
**ESTUDIO ASTROMÉTRICO DE OBJETOS ESTELARES
JÓVENES BINARIOS UTILIZANDO VLBI**



Fis. NORIDA JAZMÍN ORDÓÑEZ TORO

**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO - CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
POSGRADO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)**

2020

**ESTUDIO ASTROMÉTRICO DE OBJETOS ESTELARES
JÓVENES BINARIOS UTILIZANDO VLBI**

Fis. NORIDA JAZMÍN ORDÓÑEZ TORO

TESIS DE MAESTRÍA COMO REQUISITO PARA OPTAR
POR EL TÍTULO DE MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

DIRECTOR

Dr. SERGIO A. DZIB

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR RADIOASTRONOMIE

CO-DIRECTOR

Dr. JOSEP MARIA MASQUÉ

DPTO. DE ASTRONOMÍA - UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO - CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
POSGRADO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)**

2020

Dedicado a mi familia, especialmente a mis padres por su infinito apoyo, esfuerzo y confianza, por enseñarme siempre a luchar por mis sueños.

“... El cosmos es todo lo que es, todo lo que fue y todo lo que será. Nuestras más ligeras contemplaciones del cosmos nos hacen estremecer: Sentimos como un cosquilleo nos llena los nervios, una voz muda, una ligera sensación como de un recuerdo lejano o como si cayéramos desde gran altura. Sabemos que nos aproximamos al más grande de los misterios...”

*Carl Sagan
(1934-1996)*

Agradecimientos

En el vasto e infinito mar cósmico que es el universo, en mi recorrido a través de este pequeño espacio-tiempo, he tenido la fortuna de coincidir con personas maravillosas, quienes han sido como ese inmenso faro que nunca se extingue a lo largo del camino. Agradezco principalmente a mis queridos padres, que con su amor, esfuerzo y confianza desmedida han sido mi luz en cada instante de la vida.

Un agradecimiento especial a mis directores de tesis, los doctores Sergio A. Dzib y Josep Maria Masqué, por su guía excepcional y acompañamiento constante en la realización de este trabajo; gracias por tantos conocimientos brindados, su paciencia y la confianza depositada en mí, por mostrarme las maravillas del universo a través de los «ojos» de la radioastronomía.

Gracias a todos los profesores del Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, por enseñarme esta hermosa ciencia de la astrofísica. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACyT por brindarme la beca para realizar mis estudios de maestría y en general a todo el pueblo mexicano, por acogerme en su bello país, por su valioso aporte e interés en apoyar la ciencia. A mis amigos, a mis compañeras de maestría, y a todas las personas que me han brindado su apoyo en el transcurso de esta etapa, por sus palabras de aliento y sabiduría.

ESTUDIO ASTROMÉTRICO DE OBJETOS ESTELARES JÓVENES BINARIOS UTILIZANDO VLBI

RESUMEN

En este trabajo reportamos las masas dinámicas de cinco sistemas estelares jóvenes binarios estrechos, caracterizados por ser estrellas magnéticamente activas con separaciones de unas pocas decenas de mili arcosegundos. Estos sistemas están ubicados en tres regiones de formación estelar cercanas ($d < 500$ pc): Ofiuco, Serpens y Orión. Este tipo de sistemas tienen emisión de radio no térmica detectable usando la técnica de interferometría de línea de base muy larga *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI). Por lo tanto, se ha usado observaciones de VLBI que fueron tomadas con el *Very Long Baseline Array* (VLBA) dentro del proyecto *Dynamical Masses of Young Stellar Multiple Systems VLBA* (DYNAMO - VLBA), con datos obtenidos entre febrero de 2018 y diciembre de 2019, registrados a una frecuencia central de 5.0 GHz (banda C) con un ancho de banda de 256 MHz. También se incluyen observaciones astrométricas previas, especialmente del proyecto *Goald's Belt Distances Survey* (GOBELINS).

Para estudiar este tipo de sistemas se requiere alta resolución angular y precisión astrométrica; el VLBA proporciona estas características con resoluciones angulares ~ 1 mili arcosegundo y precisiones astrométricas alrededor de 100 micro arcosegundos y menores (Reid and Honma, 2014). Gracias a estas observaciones, podemos medir los siguientes parámetros astrométricos:

1. **La paralaje trigonométrica**, fundamental para determinar las distancias de las fuentes respecto a nosotros.
2. **Los movimientos propios**, que son el desplazamiento de las estrellas en el plano del cielo.
3. **Los parámetros orbitales**, que proveen información esencial para la caracterización de su órbita, y que permiten calcular el valor de las masas dinámicas de las componentes individuales de estos sistemas, que es el objetivo principal de este trabajo.

La estimación de parámetros estelares mediante la radioastrometría y especialmente la determinación de las masas dinámicas de sistemas estelares jóvenes binarios representa un

aporte significativo para restringir los modelos de su evolución estelar temprana, dado que las características de estos sistemas en las primeras fases de su evolución hacen más complejo su estudio.

Cada una de las fuentes fue detectada un número suficiente de veces para realizar los ajustes astrométricos y orbitales de alta calidad. En la región de formación estelar de Ofioco, para el sistema binario S1, se estimó que la componente primaria S1a (Tipo espectral B3/B5) tiene una masa de $4.42 \pm 0.08 M_{\odot}$. Para la componente secundaria de baja masa S1b se determinó un valor de $0.88 \pm 0.01 M_{\odot}$. Para nuestro segundo sistema binario en Ofioco, LFAM 15, donde las dos componentes son estrellas de baja masa, se estimó un valor de $0.48 \pm 0.01 M_{\odot}$ para la componente primaria y $0.44 \pm 0.01 M_{\odot}$ para la componente secundaria. En la región de Serpens, estudiamos la componente binaria compacta del sistema triple jerárquico EC 95. Las masas dinámicas estimadas son de $2.38 \pm 0.07 M_{\odot}$ para la componente principal y de $2.06 \pm 0.01 M_{\odot}$ para su compañera. Para el segundo sistema binario en Serpens, GFM 65, sus dos componentes son de baja masa con $1.00 \pm 0.80 M_{\odot}$ y $0.18 \pm 0.07 M_{\odot}$ respectivamente. Finalmente, estudiamos el sistema binario VLBA 68 en Orión. En este caso, solo detectamos una de las componentes, pero podemos inferir la presencia de una compañera del movimiento oscilatorio de la estrella en el plano del cielo. Estimamos una masa de $5.50 \pm 3.01 M_{\odot}$ para la componente primaria y de $0.99 \pm 0.54 M_{\odot}$ para la segunda componente.

ASTROMETRIC STUDIES OF BINARY YOUNG STELLAR OBJECTS USING VLBI.

ABSTRACT

In this work we report the dynamical masses of five young tight binary star systems, characterized by being magnetically active stars with separations of a few tens of milli-arcseconds. These systems are located in three nearby star forming regions ($d < 500$ pc): Ophiuchus, Serpens, and Orion. These systems exhibit non-thermal radio emission detectable using the *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) technique. The VLBI observations were taken with the *Very Long Baseline Array* (VLBA) within the *Dynamical Masses of Young Stellar Multiple Systems with the VLBA* (DYNAMO - VLBA) project, with data obtained between February 2018 and December 2019, recorded at a central frequency of 5.0 GHz (C-band) with a bandwidth of 256 MHz. Previous astrometric observations are also included, especially from the *Gould's Belt Distances Survey* (GOBELINS).

The study of this type of system requires high angular resolution and astrometric accuracy; The VLBA provides these characteristics with angular resolutions ~ 1 milli-arcsecond and astrometric accuracy around 100 micro arcseconds and below (Reid and Honma, 2014). With these observations, we can measure the following astrometric parameters.

1. **The trigonometric parallax**, fundamental to determine the distances of the sources with respect to us.
2. **The proper motions**, which are the displacement of the stars in the plane of the sky.
3. **The orbital parameters**, which provide essential information for the characterization of its orbit, and which allow the calculation of the value of the dynamic masses of the individual components of these systems, which is the main objective of this work.

The estimation of stellar parameters by radio astrometry and especially the determination of dynamical masses of young binary stellar systems represents a significant contribution to

restrict models of early stellar evolution, since these kind of objects are difficult to study by other means in the first phases of their evolution.

The sources were detected in a sufficient number of times to perform the high-quality astrometric and orbital fits. In the Ophiuchus star forming region, for the S1 binary system, the primary component S1a (spectral type B3/B5) was estimated to have a mass of 4.42 ± 0.08 . For the low mass secondary component S1b a value of $0.88 \pm 0.01 M_{\odot}$ was determined. For our second binary system in Ophiuchus, LFAM 15, where the two components are low mass stars, we estimated $0.48 \pm 0.01 M_{\odot}$ for the primary component and $0.44 \pm 0.01 M_{\odot}$ for the secondary component. In serpens, we studied the tight binary in the hierarchical triple system EC 95. The estimated dynamic masses are $2.38 \pm 0.07 M_{\odot}$ for the principal component and $2.06 \pm 0.01 M_{\odot}$ for the other component.

For the second binary system in Serpens, GFM 65, the two components are low mass with $1.00 \pm 0.80 M_{\odot}$ and $0.18 \pm 0.07 M_{\odot}$ respectively. Finally, we studied the binary system VLBA 68 in Orion. In this case, we detect only one star, but infer the presence of a companion from the oscillatory movement of the star on the plane of the sky. We estimate a mass of $5.50 \pm 3.01 M_{\odot}$ for the primary component and $0.99 \pm 0.54 M_{\odot}$ for the second component.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetos Estelares Jóvenes	2
1.1.1	Naturaleza de la emisión radio de YSOs	4
1.2	Estrellas Binarias	7
1.2.1	Parámetros Orbitales de Sistemas Binarios	11
1.3	Radio Interferometría	11
1.4	Técnica de Interferometría de Línea de Base Muy Larga (VLBI)	12
1.5	El Radio Interferómetro <i>Very Long Base Array</i>	13
1.6	Astrometría	15
1.7	Motivación	15
1.8	Objetivos	16
1.8.1	Objetivo General	16
1.8.2	Objetivos Específicos	16
2	Metodología	17
2.1	Fuentes Seleccionadas	17
2.1.1	Fuentes en Ofiuco	18
2.1.2	Fuentes en Serpens	20
2.1.3	Fuentes en Orión	21
2.2	Calibración de Datos	23
2.3	Ajustes astrométricos	24
3	Resultados y Discusión	27
3.1	Imágenes y Posiciones Medidas de las Estrellas Binarias	27
3.1.1	Oph S1	27
3.1.2	LFAM 15	30
3.1.3	EC 95	32
3.1.4	GFM 65	34
3.1.5	VLBA 68	35
3.2	Astrometría	37
3.2.1	S1	37
3.3	Discusión	46

4 Conclusiones y Trabajo a Futuro	49
4.1 Conclusiones	49
4.2 Trabajo a Futuro	50
Bibliografía	53

Lista de Tablas

2.1	Fuentes a estudiar	18
3.1	Parámetros obtenidos de posiciones y densidad de flujo del sistema S1, en las épocas observadas.	28
3.2	Parámetros obtenidos de posiciones y densidad de flujo del sistema LFAM 15, en las épocas observadas.	30
3.3	Parámetros obtenidos de posiciones y densidad de flujo del sistema EC 95, en las épocas observadas.	32
3.4	Parámetros obtenidos de posiciones y densidad de flujo sistema GFM 65, en las épocas observadas.	34
3.5	Parámetros obtenidos de posiciones y densidad de flujo para el sistema VLBA 68, en las épocas observadas.	36
3.6	Parámetros Astrométricos.	46
3.7	Parámetros orbitales	46
3.8	Masas Dinámicas	46

Lista de Figuras

1.1	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 para esta Tesis.	4
1.2	Orbitas de las componentes de un sistema binario alrededor de su centro de masa común.	9
1.3	Esquema de la órbita elíptica en el plano del cielo asumiendo un ángulo de inclinación i . La línea punteada corresponde a la proyección de la órbita. . .	10
1.4	Esquema de una órbita elíptica con sus elementos orbitales principales. . . .	11
3.1	Imágenes finales correspondientes a cada época de observación del sistema binario S1. Los niveles de contorno corresponden a -3, 3, 4, 5, 6, 9, 15, 20, 25, 30, 45 veces el nivel de ruido en cada imagen. Este nivel de ruido σ_{noise} se muestra en la Tabla 3.1. El haz sintetizado para cada observación se muestra en la parte inferior izquierda de cada cuadro.	29
3.2	Imágenes finales correspondientes a cada época de observación del sistema binario LFAM 15. Los niveles de contorno son iguales a los descritos en la figura 3.1. El nivel de ruido en cada imagen σ_{noise} se muestra en la tabla 3.2. El haz sintetizado para cada observación se muestra en la parte inferior izquierda de cada cuadro.	31
3.3	Imágenes finales para cada época del sistema EC 95. Los niveles de contorno son los descritos en la figura 3.1. El nivel de ruido en cada imagen σ_{noise} se muestra en la tabla 3.3. El haz sintetizado para cada observación se muestra en la parte inferior izquierda de cada cuadro.	33
3.4	Imágenes finales para cada época del sistema EC 95c. Los niveles de contorno son los descritos en la figura 3.1. El nivel de ruido en cada imagen σ_{noise} se muestra en la tabla 3.3.	34
3.5	Imágenes finales para cada época del sistema GFM 65. Los niveles de contorno son los mismos de la figura 3.1. El nivel de ruido σ_{noise} se muestra en la tabla 3.4. El haz sintetizado para cada observación se muestra en la parte inferior izquierda de cada cuadro.	35

3.6	Imágenes finales para cada época del sistema VLBA 68. Los niveles de contorno están descritos en la figura 3.1. El nivel de ruido σ_{noise} se muestra en la tabla 3.5. El haz sintetizado para cada observación se muestra en la parte inferior izquierda de cada cuadro.	36
3.7	Posiciones absolutas de las componentes y mejor modelo de ajuste para el sistema binario S1 en Ofiuco. Los puntos azules indican las posiciones para la componente primaria, mientras que los puntos rojos las posiciones de la componente secundaria.	38
3.8	Ajuste orbital del <i>modelo completo</i> con las posiciones relativas de las componentes del sistema binario S1. Los puntos verdes indican las detecciones con VLBA de la segunda componente, la línea negra discontinua traza la línea de nodos del modelo y la cruz en negro indica la posición de la fuente primaria. El punto rojo corresponde a la época descartada, de la componente secundaria, en el modelo de ajuste.	39
3.9	Posiciones absolutas de las componentes y mejor modelo de ajuste para el sistema binario LFAM 15 en Ofiuco. Los puntos azules indican las posiciones para la componente principal y los puntos rojos para la segunda componente.	40
3.10	Ajuste orbital del <i>modelo completo</i> con las posiciones relativas de las componentes del sistema binario LFAM 15. La descripción de la imagen es la misma dada para la figura 3.8	41
3.11	Posiciones absolutas de las componentes y mejor modelo de ajuste para el sistema binario EC 95 en Serpens. Los puntos azules indican las posiciones de la primera componente del sistema, mientras que los puntos rojos de la segunda componente.	42
3.12	Ajuste orbital del <i>modelo completo</i> con las posiciones relativas de las componentes del sistema binario estrecho EC 95. La descripción de la imagen es la misma dada para la figura 3.8	43
3.13	Posiciones absolutas de las componentes y mejor modelo de ajuste para el sistema binario GFM 65 en Serpens, basado en observaciones tomadas como parte del proyecto GOBELINS y las nuevas observaciones de DYNAMO - VLBA.	44
3.14	Posiciones absolutas de la componente primaria y mejor modelo de ajuste para el sistema binario VLBA 68 en Orión.	45