



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA (IRyA)
DOCTORADO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

MASAS DINÁMICAS DE OBJETOS JÓVENES BINARIOS EN REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR CERCANAS

Proyecto de doctorado que presenta
NORIDA JAZMÍN ORDÓÑEZ TORO

Directores de Tesis:
Dr. LAURENT LOINARD
Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA)

Dr. SERGIO A. DZIB
Millimeter- and submillimeter group
Max-Planck-Institut für Radioastronomie

1. Introducción

Comprender el origen de las estrellas es uno de los tantos objetivos fundamentales de la astrofísica moderna. La formación de estrellas es uno de los campos más activos en el estudio de la astrofísica estelar. Las estrellas se forman cuando núcleos de nubes moleculares frías y densas con la suficiente masa colapsan bajo la acción de su propia fuerza gravitacional. Una nube de gas molecular en la que se producen inestabilidades por su interacción con el entorno, ya sea con otras nubes o con el medio interestelar, origina regiones de mayor y menor densidad que comienzan a comprimirse y fragmentarse. Bajo condiciones típicas del medio interestelar, para que una nube de gas colapse su masa mínima debe ser de aproximadamente $0.08 M_{\odot}$ (e.g., LeBlanc, 2010). Toda la evolución de una estrella desde el nacimiento hasta la muerte está gobernada por procesos gravitacionales e hidrodinámicos, por lo tanto, la cantidad de masa que contiene juega un papel fundamental a lo largo de su vida. Estudiar la formación estelar nos permite entender la dinámica interna de las nubes moleculares, conocer las condiciones iniciales de la evolución estelar y, por lo tanto, ampliar nuestro conocimiento de la historia y evolución de nuestro universo.

En particular, las estrellas que se encuentran en sus primeras etapas de desarrollo, se denominan *objetos estelares jóvenes* o *Young Stellar Objects* (YSOs). Estas estrellas evolucionarán hasta alcanzar la secuencia principal en el diagrama de Hertzsprung-Russell (HR), y cuando eso suceda comenzarán a fusionar hidrógeno. Esta evolución en la pre-secuencia principal sigue un esquema generalmente aceptado por la comunidad astronómica, aunque aún se tienen detalles que hacen falta comprender. Los YSOs se caracterizan por estar fuertemente embebidos entre las nubes

moleculares, dentro del gas y el polvo interestelar circundante. Por lo tanto, las observaciones en longitudes de onda en el rango del óptico están limitadas por el efecto de la extinción del polvo y, por ende, también estudiados en otras longitudes de onda como infrarrojo, rayos-X y radio.

Los YSOs se clasifican de acuerdo a su etapa evolutiva, basada en la pendiente de su distribución espectral de energía (SED por su sigla en inglés) en el infrarrojo. Esta clasificación propuesta por Lada (1987) y André et al. (1993) refleja aproximadamente la evolución de estrellas jóvenes desde su nacimiento (clase 0) hasta los YSOs más evolucionados en la pre-secuencia principal (clase III) como se resume en la figura 1.

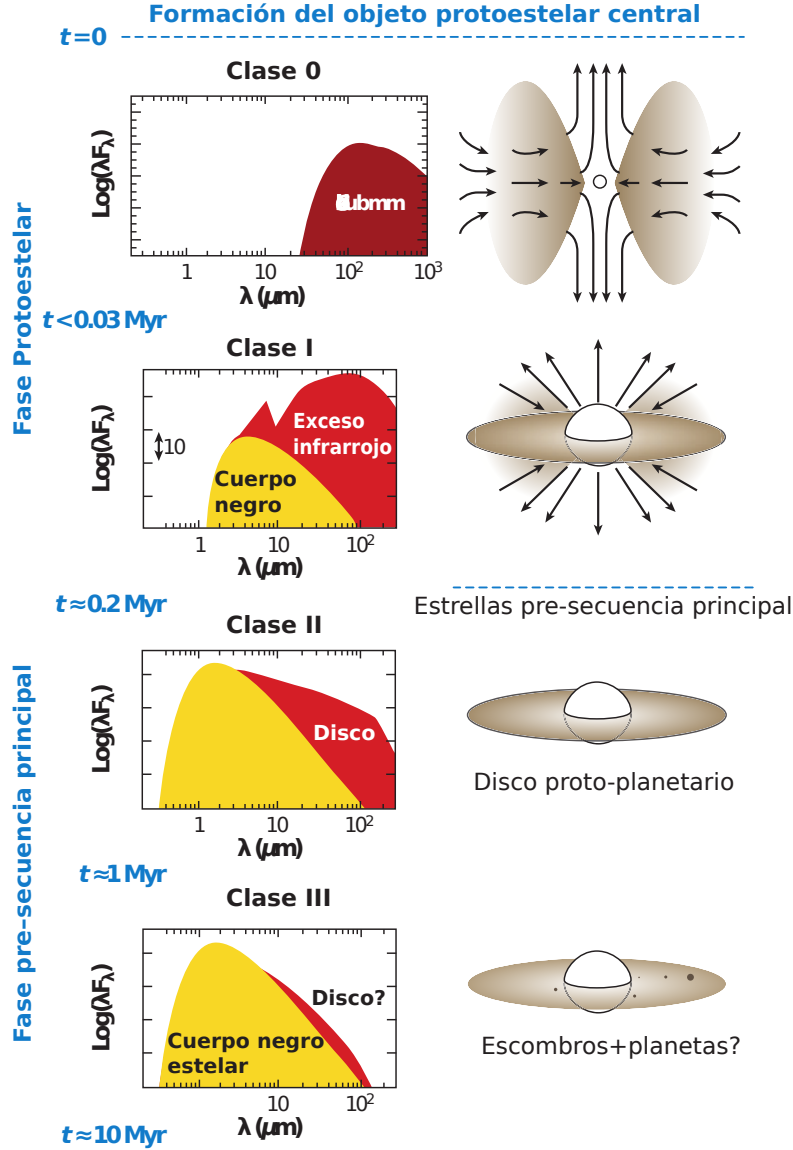


Fig. 1: Esquema representativo de las etapas evolutivas de los objetos estelares jóvenes. La columna izquierda indica la distribución espectral de energía y la columna derecha muestra un esquema del sistema en cada etapa. Imagen basada en Dauphas and Chaussidon (2011), traducida al español.

En general los objetos estelares jóvenes emiten radiación electromagnética a diferentes longitudes de onda. Particularmente en radio, las observaciones en el continuo hacia las regiones de formación estelar son relevantes porque proporcionan información sobre la naturaleza de la emisión radio de los YSOs, su actividad coronal estelar y el origen de sus campos magnéticos. Los procesos

para explicar el origen de la emisión de radio en los YSOs muestran que esta emisión es generada por la aceleración de partículas cargadas. Por ejemplo, la radiación de naturaleza no térmica generada por la interacción de partículas cargadas con campos magnéticos, donde estas partículas como por ejemplo electrones son acelerados siguiendo trayectorias helicoidales a lo largo de las líneas del campo magnético. Dependiendo de la velocidad de las partículas el fenómeno recibe diferentes nombres: *sincrotrón*, *girosincrotrón* y *ciclotrón*, cuando la velocidad es ultra-relativista, moderadamente-relativista y no-relativista, respectivamente.

Las observaciones de YSOs en longitudes de onda de radio son importantes porque nos permiten obtener información relevante acerca de estos objetos que no se logra con otras longitudes de onda. Para la observación en el rango de radio se usan los instrumentos llamados **radio interferómetros**, los cuales son arreglos de antenas, es decir combinaciones de varios radiotelescopios individuales para formar un equivalente a un radiotelescopio de mayor tamaño. Estos instrumentos funcionan mediante la técnica de interferometría, que consiste en combinar las señales de varios radiotelescopios individuales que observan el mismo objeto. Así se consigue obtener una imagen de mejor resolución y de esta forma se adquieren datos astrométricos muy precisos que permiten estudiar los movimientos de los YSOs. Actualmente estos instrumentos son la mejor opción para la observación de YSOs porque el medio interestelar es en gran medida transparente a estas longitudes de onda. Las características de estos interferómetros, permiten incluso estudiar los YSOs cuando se presentan como sistemas estelares múltiples, es decir, que tienen dos o más componentes. Estos sistemas son buenos laboratorios para estudiar a las estrellas, dado que se forman de la misma nube de gas y polvo, y por lo tanto, comparten ciertas propiedades físicas como edad y metalicidad. Cuando el sistema estelar se compone de dos estrellas, se conoce como **sistema binario**, donde las componentes se encuentran orbitando entre sí alrededor de un centro de gravedad común.

El estudio del movimiento orbital de estrellas binarias tiene gran relevancia porque permite calcular de forma directa uno de los parámetros más importantes de las estrellas, que es la masa. Conocer la masa estelar es fundamental para la astrofísica, ya que, de ésta depende por ejemplo, los mecanismos de generación de energía de la estrella, a la vez que permite modelar su estructura y evolución estelar. Si conocemos las distancias a las que se encuentran estas estrellas, su separación angular nos permite calcular la longitud de la distancia que las separa, y si medimos su período orbital a partir del análisis de la variación del ángulo de posición con respecto al tiempo, es posible calcular la suma de las masas de ambas componentes utilizando la formulación de Newton de la tercera ley de Kepler. Las masas de las componentes individuales se pueden determinar observando los movimientos de las dos estrellas respecto al centro de masa (Carroll and Ostlie, 1996; Karttunen et al., 2007).

2. Antecedentes y Motivación

Conocer las propiedades básicas de estrellas jóvenes como la distancia, masa, luminosidad, temperatura efectiva, etc., nos ayuda a comprender una de las áreas más importantes en astronomía que es la formación estelar. La astrometría de alta precisión nos permite determinar de la manera más directa dos de estos parámetros; la distancia y, en el caso de sistemas binarios, la masa. De hecho, trabajos astrométricos dedicados a unos cuantos sistemas binarios muestran que los modelos existentes de evolución estelar parecen subestimar las masas estelares (Azulay et al., 2015; Mathieu et al., 2007). Sin embargo, es necesario tener una muestra estadística mayor para confirmar o refutar estos resultados. De confirmarse esta discrepancia, los modelos de evolución estelar deberán ser refinados.

La dificultad de estudiar sistemas binarios con astrometría es que su separación angular es muy pequeña. En regiones de formación estelar cercanas ($d < 500$ pc), los sistemas binarios jóvenes con periodos orbitales del orden de un año a un par de décadas tienen separaciones angulares del orden de 0.01 arcosegundos o menores. Misiones astrométricas especializadas, como el telescopio Gaia, no podrán resolver estos sistemas. Además, las estrellas se forman en densas nubes que oscurecen su emisión en el óptico, pero que son transparentes en las longitudes de onda de radio, haciendo esenciales los estudios en longitudes de onda más largas con alta resolución angular y alta precisión astrométrica. La interferometría de muy larga base del Very Long Baseline Array (VLBA) proporciona resoluciones angulares de alrededor de 0.001 arcosegundos y altas precisiones astrométricas entre 100 micro arcosegundos (Reid and Honma, 2014), ideales para estudiar este tipo de sistemas estelares en los que se enfoca este trabajo. El VLBA sólo detecta fuentes con temperaturas de brillo muy altas ($T_B > 10^6$ K), y solo puede detectar objetos en los cuales se están dando procesos no térmicos, por lo tanto los objetivos comunes son los Objetos estelares jóvenes (YSOs) magnéticamente activos que producen una fuerte emisión de girosincrotrón en sus coronas, detectables con estos instrumentos (Güdel, 2002). Dado que una fracción significativa de las estrellas confirmadas con actividad magnética son binarias jóvenes estrechas con separaciones de unas pocas décimas de mili arcosegundos, con la muy alta resolución angular del VLBA y más específicamente con la técnica de interferometría de líneas de base muy largas (VLBI), se pueden determinar las posiciones absolutas de cada componente del sistema, que permite estimar de forma directa las masas de las componentes individuales de estas estrellas, la cual es una ventaja única que tiene esta técnica.

3. Objetivo y Metas

- El objetivo principal del proyecto es **Determinar las masas dinámicas de objetos jóvenes binarios** en diferentes regiones de formación estelar usando la técnica de interferometría de líneas de base muy largas y constreñir los modelos de evolución estelar temprana.
- Los objetivos específicos consisten en: realizar la calibración de los datos, así como el cálculo de los parámetros astrométricos y orbitales de los sistemas binarios. El análisis de los resultados y la comparación con modelos de evolución estelar. Así como la redacción de los artículos para mostrar los resultados obtenidos.

4. Metodología

Los datos utilizados para desarrollar este proyecto son observaciones que están siendo realizadas con el VLBA, dentro del proyecto *Dynamical Masses of Young Stellar Multiple Systems with the VLBA* (DYNAMO-VLBA), el cual tuvo aprobadas 270 horas de observaciones (divididas en 90 épocas; PI: Dr. Sergio Dzib) para monitorear 23 sistemas binarios cerrados conocidos y para medir con mayor precisión sus parámetros orbitales. Las primeras observaciones comenzaron en febrero de 2018 y finalizaron en enero de 2021 y se registran a una frecuencia central de 5.0 GHz (banda C) con un ancho de banda de 256 MHz. Las observaciones corresponden a 15 bloques, cada uno dividido en seis épocas diferentes (un total de 18 horas por bloque). Las estrellas binarias a monitorear tienen diferentes tipos espectrales (de M5 a B4) y están en diferentes etapas evolutivas, ubicadas en diferentes regiones de formación estelar cercanas como se muestra en la tabla 1.

El VLBA se ha utilizado para medir movimientos propios y paralajes trigonométricas de estrellas jóvenes magnéticamente activas desde 2005, a través de observaciones multi-época (Dzib et al., 2010; Loinard et al., 2005; Menten et al., 2007). Las fuentes seleccionadas representan una muestra completa para probar exhaustivamente modelos evolutivos de sistemas estelares jóvenes. Además,

las observaciones de DYNAMO-VLBA se complementarán con las tomadas del proyecto *Gould's Belt Distances Survey* (GOBELINS), el cual se enfocó en medir la distancia a varias decenas de estrellas jóvenes en regiones de formación estelar. Gracias a estos trabajos previos, ahora conocemos las distancias a las más cercanas y prominentes regiones de formación estelar con una precisión mejor del 5% (Ortiz-León et al., 2018; Ortiz-León et al., 2018, 2017).

La reducción de datos se realiza con el software para procesamiento de imágenes astronómicas *Astronomical Image Processing System* (AIPS). Se usan scripts que incluyen las tareas necesarias para realizar la calibración estándar de la astrometría de objetos estelares jóvenes con datos de VLBA (i.e., Dzib Ph.D. Thesis). Además se obtiene como resultado una imagen final de las fuentes detectadas que con las herramientas de AIPS permite finalmente medir parámetros importantes como posición, ascensión recta, declinación, intensidad de flujo, etc.

Los ajustes astrométricos se realizan teniendo en cuenta que el desplazamiento de las estrellas en un sistema binario se describe mediante una combinación del paralaje trigonométrico (π), movimientos propios (μ_α, μ_δ) y movimiento orbital, el cual se describe mediante elementos orbitales como: el semieje mayor de la componente primaria del sistema a_1 , el período orbital P , la excentricidad e , la longitud del periastro ω , la época del paso por el periastro T_P , la inclinación del plano orbital i , el argumento del nodo ascendente Ω . Las ecuaciones que describen el movimiento de la componente primaria en función del tiempo son:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \mu_\alpha t + \pi f_\alpha(t) + a_1 Q_\alpha(t), \quad (1)$$

$$\delta(t) = \delta_0 + \mu_\delta t + \pi f_\delta(t) + a_1 Q_\delta(t), \quad (2)$$

donde α_0 y δ_0 son las coordenadas de la fuente para una época determinada, f_α y f_δ corresponden a la proyección de la elipse paraláctica (Seidelmann, 1992), $Q_\alpha(t), Q_\delta(t)$ son los factores orbitales y son funciones de los elementos orbitales (Wehlau, 1967). Ecuaciones similares describen el movimiento de la componente secundaria, usando el correspondiente semieje mayor, a_2 . Para resolver las ecuaciones anteriores, ajustar la paralaje y los movimientos propios, se usa la rutina basada en *MPFIT* del IDL, que se ha traducido a python (Markwardt, 2009), modificada en el proyecto GOBELINS por Marina Kounkel (Kounkel et al., 2017).

La estimación de las masas dinámicas de estos sistemas binarios representa un aporte significativo para restringir y refinar los parámetros de los modelos de evolución estelar temprana. Los modelos teóricos juegan un papel importante en nuestra comprensión de la evolución de las estrellas jóvenes, se requiere que produzcan predicciones precisas y fiables de las propiedades estelares. Por ello, realizaremos el análisis de algunos modelos estelares para compararlos con los resultados provenientes de las observaciones, este complemento permitirá tener un panorama más amplio en la comprensión de la estructura y evolución de este tipo de estrellas.

5. Resultados Preliminares

A partir del trabajo realizado en mi tesis de maestría, continuamos con el análisis de dichos resultados, específicamente con una de las fuentes, con el fin de publicar el primer artículo acerca de la medición de las masas dinámicas de un sistema binario utilizando la técnica VLBI. En este artículo presentamos las masas dinámicas del sistema estelar joven binario Oph-S1 (S1), compuesto por estrellas magnéticamente activas con una separación angular de 20 - 30 mas (Ortiz-León et al., 2017, ver Fig 2). Este sistema está ubicado en la región de formación estelar cercana de ρ Ofiuc, la cual está a una distancia de 138.4 ± 2.6 pc (Ortiz-León et al., 2018). Hemos calculado los parámetros astrométricos y orbitales, obteniendo masas dinámicas de las estrellas en el sistema. Se estimó que la componente primaria S1a tiene una masa de $4.42 \pm 0.08 \text{ M}_\odot$, este valor es significativamente

menor al valor estimado a partir del tipo espectral de la estrella B3/B5 de $6 M_{\odot}$ (Lada and Wilking, 1984) . Para la componente secundaria de baja masa S1b se determinó un valor de $0.88 \pm 0.01 M_{\odot}$, consistente con ser una estrella joven de baja masa.

Además queremos realizar la comparación de nuestros resultados de las masas dinámicas con modelos de evolución estelar. Hasta el momento, estamos estudiando el modelo de PISA (Tognelli et al., 2011), como se muestra en la figura 3. De acuerdo a este modelo, los valores de temperatura efectiva y luminosidad sugieren masas entre 5 y $6 M_{\odot}$ Lada and Wilking (1984), superior a la masa dinámica estimada. Por otro lado queremos realizar un análisis de la variación de flujo de la fuente con respecto a la fase orbital.

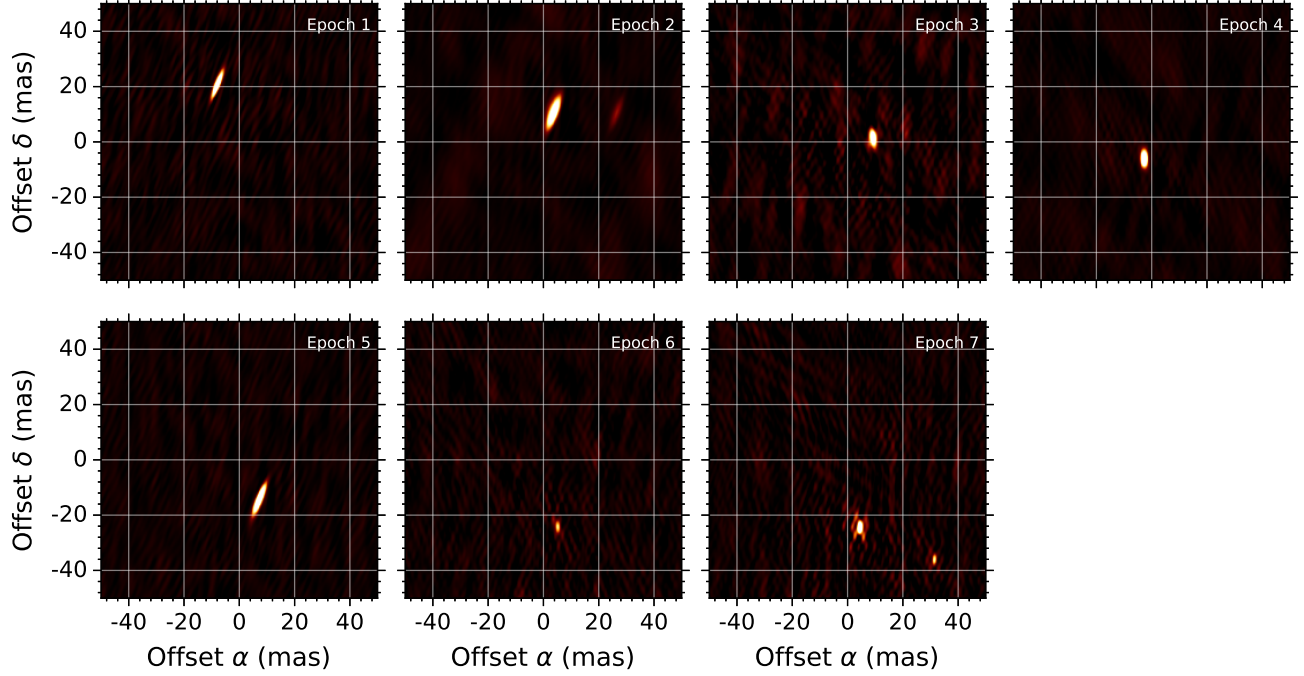


Fig. 2: Imágenes finales correspondientes a cada época de observación del sistema binario S1.

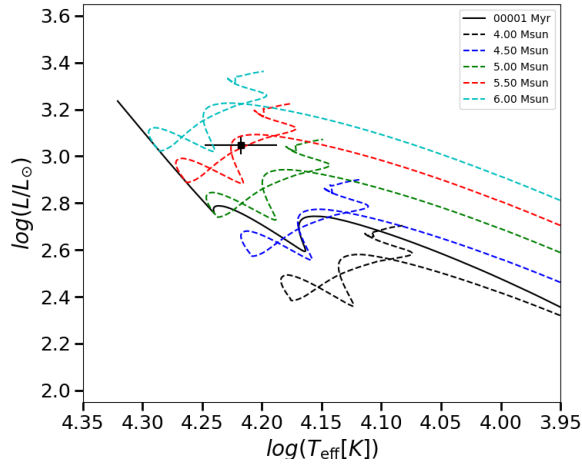


Fig. 3: Trazas evolutivas de estrellas de diferentes masas basados en el modelo de evolución estelar PISA (Tognelli et al., 2011). La posición de S1 se representa con el círculo negro.

6. Cronograma

Semestre 1

- Definición del proyecto a llevar a cabo durante el doctorado, donde determinamos continuar con el estudio de objetos estelares jóvenes binarios en regiones de formación estelar cercanas, con los datos que se tienen del proyecto DYNAMO-VLBA.
- De manera conjunta continuar con la lectura de bibliografía correspondiente a estrellas binarias, objetos estelares jóvenes y modelos de evolución estelar.
- Durante este primer semestre acordamos iniciar con la escritura de la estructura del primer artículo que queremos publicar, teniendo en cuenta los resultados previos obtenidos en la tesis de maestría, en específico de la fuente S1, con el nuevo análisis sobre la comparación con otros modelos teóricos estelares y la variación de flujo en función de la fase orbital del sistema.

Semestre 2

- Calibración de los datos de la muestra de estrellas binarias en regiones de formación estelar cercanas, para su posterior análisis, la cual se realiza con scripts que incluyen las tareas necesarias para realizar la calibración estándar de la astrometría de objetos estelares jóvenes usando la técnica de interferometría VLBI.
- Profundización en el conocimiento de las tareas usadas para la calibración de datos VLBI. Hasta el momento tengo la idea general de cada una para calibrar YSOs, y deseo conocer a mayor detalle cada herramienta para calibración de datos VLBI.
- Avanzar en la redacción del artículo, con el fin de que al final de este semestre quede listo para enviarlo a revisión.
- Asistir al XXVIII Congreso Nacional de Astronomía, que se celebrará del 4 al 8 de octubre de 2021, para mostrar nuestros resultados preliminares.

Semestre 3

- Continuar con la calibración de datos de las estrellas binarias. Iniciando con el cálculo de los parámetros astrométricos y orbitales de nuestra muestra, a partir de los datos de calibración.
- Pretendemos enviar una nueva propuesta de observación. El propósito es que yo pueda tener la experiencia de dirigir un proyecto de observación, y donde incluiremos las fuentes que hasta ese momento determinemos necesitan más tiempo de observación, para poder mejorar el ajuste de su órbita, incluyendo la fuente S1, para la cual tenemos menor detecciones en un tramo de su órbita.
- Presentación de examen de candidatura del doctorado, presentando los resultados preliminares desarrollados.

Semestre 4

- Continuar con la determinación de los parámetros astrométricos y orbitales de nuestra muestra de estrellas, a partir de los datos de calibración.
- Iniciar con el análisis de los resultados de las fuentes estudiadas, incluyendo la comparación de nuestros resultados con modelos teóricos de evolución estelar.
- Pretendemos realizar una propuesta de observación de algunas estrellas binarias, en otra longitud de onda como el infrarrojo, con el fin de analizar la variabilidad de las observaciones en otras frecuencias y determinar su tipo espectral.

- A partir de este semestre planeamos participar en coloquios con el fin de mostrar los resultados iniciales, tanto en el IRyA como en otras universidades. También Se planea asistir a algunos congresos internacionales que se den durante el periodo de 2022 - 2024. Esto con el propósito de exponer los resultados obtenidos. Hasta el momento no se han anunciado las fechas exactas por motivos de la pandemia, sin embargo como ejemplos podemos mencionar: Synthesis Imaging Workshop at the NRAO, que quizá se programará para el verano de 2022, o Protostars and Planets VII que podría realizarse en el 2022.
- Redacción del segundo artículo con los resultados obtenidos hasta el momento.

Semestre 5

- Dadas las condiciones actuales, esperamos que para este semestre ya sea posible realizar una estancia académica, dependiendo de algunas circunstancias de ese momento, es muy probable que sea en el Instituto Max Planck en Alemania o la NRAO en Nuevo México.
- Continuar con el análisis de los resultados de las fuentes estudiadas.

Semestre 6

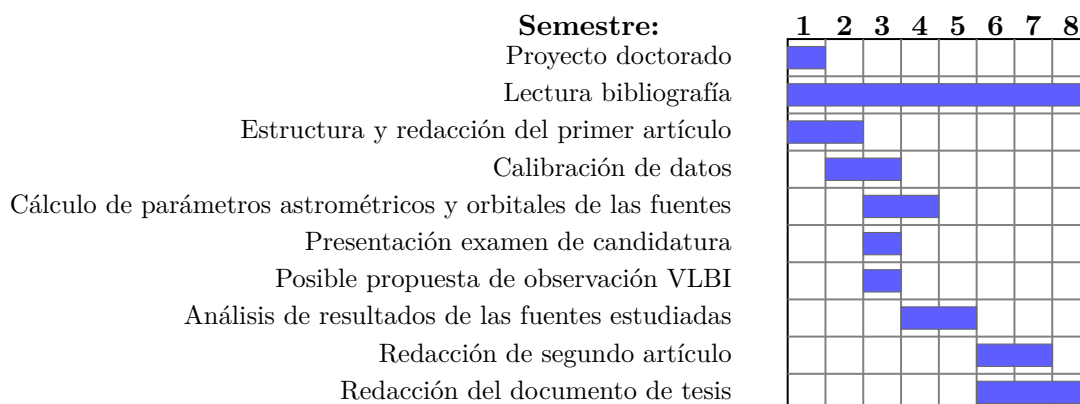
- Redacción de un tercer artículo con los resultados obtenidos hasta el momento.
- Inicio de la escritura del documento de tesis.

Semestre 7

- Continuar con la redacción del documento de tesis.

Semestre 8

- Terminar la redacción del documento de tesis.
- Presentación de la tesis.



Anexo

Tabla 1: Sistemas binarios

Nombre	Ascensión Recta (J2000.0)	Declinación (J2000.0)	Clase (IR)	Tipo Espectral	Periodo (años)
Ofiuco					
S1	16 ^h 26 ^m 34. ^s 17	−24°23′28. [″] 4	III	B4	1.734 ± 0.003
WLY 2-11	16 ^h 25 ^m 56. ^s 09	−24°30′15. [″] 3	III	M5	~ 4.5
LFAM 15	16 ^h 26 ^m 42. ^s 44	−24°26′26. [″] 1	III	...	3.59 ± 0.02
VSSG 11	16 ^h 26 ^m 43. ^s 76	−24°16′33. [″] 4	III	M0	~ 10
LFAM 18	16 ^h 26 ^m 49. ^s 23	−24°20′03. [″] 3	III	K6	...
YLW 12Bab	16 ^h 27 ^m 18. ^s 17	−24°28′52. [″] 9	III	F7	1.425 ± 0.001
ROXN 39	16 ^h 27 ^m 21. ^s 81	−24°43′35. [″] 9	III	M3	11.2 ± 1.5
SFAM 87	16 ^h 30 ^m 35. ^s 63	−24°34′18. [″] 9	...	K5	7.69 ± 0.01
DoAr 51	16 ^h 32 ^m 11. ^s 79	−24°40′21. [″] 8	II	M3	8.10 ± 0.06
Serpens					
GFM 65	18 ^h 30 ^m 00. ^s 65	+01°13′40. [″] 0	III	M0.5	~ 2
EC 95	18 ^h 29 ^m 57. ^s 89	+01°12′46. [″] 0	P-HAeBe	k2	21.5 ± 1.5
Tauro					
V 1096 Tau	4 ^h 13 ^m 27. ^s 23	+28°16′24. [″] 4	III	M0	~ 3
Hubble 4	4 ^h 18 ^m 47. ^s 04	+28°20′07. [″] 2	III	K7	9.28 ± 0.01
V 1201 Tau	4 ^h 24 ^m 48. ^s 16	+26°43′16. [″] 1	...	K1	9.1 ± 1.2
V 1000 Tau	4 ^h 42 ^m 07. ^s 32	+25°23′03. [″] 0	III	M1	5.6 ± 0.11

Referencias

- André, 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.
- Azulay, R., Guirado, J. C., Marcaide, J. M., Martí-Vidal, I., Ros, E., Jauncey, D. L., Lestrade, J. F., Preston, R. A., Reynolds, J. E., Tognelli, E., and Ventura, P. (2015). Dynamical masses of the low-mass stellar binary AB Doradus B. *A&A*, 578:A16.
- Carroll, B. W. and Ostlie, D. A. (1996). *An Introduction to Modern Astrophysics*.
- Dauphas, N. and Chaussidon, M. (2011). A perspective from extinct radionuclides on a young stellar object: The sun and its accretion disk. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1):351–386.
- Dzib, S., Loinard, L., Mioduszewski, A. J., Boden, A. F., Rodríguez, L. F., and Torres, R. M. (2010). VLBA determination of the distance to nearby star-forming regions. IV. A preliminary distance to the proto-Herbig AeBe star EC 95 in the Serpens core. *Astrophysical Journal*, 718(2):610–619.
- Güdel, M. (2002). Stellar Radio Astronomy: Probing Stellar Atmospheres from Protostars to Giants. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40(1):217–261.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., and Donner, K. (2007). *Fundamental Astronomy*, volume 27.
- Kounkel, M., Hartmann, L., Loinard, L., Ortiz-León, G. N., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., Dzib, S. A., Torres, R. M., Pech, G., Galli, P. A. B., Rivera, J. L., Boden, A. F., Evans, Neal J., I., Briceño, C., and Tobin, J. J. (2017). The Gould’s Belt Distances Survey (GOBELINS) II. Distances and Structure toward the Orion Molecular Clouds. *ApJ*, 834(2):142.
- Lada, C. J. (1987). Star formation: from OB associations to protostars. In Peimbert, M. and Jugaku, J., editors, *Star Forming Regions*, volume 115 of *IAU Symposium*, page 1.
- Lada, C. J. and Wilking, B. A. (1984). The nature of the embedded population in the Rho Ophiuchi dark cloud - Mid-infrared observations. *ApJ*, 287:610–621.
- LeBlanc, F. (2010). *An Introduction to Stellar Astrophysics*.
- Loinard, L., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., González, R. A., Rodríguez, M. I., and Torres, R. M. (2005). Multiepoch VLBA Observations of T Tauri South. *The Astrophysical Journal*, 619(2):L179–L182.
- Markwardt, C. B. (2009). Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT. In Bohlender, D. A., Durand, D., and Dowler, P., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*, volume 411 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 251.
- Mathieu, R. D., Baraffe, I., Simon, M., Stassun, K. G., and White, R. (2007). Dynamical Mass Measurements of

- Pre-Main-Sequence Stars: Fundamental Tests of the Physics of Young Stars. In Reipurth, B., Jewitt, D., and Keil, K., editors, *Protostars and Planets V*, page 411.
- Menten, K. M., Reid, M. J., Forbrich, J., and Brunthaler, A. (2007). The distance to the Orion Nebula. *Astronomy and Astrophysics*, 474(2):515–520.
- Ortiz-León, G. N., Loinard, L., Dzib, S. A., Galli, P. A. B., Kounkel, M., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., Torres, R. M., Hartmann, L., Boden, A. F., Evans, Neal J., I., Briceño, C., and Tobin, J. J. (2018). The Gould’s Belt Distances Survey (GOBELINS). V. Distances and Kinematics of the Perseus Molecular Cloud. *ApJ*, 865(1):73.
- Ortiz-León, G. N., Loinard, L., Dzib, S. A., Kounkel, M., Galli, P. A. B., Tobin, J. J., II, N. J. E., Hartmann, L., Rodríguez, L. F., Briceño, C., Torres, R. M., and Mioduszewski, A. J. (2018). Gaia -DR2 Confirms VLBA Parallaxes in Ophiuchus, Serpens, and Aquila . *The Astrophysical Journal*, 869(2):L33.
- Ortiz-León, G. N., Loinard, L., Kounkel, M. A., Dzib, S. A., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., Torres, R. M., González-Lópezlira, R. A., Pech, G., Rivera, J. L., Hartmann, L., Boden, A. F., Evans II, N. J., Briceño, C., Tobin, J. J., Galli, P. A. B., and Gudehus, D. (2017). the Gould’S Belt Distances Survey (Gobelines). I. Trigonometric Parallax Distances and Depth of the Ophiuchus Complex. *The Astrophysical Journal*, 834(2):141.
- Reid, M. and Honma, M. (2014). *Microarcsecond Radio Astrometry*, volume 52.
- Seidelmann, P. K. (1992). *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. A revision to the Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac.*
- Tognelli, E., Prada Moroni, P. G., and Degl’Innocenti, S. (2011). The Pisa pre-main sequence tracks and isochrones. A database covering a wide range of Z, Y, mass, and age values. *A&A*, 533:A109.
- Wehlau, A. (1967). Principles of astrometry (with special emphasis on long-focus photographic astrometry), by peter van de kamp. w.h. freeman and company, 1967. *Canadian Mathematical Bulletin*, 10(4):630–630.