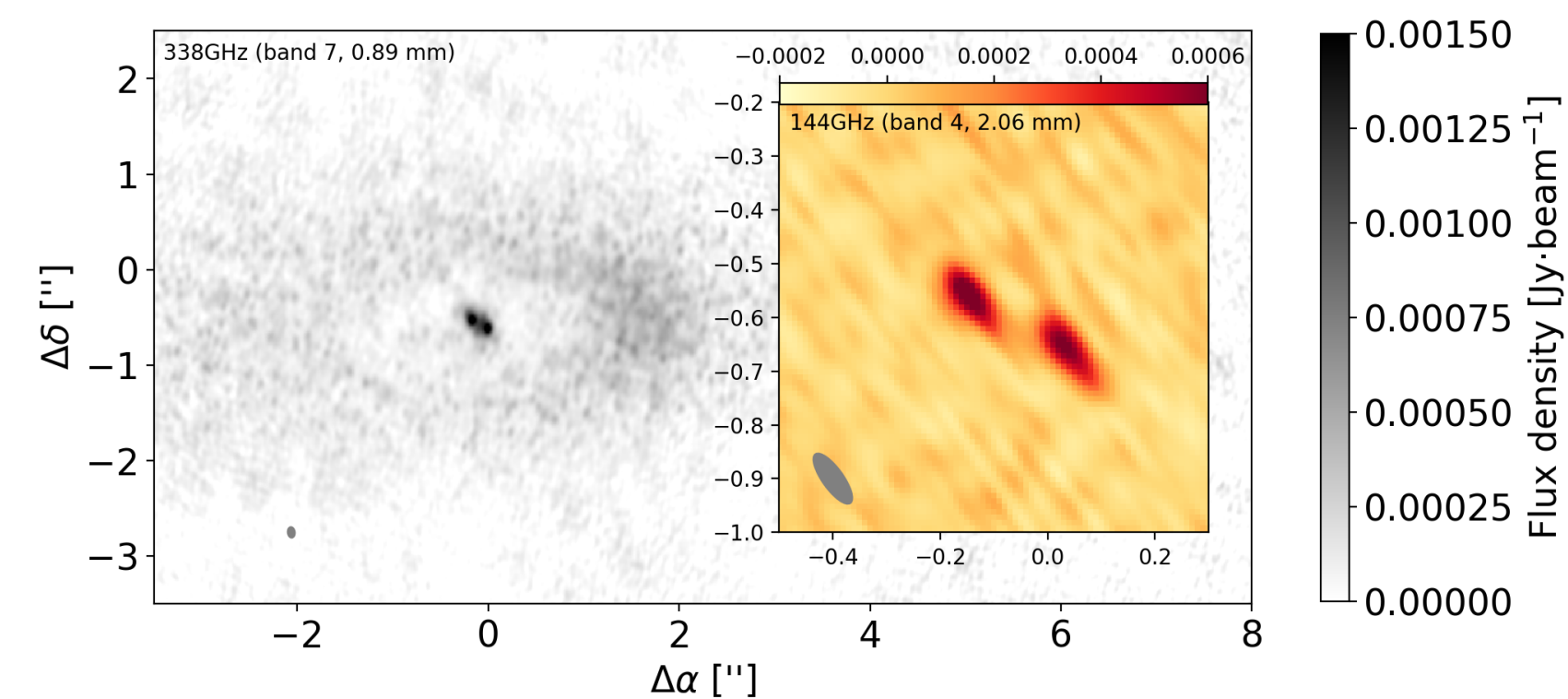
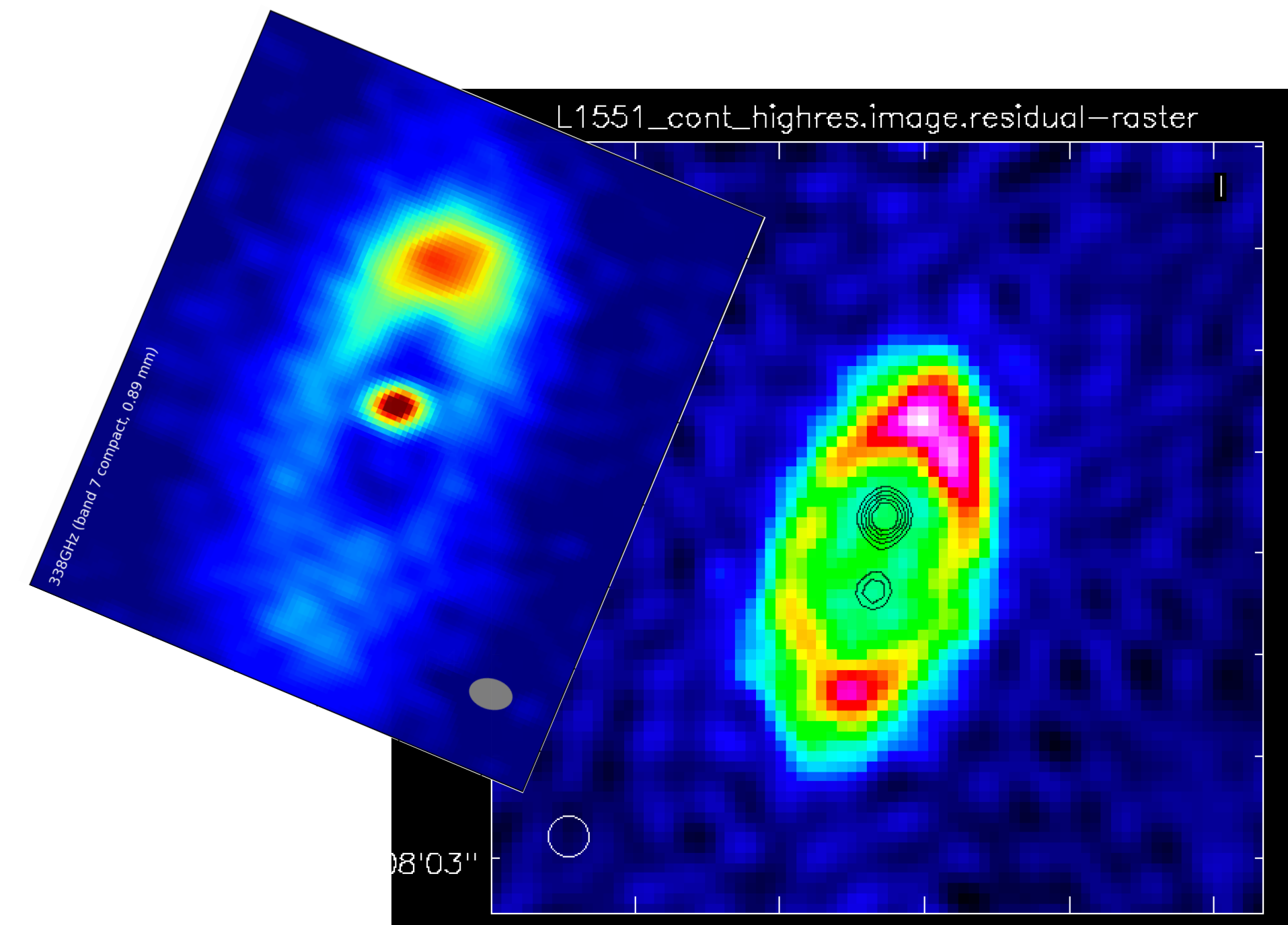
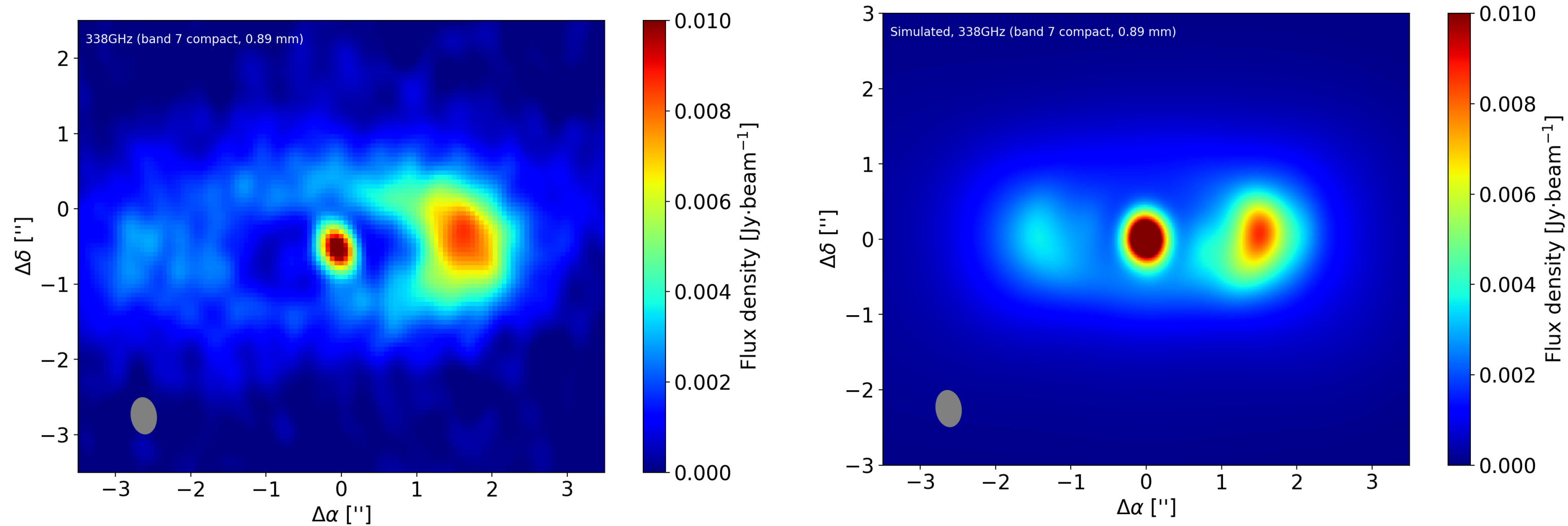
Actividades a desarrollar y breve metodología



Actividades a desarrollar y breve metodología



Actividades a desarrollar y breve metodología



Actividades a desarrollar y breve metodología

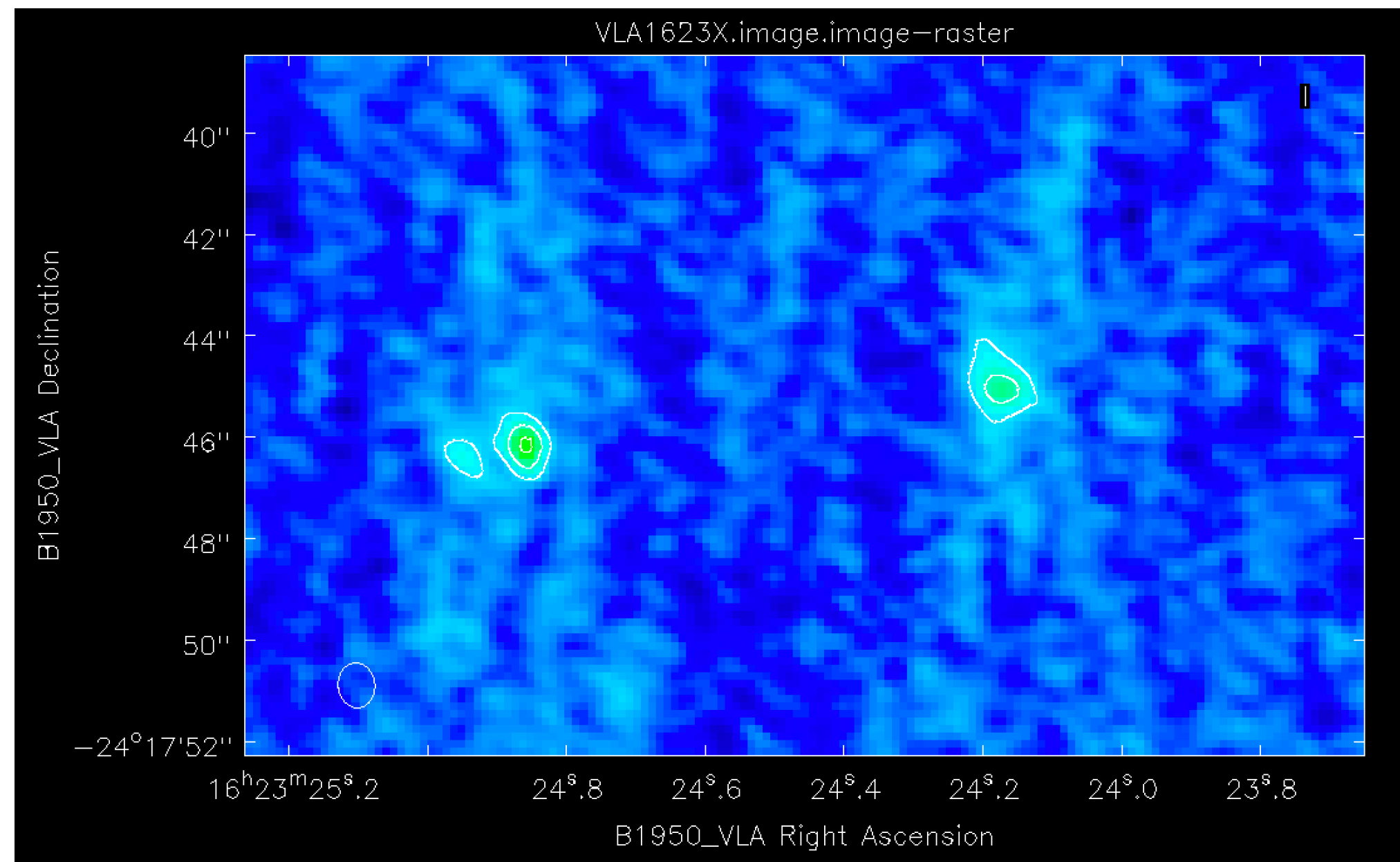
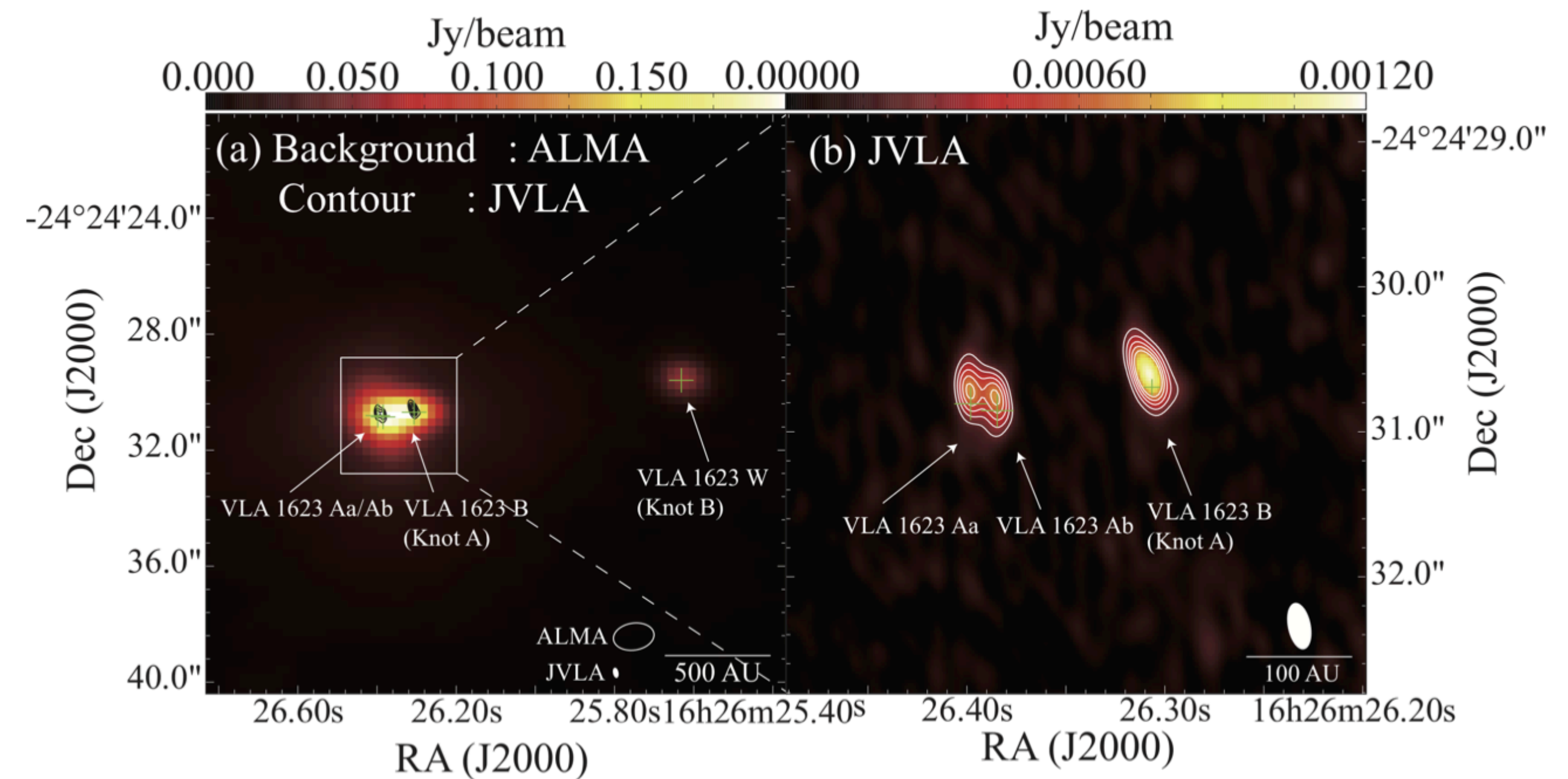


Imagen obtenida a partir de datos de
archivo del VLA de 1997



Hara et al. 2020

Cronograma

❖ Semestre 1:	❖ Semestre 2:	❖ Semestre 3:	❖ Semestre 4:
▸ Revisión de literatura. ▸ Desarrollo y defensa del anteproyecto de investigación. ▸ Artículo publicado como coautora, Bianchi et al. 2020.	▸ Recopilación de datos de archivo del VLA para la fuente VLA1623A. ▸ Calibración de datos de archivo del VLA de la fuente VLA1623A. ▸ Participación en la reunión anual de FAUST (en línea) ▸ Obtener imágenes de las observaciones de FAUST en el continuo para L1551. ▸ Desarrollo y defensa del anteproyecto de investigación. ▸ Artículo publicado como coautora, Okoda et al. 2021.	▸ Recopilación de datos de archivo del VLA para la fuente L1551. ▸ Calibración de datos de archivo del VLA de la fuente L1551. ▸ Obtener imágenes de las observaciones de FAUST en el continuo para VLA1623A. ▸ Procesamiento y análisis de L1551 y VLA1623A. ▸ Iniciar redacción de artículos sobre el análisis del continuo en VLA1623A y L1551. ▸ Presentar examen de candidatura.	▸ Recopilación de datos de archivo del VLA para la fuente NGC1333. ▸ Calibración de datos de archivo del VLA de la fuente NGC1333. ▸ Publicar artículos sobre el análisis del continuo en L1551 y VLA 1623A. ▸ Participación en un congreso internacional (plática). ▸ Revisar archivos de interferómetros centimétricos y milimétricos para observaciones de GSS30, BHB07 y RCrA IRS7B (si el tiempo lo permite).

Cronograma

❖ Semestre 5:

- Obtener imágenes de las observaciones de FAUST en el continuo para NGC1333.
- Procesamiento y análisis de NGC1333.
- Calibrar datos de archivos de GSS30, BHB07 y RCrA IRS7B (si el tiempo lo permite).
- Estancia de trabajo con Emmanuel Caux en Francia sobre el uso de técnicas de modelización del continuo.

❖ Semestre 6:

- Publicar artículos sobre el análisis del continuo en NGC1333.
- Juntar la información sobre las arquitecturas de los seis sistemas con la información de las observaciones moleculares de FAUST.
- Iniciar artículo global sobre la relación entre las arquitecturas y las demás propiedades (en particular químicas) de las fuentes múltiples en FAUST.
- Posibilidad de coloquio (IRyA).

❖ Semestre 7:

- Publicar artículo global sobre la relación entre las arquitecturas y las demás propiedades (en particular químicas) de las fuentes múltiples en FAUST.
- Iniciar redacción de Tesis.

❖ Semestre 8:

- Terminar redacción de Tesis y llevar a cabo la defensa.

Productos esperados:

- ❖ **Artículo de primera autora de análisis de continuo, C¹⁸O y SiO para VLA1623A.**
- ❖ **Artículo(s) de primera autora de análisis de continuo, C¹⁸O y SiO para L1551.**
- ❖ **Artículo de primera autora de análisis de continuo, C¹⁸O y SiO para NGC1333.**
- ❖ Artículos de primera o segunda autora de análisis de continuo, C¹⁸O y SiO para GSS30, BHB07 y RCrA.
- ❖ Artículo de primera autora acerca de características globales de estructuras en sistemas múltiples.
- ❖ Además participaciones en congresos internacionales y posibilidad de coloquio.

Referencias

- Adams, F. C., Lada, C. J., and Shu, F. H. (1987). Spectral Evolution of Young Stellar Objects. *ApJ*, 312:788.
- Adams, F. C., Ruden, S. P., and Shu, F. H. (1989). Eccentric Gravitational Instabilities in Nearly Keplerian Disks. *ApJ*, 347:959.
- ALMA Partnership, Brogan, C. L., Pérez, L. M., and et al. (2015). The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region. *ApJL*, 808(1):L3.
- Andre, P., Ward-Thompson, D., and Barsony, M. (1993). Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps. *ApJ*, 406:122.
- Arce, H. G., Shepherd, D., Gueth, F., Lee, C. F., Bachiller, R., Rosen, A., and Beuther, H. (2007). Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions. In Reipurth, B., Jewitt, D., and Keil, K., editors, *Protostars and Planets V*, page 245.
- Bianchi, E., Chandler, C. J., Ceccarelli, C., Codella, C., Sakai, N., López-Sepulcre, A., and et al. (2020). FAUST I. The hot corino at the heart of the prototypical Class I protostar L1551 IRS5. *MNRAS*.
- Ceccarelli, C. (2007). Molecular complexity in solar type protostars: the Hot Corinos. In *Molecules in Space and Laboratory*, page 1.
- Cruz-Sáenz de Miera, F., Kóspál, A., and et al. (2019). Resolved ALMA Continuum Image of the Circumbinary Ring and Circumstellar Disks in the L1551 IRS 5 System. *ApJL*, 882(1):L4.
- Duchêne, G., Bontemps, S., Bouvier, J., André, P., Djupvik, A. A., and Ghez, A. M. (2007). Multiple protostellar systems. II. A high resolution near-infrared imaging survey in nearby star-forming regions. *Astronomy and Astrophysics*, 476(1):229–242.
- Goodwin, S. P., Whitworth, A. P., and Ward-Thompson, D. (2004). Simulating star formation in molecular cloud cores. I. The influence of low levels of turbulence on fragmentation and multiplicity. *Astronomy and Astrophysics*, 414:633–650.
- Hara, C. and et al. (2020). Misaligned Twin Molecular Outflows From Class-0 Proto-stellar Binary System VLA 1623A Unveiled by ALMA. *arXiv e-prints*, page arXiv:2010.06825.
- Lim, J., Yeung, P. K. H., Hanawa, T., Takakuwa, S., Matsumoto, T., and Saigo, K. (2016). Rotationally driven Fragmentation in the Formation of the Binary Protostellar System L1551 IRS 5. *ApJ*, 826(2):153.
- Maureira, M. J., Pineda, J. E., Segura-Cox, D. M., Caselli, P., Testi, L., Lodato, G., Loinard, L., and Hernández-Gómez, A. (2020). Orbital and Mass Constraints of the Young Binary System IRAS 16293-2422 A. *ApJ*, 897(1):59.
- Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., and Yamamoto, S. (2016). Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA. *ApJ*, 824(2):88.
- Padoan, P., Nordlund, A., Kritsuk, A. G., Norman, M. L., and Li, P. S. (2007). Two Regimes of Turbulent Fragmentation and the Stellar Initial Mass Function from Primordial to Present-Day Star Formation. *ApJ*, 661(2):972–981.
- Reipurth, B., Clarke, C. J., and et al. (2014). Multiplicity in Early Stellar Evolution. In Beuther, H., Klessen, R. S., Dullemond, C. P., and Henning, T., editors, *Protostars and Planets VI*, page 267.
- Rodríguez, L. F., Porras, A., Claussen, M. J., Curiel, S., Wilner, D. J., and Ho, P. T. P. (2003). The Binary Jet in L1551 IRS 5. *ApJL*, 586(2):L137–L139.
- Sakai, N. and Yamamoto, S. (2013). Warm Carbon-Chain Chemistry. *Chemical Reviews*, 113(12):8981–9015.
- Tobin, J. J., Kratter, K. M., Persson, M. V., Looney, L. W., Dunham, M. M., and et al. (2016a). A triple protostar system formed via fragmentation of a gravitationally unstable disk. *Nat*, 538(7626):483–486.
- Tobin, J. J., Looney, L. W., Li, Z.-Y., Chandler, C. J., Dunham, M. M., and et al. (2016b). The VLA Nascent Disk and Multiplicity Survey of Perseus Protostars (VANDAM). II. Multiplicity of Protostars in the Perseus Molecular Cloud. *ApJ*, 818(1):73.
- Winn, J. N. and Fabrycky, D. C. (2015). The occurrence and architecture of exoplanetary systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53(1):409–447.
- Wootten, A. (1989). The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star? *ApJ*, 337:858.

