



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Polarimetría NIR de HBC 502 y HHs en la región sur de
NGC 2068

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Roxana Montserrat Melchor Tiro

Asesorada por

Dra. Bertha Alicia Porras Juárez

Dra. Ana Aurelia Avilez López

Puebla Pue.
Junio de 2023



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Polarimetría NIR de HBC 502 y HHs en la región sur de
NGC 2068

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Roxana Montserrat Melchor Tiro

Asesorada por

Dra. Bertha Alicia Porras Juárez

Dra. Ana Aurelia Avilez López

Puebla Pue.
Junio de 2023

Título: Polarimetría NIR de HBC 502 y HHs en la región sur de NGC 2068

Estudiante: ROXANA MONTSERRAT MELCHOR TIRO

COMITÉ

Dra. Rosibel Carrada Legaria
Presidente

Dra. María del Rosario Pastrana Sánchez
Secretario

Dr. Abraham Luna Castellanos
Vocal

Dr. Arturo Gómez Ruíz
Vocal

Dra. Bertha Alicia Porras Juárez
Dra. Ana Aurelia Avilez López
Asesor

Índice general

1. Introducción	11
1.1. Nebulosas de Reflexión	12
1.2. Formación estelar	13
1.3. Evolución PMS de estrellas de baja masa	14
1.4. Objetos Herbig-Haro	16
1.5. Motivación de esta tesis	17
2. Nebulosas de reflexión NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26 (HBC 502)	19
2.1. Las nebulosas NGC 2071 y NGC 2068	19
2.2. Región de formación estelar HH 24-26 (HBC 502)	20
2.3. Estrellas generadoras y contenido de HHs	21
3. Polarización y Parámetros de Stokes	25
3.1. Polarización y campo magnético	25
3.2. POLICAN	28
4. Datos polarimétricos de HBC 502	31
4.1. Observaciones	31
4.2. Reducción de datos	33
4.2.1. Cosuma de imágenes (IRAF)	33
4.2.2. Astrometría de imágenes (IRAF)	34
4.2.3. Mosaicos de la región (Montage.py)	35
5. Resultados polarimétricos (PStokes.py)	41
5.1. Polarimetría de las regiones norte, centro y sur de HBC 502	42
5.2. Mosaicos de las tres épocas de observación	47
6. Discusión	53
6.1. GAIA	53
6.2. HH 24	54
6.3. HBC 502	59
6.4. HH 25 y HH 26	63
6.5. Comparación con otras longitudes de onda	64
7. Conclusión	67
8. Glosario	69
A. Contribución en el LXV Congreso Nacional de Física	71

B. Polarización de la luz	73
B.1. Luz polarizada y no polarizada	73
B.2. Esfera de Poincaré	75
B.3. Parámetros de Stokes	77
B.4. Matrices de Mueller	78
B.5. Clasificación espectral de Harvard	80
Bibliografía	83

Agradecimientos

La culminación de una etapa extraordinaria de mi vida no habría sido posible sin el apoyo de la Dra. Bertha Alicia Porras Juárez, asesora de esta tesis quien me guió en cada paso de este camino y me compartió parte de su conocimiento y amor a la astrofísica.

Al Dr. Abraham Luna Castellanos quien me acercó al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), así como de instruirme en las observaciones y reducciones de datos polarimétricos que fueron parte importante en el desarrollo de esta tesis y sobre todo por haberme permitido conocer a personas maravillosas como mi asesora y compañeros de trabajo.

A Alejandro García Pérez, por compartir el software que me permitió procesar y discutir las imágenes polarimétricas asociadas a mi investigación.

A María José Fragoso por compartirme los datos obtenidos en el software de Robitaiile como resultado del trabajo colaborativo del LXV Congreso Nacional de Física los cuales fueron parte importante en la presente tesis.

Índice general

Índice de figuras

1.1. Imagen RGB (red, green, blue) en las bandas K ($2.159\mu m$), H ($1.662\mu m$) y J ($1.235\mu m$) de 2-MASS, respectivamente, correspondiente a la parte noreste de la nube molecular L1630. Se muestran las nebulosas de reflexión NGC 2071, NGC 2068 y la región HH 24-26. Esta región contiene al norte a HH 24, en su centro a HBC 502 y al sur HH 26, objetos del presente estudio.	12
1.2. Clasificación de las etapas evolutivas en estrellas de baja masa, en las fases pre-estelar, protoestelar y pre-Secuencia Principal (Imagen tomada de [6], basada en Lada [1987] y Andre et al. [1993]).	14
2.1. Imagen RGB (K, H y J) obtenida de SIMBAD del catálogo de 2MASS de la nebulosa de reflexión NGC 2071 y región de formación estelar NGC 2071-IR.	20
2.2. Imagen tomada de SkyView en banda J (300X300 pixeles), se señalan las nebulosas de reflexión NGC 2067, NGC 2068 y NGC 2064	21
2.3. Imagen RGB de 2MASS en las bandas K ($2.159\mu m$), H ($1.662\mu m$) y J ($1.235\mu m$), respectivamente de la región de formación estelar HH 24-26.	22
2.4. Estrellas fuentes en la región cercana a HBC 502. Los recuadros punteados limitan la extensión de los HHs (cuadros) asociados a su estrella progenitora (círculos) etiquetados con el mismo color. Las tres estrellas sin HH asociado se muestran en un círculo con color rosa, más tenue que las demás.	23
3.1. Representación de polarización elíptica rotada un ángulo ϕ	26
3.2. Representación de la radiación polarizada elípticamente en la esfera de Poincaré. Imagen tomada de [9]. Una explicación de los valores para polarización lineal, elíptica y circular en los hemisferios norte y sur se detallan en el Apéndice B.2.	27
3.3. Esquema ilustrativo de la luz polarizada proveniente de HBC 502 y su paso por el detector POLICAN.	28
4.1. Secuencias de observación de Marzo y Abril de 2022. De las 15 imágenes por ángulo de polarización, 4 eran de la parte norte, 8 del objeto central (HBC 502) y únicamente 3 del sur. Los números en este esquema corresponden al orden de apuntados del telescopio.	32
4.2. Secuencia de observación de Enero de 2023. De las 15 imágenes por ángulo de polarización, 2 fueron de la parte norte, 8 del objeto central y otras 2 correspondían al sur, las que fueron utilizadas para realizar los mosaicos. Los números en este esquema corresponden al orden de apuntados del telescopio. En la segunda noche (26 de Enero) no se completó la secuencia quedando 11 imágenes solamente: 2 imágenes al norte, 6 al centro y 1 al sur.	32
4.3. 4 mosaicos verticales de luz polarizada en el filtro H de la región HH 24-26 en los ángulos 0° , 22.5° , 45° y 67.5° , de la primera época, con un tiempo de integración de 120seg. El norte es hacia arriba y el este a la izquierda.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

4.4. Idem Figura 4.3 para la segunda época de observación, con un tiempo de integración de 60seg.	38
4.5. Idem Figura 4.3 para la segunda época de observación, con un tiempo de integración de 180seg. La observación se realizó las noches del 24 y 26 de Enero, la imagen de la primera noche corresponde al recuadro inclinado al norte mientras que las imágenes de la segunda noche corresponden a los recuadros verticales del centro y al sur. . .	39
5.1. Imágenes de los parámetros I, U y Q de Stokes de la región norte a la estrella T Tauri HBC 502, en los tres recuadros superiores, respectivamente. En los recuadros inferiores, se muestran mapas de vectores de polarización sobre un fondo de porcentaje de polarización y el parámetro I de Stokes (izquierda y centro), respectivamente, mientras que el tercer mapa muestra el ángulo de polarización.	42
5.2. Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502.	43
5.3. Idem Figura 5.1 para la región al sur de HBC 502.	43
5.4. Idem Figura 5.1 para la región norte de HBC 502, de la segunda época.	44
5.5. Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502, de la segunda época.	44
5.6. Idem Figura 5.1 para la región sur a HBC 502, de la segunda época.	45
5.7. Idem Figura 5.1 para la región norte a HBC 502, de la tercera época.	45
5.8. Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502, de la tercera época.	46
5.9. Idem Figura 5.1 para la región sur a HBC 502, de la tercera época.	46
5.10. Idem Figura 5.1 para la región sur más distante de HBC 502, de la tercera época.	47
5.11. Imagen RGB de 2MASS en las bandas K,H y J, respectivamente de la región HH 24-26	47
5.12. Mapas de polarización en el filtro H de CANICA de la región HH 24-26 (HH 24 al norte, HBC 502 en la emisión central y HH 26 al sur). La imagen a la izquierda muestra la polarimetría de la temporada de observación llevada acabo el 8/03/22 y la imagen de la derecha la temporada del 5/04/22.	49
5.13. Mapas de intensidad, I, en el filtro H de CANICA, mostrando vectores de polarización (trazos rojos) asociados a HBC 502, y las regiones HH 24 y HH 26, al norte y sur respectivamente. La imagen a la izquierda muestra la polarimetría de la temporada de observación llevada acabo el 8/03/22 y la imagen de la derecha la temporada del 5/04/22	50
5.14. Mosaicos en tres colores, RGB de los ángulos de polarización 67.5° , 22.5° y 00° , respectivamente. La imagen de la izquierda corresponde a la primera temporada de observación (120s de integración), la imagen del centro a la segunda temporada (60s) y la imagen de la derecha a la tercera temporada (180s).	51
6.1. Comparación de los mapas de polarización de POLICAN (filtro H) en tres épocas de observación con tiempos de integración en forma creciente (60s, 120s y 180s). . .	54
6.2. Distribuciones espectrales de energía y parámetros de salida de las estrellas SSV 63NE, SSV 63E y SSV 63W	55
6.3. Distribución espacial de los flujos de salida ubicados al norte y sur de HBC 502. La región norte es ampliada para observar las estrellas fuente en esta zona.	58
6.4. Distribución espectral de energía de la estrella T Tauri HBC 502. Observe que la contribución del disco corresponde a un remanente pequeño comparado con las estrellas Clase II más jóvenes (Figura 6.2).	59
6.5. Parámetro U de Stokes de las tres épocas de observación (de izquierda a derecha, respectivamente). La cuarta imagen corresponde a la región más al sur observada en la tercera época.	61
6.6. Idem Figura 6.5 para el parámetro Q de Stokes.	62
6.7. Comparación de los mapas de polarización de POLICAN (filtro H) en tres épocas de observación con tiempos de integración en forma creciente (60s, 120s y 180s). . .	63

6.8. Distribuciones espectrales de energía de las estrellas HH 25MMS y HH 26IRS, respectivamente.	64
6.9. Comparación gráfica de la polarimetría en la región HH 24-26 obtenida con POLICAN y el JCMT. La primera imagen muestra los vectores de polarización en NIR utilizando filtro H ($1.63\mu\text{m}$) sobre una RGB de 2MASS en las bandas K, H y J, respectivamente. La segunda imagen muestra el mapa de polarización en longitud de onda de $850\mu\text{m}$, tomada de [27], identificando con números los núcleos submilimétricos. Se etiquetan algunas estrellas fuente reportadas en esta tesis.	66
A.1. Luz polarizada elípticamente. Imagen tomada de [8]. En el caso de la luz E_x y E_y corresponden a los máximos de las componentes del campo eléctrico	71
B.1. Patrón seccional de un haz polarizado a) horizontalmente b) verticalmente, c) circular derecha, d) circular izquierda, e) lineal a 20° , f) lineal a -45° , g) elíptica derecha a 45° . Imagen tomada de [8].	74
B.2. Luz polarizada elípticamente. Imagen tomada de [8]. En el caso de la luz E_x y E_y corresponden a los máximos de las componentes del campo eléctrico	75
B.3. La esfera de Poincaré muestra diferentes áreas y la especificación del punto general P en términos de los ángulos 2φ , medido en el sentido de las agujas del reloj desde H, y 2β , medido hacia abajo desde el ecuador.	76

Índice de tablas

1.1. Coordenadas de fuentes en la región noreste de L1630.	13
2.1. Protoestrellas generadoras de HHs en las regiones NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26.	23
2.2. Objetos HHs en la región de NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26	24
6.1. Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].	55
6.2. Parámetros físicos obtenidos de ajustes de SEDs	55
6.3. Parámetros de los flujos encontrados en la literatura de la región aledaña a HBC 502.	56
6.4. Parámetros físicos de HBC 502	59
6.5. Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].	63
6.6. Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].	63
6.7. Parámetros de los flujos encontrados en la literatura de la región HH 26	64

Capítulo 1

Introducción

En el medio interestelar destacan las nebulosas, que son concentraciones de gas (principalmente hidrógeno y helio) y polvo en el espacio interestelar. Algunas nebulosas son restos de estrellas que al final de su existencia han expulsado parte de su material mientras que otras, constituyen lugares de formación estelar [1]. Los estudios de imágenes de infrarrojo cercano (NIR, near infrared) ofrecen una excelente oportunidad de obtener muestras de estrellas jóvenes en regiones de formación estelar cercanas. Las emisiones en el infrarrojo cercano son relevantes en el estudio de las regiones de formación estelar porque nos permiten penetrar el polvo, detectar y caracterizar objetos jóvenes, estudiar las propiedades de discos y envolturas, y analizar las líneas espectrales de moléculas y átomos presentes en estas regiones. A través de su posición espacial, se pueden establecer características globales de la formación estelar de una región.

La nube molecular gigante L1630 en Orión B es una región de formación estelar cercana (del orden de 300-400pc) ampliamente estudiada. La nube es alargada y tiene dos centros bien definidos de formación estelar en curso, cada uno de los cuales está compuesto a su vez por 2 o 3 regiones de formación estelar activa. En la parte noreste se encuentran las nebulosas de reflexión NGC 2071 y NGC 2068, y la región HH 24-26 (ver Figura 1.1), mientras que al sur las nebulosas de reflexión NGC 2023 y NGC 2024. Los estudios de estas regiones han revelado fuentes estelares en todas las etapas de la evolución previa a la Secuencia Principal (PMS, pre-Main Sequence), desde protoestrellas de Clase 0 hasta estrellas T Tauri.

NGC 2071 y NGC 2068 han sido estudiadas a lo largo de las últimas 3 décadas y se han encontrado un gran número de objetos Herbig-Haro (HH) que exhiben una emisión prominente en [S II] pero sin emisión continua [2], esto se refiere a una línea de emisión específica del átomo de azufre ionizado [S II] presente en el espectro electromagnético que indica la presencia de gas caliente y ionizado en la región. Así mismo señala la ubicación de la zona de interacción de los flujos protoestelar (también llamados jets) con el gas molecular de los alrededores. Estos objetos HH tienen una variedad de estructuras morfológicas, desde nudos (knots) hasta nebulosidades irregulares, y su descubrimiento demuestra una fuerte actividad de objetos estelares jóvenes que los propician [2]. Por lo tanto, el estudio de estos objetos HH se ha centrado en la búsqueda de sus estrellas generadoras (estrellas fuente) y de los flujos de salida de éstas. Considerando que en las décadas anteriores la información era escasa, se han asociado de manera acertada 23 objetos HH con su estrella y flujo excitador, sin embargo, se reportan en diferentes publicaciones un total de 27 objetos HH sin identificación de su fuente generadora en toda la región mostrada en la Figura 1.1. Se hace notar que la región HH 24-26 ubicada al sur de NGC 2068 no tiene asociada una nebulosa de reflexión.

En la presente tesis se ha recopilado información de un total de 50 ($23 + 27$) objetos HH a través de artículos publicados desde 1976 hasta 2023. Los objetos HH posteriormente fueron identificados

consultando catálogos públicos existentes por medio de SIMBAD¹. Las coordenadas de las fuentes mostradas en la Figura 1.1 se listan en la Tabla 1.1. En particular la región HH 24-26 contiene varias componentes de HHs superpuestas que dificultan la asociación de las estrellas generadoras, como se estudiará en la Sección 1.4.

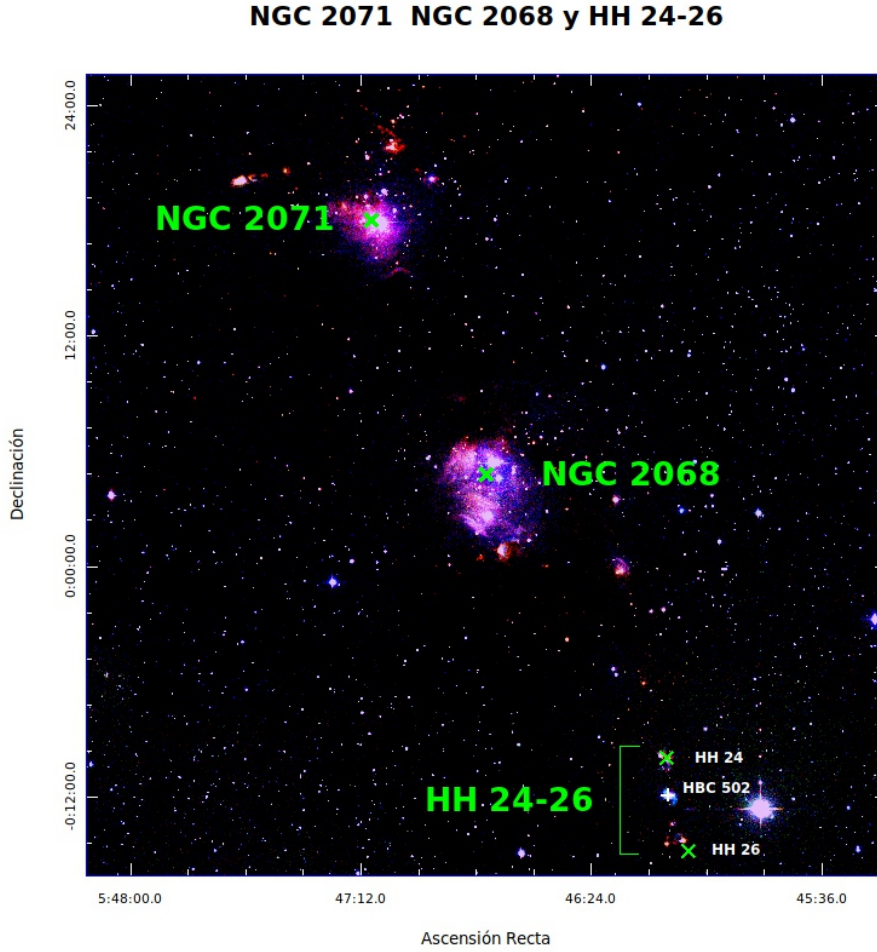


Figura 1.1: Imagen RGB (red, green, blue) en las bandas K ($2.159\mu m$), H ($1.662\mu m$) y J ($1.235\mu m$) de 2-MASS, respectivamente, correspondiente a la parte noreste de la nube molecular L1630. Se muestran las nebulosas de reflexión NGC 2071, NGC 2068 y la región HH 24-26. Esta región contiene al norte a HH 24, en su centro a HBC 502 y al sur HH 26, objetos del presente estudio.

1.1. Nebulosas de Reflexión

Las nebulosas de reflexión son observadas por la luz que se refleja tanto de estrellas embebidas en la nebulosa como de estrellas de fondo que están más allá de ella en el material molecular y polvo. Su espectro característico es el de líneas de absorción (reflejado) de las estrellas incrustadas. Si una nube de polvo está cerca de una estrella brillante, su luz se reflejara, es decir, la luz incidente choca con las partículas de polvo y rebota en diferentes direcciones sin cambiar su longitud de onda

¹<http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fid>

Tabla 1.1: Coordenadas de fuentes en la región noreste de L1630.

Fuente	Ascensión Recta (J2000)	Declinación (J2000)	Descripción
NGC 2071	05:47:09.8	+00:18:00	Nebulosa de reflexión
NGC 2068	05:46:45.8	+00:04:45	Nebulosa de reflexión
HH 24-26			
HH 24	5:46:08.6	-0:10:12	Conjunto de HHs
HBC 502	05:46:07.9	-00:11:57	Estrella T Tauri
HH 26	05:46:03.6	-00:14:49	Conjunto de HHs

significativamente. Se conocen unas 500 nebulosas de reflexión. Las regiones del cielo más ricas en nebulosas de reflexión son las áreas alrededor de las Pléyades y alrededor de la estrella gigante Antares. La nebulosa de reflexión tiende a verse más azul que la luz directa de la estrella porque la luz azul es dispersada más que la luz roja por los granos de polvo interestelares. El mismo razonamiento explica porqué el cielo diurno se ve más azul que el Sol; cuando se mira la luz del Sol dispersada, entonces el cielo se ve azul, aunque está iluminado por el Sol que es una estrella amarilla. En la Figura 1.1 se aprecian las nebulosas de reflexión en NGC 2071 y NGC 2068 con colores en el NIR.

1.2. Formación estelar

La formación estelar es el proceso por el cual una estrella nace en medio de una nube de gas molecular y polvo. Una nube de gas perturbada por el medio interestelar que la rodea, se torna inestable y comienza a colapsar gravitacionalmente debido a su propia masa; en el interior de la nube, la temperatura y la presión aumentan con ello la energía cinética y velocidad de las partículas del gas. La nube radía energía que ejerce presión sobre el medio circundante formando así un núcleo denso y opaco. La tendencia que tiene una nube a contraerse depende de su masa y de su densidad; cuanto mayor es la masa, mayor es la fuerza de contracción y viceversa [1].

Continuando este proceso, en el centro del núcleo se forma una protoestrella. La temperatura del gas en el centro de la protoestrella es tan alta que los átomos que lo forman alcanzan altas velocidades, si chocan dos núcleos de hidrógeno, se fusionan y forman un núcleo de helio. A partir de ese momento, la protoestrella entra en una fase en la que comienza la fusión del hidrógeno. En los procesos de fusión nuclear se libera una cantidad enorme de energía que provoca que el gas se caliente más, que aumenten la presión y temperatura, que haya mayores velocidades en las partículas y que por consiguiente haya un mayor índice de reacciones nucleares. Una vez que la fusión nuclear se estabiliza, alcanzando la temperatura, presión y densidad que mantienen las reacciones en el núcleo, ha nacido una estrella. Y a partir del momento en que comienzan a fusionar hidrógeno, las estrellas se mantienen vivas por varios miles de millones de años en la etapa llamada Secuencia Principal (MS, Main Sequence). La composición química de las estrellas depende de la composición química de las nubes de las cuales se formaron [5].

La vida de una estrella puede ser estimada a partir de dos de sus propiedades intrínsecas: el ritmo al que emite energía por unidad de tiempo, esto es, su luminosidad, y la cantidad de energía disponible para su emisión la cual es proporcional a la masa de la estrella [1]. Así, el estudio de la evolución de una estrella dependerá de su masa inicial. Se consideran estrellas de baja masa aquellas con masa del orden de $M \lesssim 0.5M_{\odot}$ (donde $M_{\odot}$ es la masa del sol), de masa intermedia con $0.5M_{\odot} \lesssim M \lesssim 9M_{\odot}$ y estrellas masivas aquellas con $9M_{\odot} \lesssim M \lesssim 30M_{\odot}$.

1.3. Evolución PMS de estrellas de baja masa

La vida de una estrella puede ser estimada a partir del ritmo al que emite energía por unidad de tiempo, y la cantidad de energía disponible para su transmutación nuclear, es decir, cuanta menos masa tenga una estrella, más lenta será su evolución. Cuanto más jóvenes son las estrellas, más denso es el gas que tiene asociado, esto afirma la premisa de que las estrellas se forman por condensación del material interestelar.

La mayoría de las estrellas permanecen la mayor parte de su vida en la Secuencia Principal (MS), evolucionando lentamente en un proceso de contracción gravitatoria cuasiestático. Las estrellas de baja masa, en su paso a la MS, pasan por distintas etapas evolutivas, conocidas como fase pre-Secuencia Principal (PMS, pre-Main Sequence). A estas estrellas se les llama objetos estelares jóvenes (YSO, Young Stellar Object).

El proceso de formación estelar está constituido teóricamente por los modelos de Larson, quien siguió la evolución de un fragmento de nube molecular con simetría esférica para diferentes valores de su masa. Las condiciones iniciales eran tales que el fragmento de nube estuviera cercano a la inestabilidad siguiendo el criterio de Jeans [5].

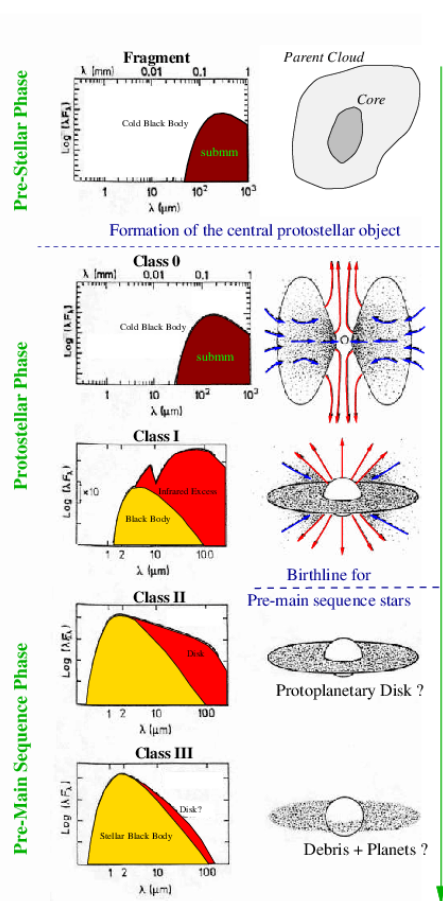


Figura 1.2: Clasificación de las etapas evolutivas en estrellas de baja masa, en las fases pre-estelar, protoestelar y pre-Secuencia Principal (Imagen tomada de [6], basada en Lada [1987] y Andre et al. [1993]).

Secuencia del modelo de evolución estelar de Larson para estrellas de baja masa [5] :

- Colapso isotérmico. El colapso es inicialmente isotérmico, puesto que la energía generada en el proceso de compresión gravitatoria es radiada fácilmente en el infrarrojo lejano, dado que el material es inicialmente transparente a esta radiación. Este colapso se produce de forma no homóloga: es decir, que a pesar de ser la densidad inicial uniforme, la densidad aumenta mucho más rápidamente en el centro, acentuándose esta diferencia a medida que avanza el proceso (fase pre-Estelar en Figura 1.2).
- Formación de un primer núcleo central. El colapso continúa y el material se vuelve opaco y la energía no puede ser radiada, aumentando la temperatura y la presión, con lo que se detiene el colapso y se forma un núcleo central, cerca del equilibrio hidrostático. Fuera del núcleo, el material restante sigue cayendo sobre él, formándose un frente de choque al ser frenado bruscamente en su superficie (objetos Clase 0 en Figura 1.2).
- Colapso del primer núcleo. La compresión del núcleo, junto con la energía liberada en el frente de choque en su superficie, hacen que éste se caliente. El núcleo se mantiene cercano al equilibrio hidrostático hasta que su temperatura alcanza 2000K, produciéndose entonces la disociación del hidrógeno molecular. Este proceso consume energía, provocando el colapso del núcleo. Este colapso se desarrolla mucho más rápidamente que el de toda la nube, puesto que se inicia con una densidad más alta. Finalmente, el núcleo más exterior desaparece cuando toda su masa ha caído sobre el núcleo interior, que constituye la protoestrella (objetos Clase I en Figura 1.2).
- Fase de acreción principal. Después de haber desaparecido el primer núcleo, ya sólo queda el núcleo protoestelar hidrostático y una envoltura cayendo prácticamente en caída libre sobre él. En la envoltura la velocidad de caída, la densidad y la temperatura aumentan hacia el centro. A medida que crece la masa del núcleo, aumenta la velocidad del material que cae sobre él (y por tanto, la energía cinética disipada) por lo que aumenta la luminosidad de la protoestrella (objetos Clase I en Figura 1.2).
- Evolución pre-Secuencia Principal (PMS). Cuando prácticamente la totalidad de la envoltura ha sido acretada, ésta se vuelve transparente y el núcleo se hace visible, aunque todavía no se trata de una estrella, sino de un objeto PMS. En esta etapa la energía cinética del material acretado es despreciable y la luminosidad del objeto proviene de la lenta contracción del núcleo. La contracción continúa hasta que se inician las reacciones de fusión termonuclear del hidrógeno y el objeto alcanza la Secuencia Principal MS, convirtiéndose en una estrella (objetos Clase II a III en Figura 1.2) .

En las estrellas de baja masa encontramos las estrellas T Tauri, estrellas PMS de tipo solar en estado evolutivo temprano, estrellas jóvenes, aún en el proceso de contracción gravitatoria, evolucionando hacia la MS, y aunque su evolución puede ser descrita por el modelo de Larson se destaca por la presencia de flujos protoestelares detallados en la siguiente clasificación observacional [6], [7].

Fuentes infrarojas-milimétricas de **Clase 0**. Durante su evolución la nube de polvo original va perdiendo gradualmente el soporte magnético y turbulento. Estos objetos tienen un núcleo protoestelar en contracción. Durante la etapa de contracción el material circundante se acumula en lo que será un disco de acreción que rodeará la estrella en formación. A medida que el material cae hacia lo que será el disco, parte de él es canalizado hacia los polos de la protoestrella a lo largo de líneas de campo magnético. Este material canalizado se acelera y es expulsado en forma de chorros a altas velocidades en direcciones opuestas a lo largo del eje de rotación de la protoestrella. Estos chorros, conocidos como flujos bipolares, pueden ser altamente energéticos ($E_k \sim 10^{43-47}$ erg) y colimados, pueden extenderse a distancias significativas y alcanzar velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo. Se exhibe también una amplia variedad de fenómenos astrofísicos, como

son los objetos Herbig-Haro (HH). De acuerdo a su nivel de colimación se pueden distinguir los: (1) flujos bipolares masivos de gas molecular frío, y (2) los chorros ópticos largos y delgados, los cuales usualmente están relacionados a objetos HH. La duración de esta etapa es a lo sumo de 30000 años.

En las fuentes **Clase I** la envoltura de gas y polvo ha desaparecido, aunque la protoestrella aún aumenta su masa debido al material acretado. También están presentes los flujos moleculares aunque ya no son tan colimados. La temperatura del objeto es entre -200 y $+300^{\circ}\text{C}$, permaneciendo en esta etapa alrededor de 200000 años.

Clase II: Esta etapa se define por poseer una estrella tipo T Tauri que ha barrido con la mayoría del material periférico de tal manera que el remanente circundante no es sino un disco nebular. La emisión en el infrarojo se debe a la absorción y re-emisión térmica del disco. La acreción produce fricción entre anillos de distinta velocidad en el disco y lo calienta, provocando también emisión térmica. Los miembros más jóvenes de esta clase tienen flujos, y todos poseen vientos fuertes. Sus edades varían entre 0.5 y 3 millones de años, aunque algunas estrellas pueden tener hasta 20.000.000 años aproximadamente.

Las fuentes infrarrojas de **Clase III:** El disco nebular comienza a desaparecer por el hecho de que la materia restante pasa a conformar planetas u otras estrellas compañeras. Una vez que el disco ha desaparecido (su gas y polvo se ha eyectado del sistema ya sea por el viento estelar, por inestabilidades dinámicas y/o ha sido incorporado a protoplanetas) y los flujos han cesado, queda una estrella T Tauri "desnuda" (ver Figura 1.2).

Por otro lado, los objetos HH están ubicados en los extremos de los flujos protoestelares, y marcan la ubicación de la zona de interacción del jet con el gas molecular de los alrededores. es el gas de la nube molecular ambiental que es barrido por un viento estelar rápido colimado por el disco de acreción circunstelar.

Cabe destacar que la intensidad de los flujos de salida aumenta con la energía magnética inicial de la nube, así como el tamaño del disco circunestelar, mismo que posteriormente se aplanará a lo largo del eje de rotación y/o la dirección del campo magnético [15]. Dicho esto, nuestra atención es dirigida al campo magnético ya que toma protagonismo en la formación estelar de la siguiente manera:

- El estado inicial de la nube está determinado por las relaciones entre las energías térmica, rotacional y magnética de la nube y el módulo de su energía gravitacional.
- La formación está regulada por fuertes campos magnéticos a través del proceso de difusión ambipolar.
- Los movimientos turbulentos del gas, los flujos de salida y los vientos estelares proporcionan un soporte no magnético contra el colapso.

1.4. Objetos Herbig-Haro

Los flujos de salida protoestelares se encuentran como eventos fundamentales que ocurren durante el proceso de formación estelar. Se cree que regulan procesos como la eliminación del exceso de momento angular del sistema estrella-disco y la dispersión de la nube madre. Se observan en todas las etapas evolutivas de los objetos estelares jóvenes (YSO) donde se produce la acreción de material molecular, en las etapas de Clase 0 y Clase I (ver Figura 1.2), y en todo el espectro de masas estelares, desde protoestrellas enanas marrones a estrellas jóvenes masivas de alta luminosidad, y se detectan en un amplio rango de longitudes de onda mediante emisión continua y emisión lineal de transiciones atómicas moleculares, neutras e ionizadas [3].

Los objetos Herbig-Haro (HH) son la manifestación óptica de los flujos de salida. Son pequeñas nebulosas excitadas por choque visibles en líneas de baja excitación (por ejemplo, $[\text{O I}]$, $\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]$) producidas por el enfriamiento radiativo en las zonas posteriores al choque. La mayoría de los HHs aparecen como una cadena de nudos alineados en un jet altamente colimado (jet HH) que termina

en un arco de choque brillante donde el jet choca con el medio circundante. Las escalas espaciales cubiertas por los flujos HH van desde unas pocas UA , en el caso de los micro jets de las estrellas T Tauri hasta varios parsecs (flujos gigantes de Herbig-Haro). Los nudos trazan choques internos impulsados por la variabilidad de la velocidad de eyección [18].

Con frecuencia, la morfología del jet muestra discontinuidades en su distribución espacial, lo que suele atribuirse a la variabilidad temporal del material eyectado desde la fuente. Debido a esto, las imágenes que cubren un amplio campo de visión alrededor de la fuente excitadora son esenciales para explorar el historial de eyección masiva. Los jets de HHs interactúan con la nube molecular natal a medida que viajan hacia el exterior arrastrando material ambiental y dando lugar a flujos de salida moleculares a gran escala.

1.5. Motivación de esta tesis

Como parte inicial de esta tesis y con la finalidad de familiarizarse con los mapas y catálogos astronómicos, se hizo una búsqueda y recopilación de objetos Herbig Haro en la región noreste de la nube molecular L1630, como elementos que evidencian la presencia de formación estelar activa. Particularmente en la región sureña hay un objeto muy brillante, una estrella T Tauri denominada HBC 502, acompañada de dos agrupaciones de emisión infrarroja asociada a objetos HH, al norte y sur que aparentemente pueden tener la misma distancia desde HBC 502. Es posible entonces suponer que en su etapa de T Tauri, HBC 502 sea generadora de flujos bipolares que dan lugar a estos objetos HH.

La emisión asociada a los HHs se puede detectar a través de la luz de las estrellas en imágenes polarimétricas donde los mapas de vectores de polarización muestran una morfología de arco de choque en dirección entrante al medio interestelar desde su estrella progenitora. Tal es la morfología que se espera observar si los HHs (24-26) estuviesen directamente relacionados con HBC 502.

Para este fin se realizaron observaciones astronómicas en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro OAGH² centrándose en la T Tauri siguiendo el patrón de observación ON/OFF (descrito en la Sección 4.1), cubriendo el área completa de interés para estudiar además el material alrededor de esta estrella (disco, envolvente). La región total a observar corresponde al complejo HH 24-26 que contiene un gran número de objetos HH.

Haciendo una primera revisión bibliográfica se encontró que ninguno de estos HHs es excitado por HBC 502 sino que por la geometría y otras observaciones de alta resolución son asociados a otras estrellas Clase 0 a Clase II. Esto indicaría que HBC 502 es una estrella T Tauri tardía cercana a Clase III.

El estudio polarimétrico da pie a investigar el estado evolutivo de las estrellas en el complejo HH 24-26, así como la recopilación de las estrellas progenitoras existentes y tener una visión más clara de la formación estelar en esta región.

En el siguiente capítulo se describe la región al noreste de L1630, sus nebulosas, el contenido de HHs con sus estrellas generadoras y se introducen las características de HBC 502. En el Capítulo 3 se revisa la teoría de la luz polarizada hasta la descripción de los parámetros de Stokes y las matrices de Muller asociadas al instrumento POLICAN, utilizado en la obtención de la polarimetría indispensable para conocer el campo magnético en la región HH 24-26. En el Capítulo 4 se reportan observaciones polarimétricas de HBC 502 y los HHs aledaños en cuatro ángulos de polarización en el infrarrojo cercano (NIR). Este procedimiento se repite en tres épocas de observación y sus resultados se comparan en el Capítulo 5. El conjunto de todo lo anterior con la determinación de la distancia más precisa y comparando con datos polarimétricos en otras longitudes de onda de diferentes autores, se discute en el Capítulo 6. Se enumeran las conclusiones de ésta tesis en el último capítulo.

²<https://oagh.org.mx/>

Capítulo 2

Nebulosas de reflexión NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26 (HBC 502)

Al noreste de la nube molecular L1630 destacan tres regiones de formación estelar, NGC 2071 y NGC 2068 dos nebulosas de reflexión y la región HH 24-26 ubicada al sur de estas.

Es importante distinguir que la formación de estrellas es un proceso complejo y dinámico, y la masa de una estrella se ve influenciada por factores como la cantidad de gas y polvo disponible, la tasa de acreción de materia, etc. y por lo tanto es posible observar estrellas en diferentes etapas evolutivas.

2.1. Las nebulosas NGC 2071 y NGC 2068

NGC 2071 y NGC 2068 son dos nebulosas de reflexión localizadas al noreste de la nube molecular compleja L1630 también conocida como Orión B a una distancia de 400-500 pc ($1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA} = 3.2616 \text{ años luz} = 3.0857 \times 10^{16} \text{ m}$). Las nebulosas de reflexión reflejan la luz estelar en los granos de polvo del medio interestelar, estos objetos son caracterizados por el color azul y su luz está polarizada debido a la orientación de los granos de polvo según el campo magnético local. Se ha detectado formación estelar activa debido a la presencia de varios objetos Herbig-Haro (HH) que a su vez revelan una fuerte actividad de objetos estelares jóvenes.

La nebulosa de reflexión **NGC 2071**, descubierta por William Herschel en 1789, se encuentra en la nube molecular L1630 de Orión B, a una distancia de 390 pc. La nebulosa sugiere ser la fuente puntual IRAS 05445+0016 (IRAS, Infrared Astronomical Satellite es una designación que especifica la posición de una fuente astronómica en el catálogo del satélite IRAS utilizando coordenadas de ascensión recta y declinación), la emisión infrarroja de 12-100 μm es intensa y extendida y probablemente surge del polvo calentado en la nebulosa. Cuatro minutos de arco al norte de la nebulosa se encuentra el centro de formación estelar en esta región, un núcleo de nube molecular densa y un grupo de fuentes infrarrojas conocido como NGC 2071-IR ver Figura 2.1.

La formación estelar de esta región fue insinuada por primera vez por la presencia de máseres de agua (H_2O), hidroxilo (OH) y la fuente infrarroja NGC 2071-IR, también identificada como SSV 41 por Strom, K. M., Strom, S. E., Vrba, F., 1976 [24]. La fuente era considerada muy joven y profundamente embebida, aunque más tarde se demostró que un pequeño grupo de objetos con emisión en radio está asociado con NGC 2071-IR [16].

Observaciones hechas en longitudes de onda submilimétrica han mostrado emisión compacta que rodea a NGC 2071-IR y de un componente extendido del resto del núcleo. Existe un flujo de salida molecular bipolar que está orientado aproximadamente de forma perpendicular al alargamiento del núcleo a gran escala. La polarimetría submilimétrica sugiere que el campo magnético a gran escala

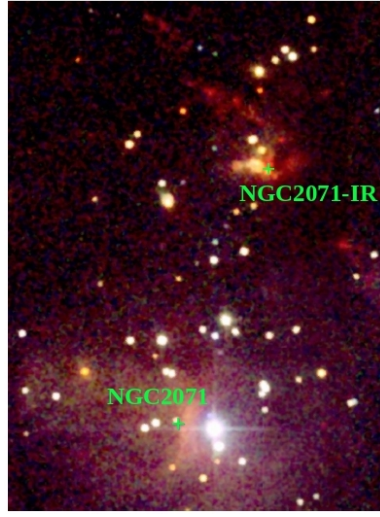


Figura 2.1: Imagen RGB (K, H y J) obtenida de [SIMBAD](#) del catálogo de 2MASS de la nebulosa de reflexión NGC 2071 y región de formación estelar NGC 2071-IR.

se encuentra a lo largo del eje largo del núcleo, o quizás tiene un fuerte componente toroidal a lo largo del eje del flujo de salida, aunque parece haber un componente también en la dirección del flujo de salida que no aparece en la emisión de polvo polarizado [16].

NGC 2068 (también conocida como vdB 59) es la nebulosa de reflexión más brillante que forma el objeto Messier M 78. La nebulosa fue descubierta por Pierre François André Méchain en 1780 y catalogada como h368 por John Herschel en 1864. La nebulosa contiene tres estrellas ópticamente visibles: HD 38563-N, -S y -C. Los estudios de polarización óptica apuntan a que HD 38563-N es la fuente dominante de iluminación y que N y S son probablemente estrellas B (ver B.5) tempranas (B1.5 y B4, respectivamente), mientras que C es una estrella A0. Se ha inferido que las estrellas que iluminan NGC 2068 deben estar detrás de la nebulosidad óptica debido a su aparente debilidad por el color y el tamaño de la nebulosa. Existe una asociación estrecha entre la nebulosa visible y el gas molecular en NGC 2068 [16]. Una franja de polvo oscuro es evidente hacia el borde occidental de la nebulosa que separa NGC 2064 y NGC 2067 de NGC 2068 (Figura 2.2).

Imágenes de emisión continua tomadas en longitudes de onda submilimétricas muestran varios núcleos de polvo a lo largo de la franja de polvo, esto implica que algunos de los núcleos se encuentran frente a la nebulosa. Sin embargo, hay algunos núcleos que parecen estar fuera del carril que probablemente se encuentran detrás de la emisión óptica, dando una pista sobre la distribución tridimensional del gas en esta región de L 1630. En 2002, el estudio de polarimetría submilimétrica realizado por Matthews y Wilson [14] reveló que los filamentos LBS 10 y LBS 17 presentan direcciones de campo magnético notablemente diferentes. Aunque los datos submilimétricos indican una posible relación entre ellos, es probable que representen dos filamentos espacialmente distintos.

2.2. Región de formación estelar HH 24-26 (HBC 502)

La región **HH 24-26** contiene los objetos HH 24, HH 25 y HH 26 (ver Figura 2.3) que están asociados a un núcleo de nube molecular alargado y bien definido de norte a sur que se extiende aproximadamente $8'$ [[19], [20], [21] mencionados por [16]]. Esta región también contiene a la estrella T Tauri HBC 502 quien a primera vista se podría pensar como fuente excitadora de los objetos HH 24 (al norte) y HH 26 (al sur). Tal hipótesis se puede corroborar inicialmente a través de una investigación bibliográfica.

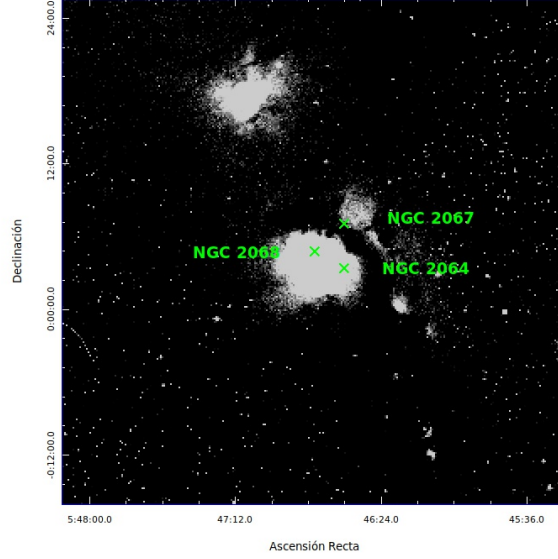


Figura 2.2: Imagen tomada de [SkyView](#) en banda J (300X300 pixeles), se señalan las nebulosas de reflexión NGC 2067, NGC 2068 y NGC 2064

La región cuenta con una gran cantidad de fuentes de flujo de salida detectadas en diversas longitudes de onda ópticas, infrarrojas, milimétricas y centimétricas [16], así como un gran número de objetos HH y sus fuentes excitadoras. No se ha reportado evidencia que corrobore la hipótesis de que HBC 502 esté relacionada con los objetos HH 24 y HH 26, por el contrario, se reportan múltiples fuentes excitadoras de estos HHs tanto al norte como al sur de HBC 502.

2.3. Estrellas generadoras y contenido de HHs

La edad de una estrella nos dice más que el estado evolutivo en que se encuentra, nos dice cuáles son las características y condiciones que esta posee como lo son componentes de disco, saber si se encuentra acretaando material, presencia de flujos bipolares y de objetos Herbig Haro, etc.

Se ha llevado a cabo una investigación de aquellas protoestrellas existentes en la región que abarca a NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26 para posteriormente mostrar un poco de su actividad dinámica por medio de flujos bipolares u objetos HH encontrados. Para la región HH 24-26 se consideraba que la estrella T Tauri HBC 502 era potencialmente excitadora de los objetos al norte y sur por la simetría aparente entre los que podrían considerarse flujos bipolares, sin embargo se obtuvo que se trataba de sistemas múltiples o estrellas embebidas ubicadas al norte y sur de esta estrella y que habían causado estos fenómenos más recientemente.

En la Tabla 2.1 se muestra una lista de estrellas fuente identificadas como generadoras de objetos HH en toda la región estudiada. Se detalla la clasificación en que se encuentran según su estado evolutivo tomado de [16] (con las coordenadas dadas en α en ascensión recta y δ la declinación). Algunas fuentes clasificadas como Clase II que tienen asociados HHs pueden tratarse de estrellas T Tauri tempranas.

Al inicio de esta investigación se tomaron como referencia los veintiún objetos Herbig Haro reportados por [2] en la región que va desde la nebulosa de reflexión NGC 2071 hasta el complejo HH 24-26. En este artículo se discute su morfología y ubicación pero no hay asociación a estrellas fuente en particular. Posteriormente, en artículos más recientes (ver [3], [4], [16], [24]) se encontró

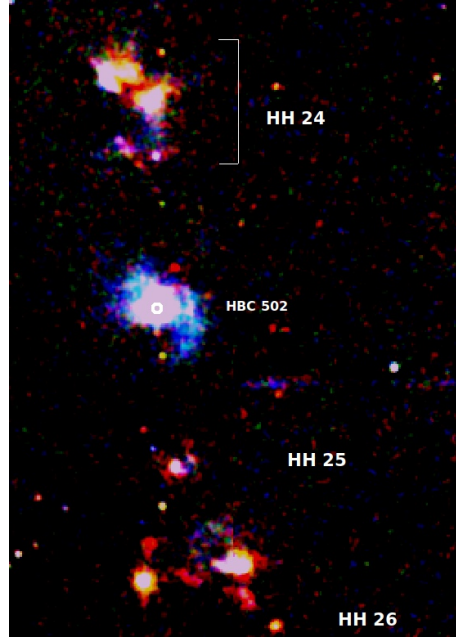


Figura 2.3: Imagen RGB de 2MASS en las bandas K ($2.159\mu m$), H ($1.662\mu m$) y J ($1.235\mu m$), respectivamente de la región de formación estelar HH 24-26.

que habían cerca de cincuenta objetos HH. No todos han sido relacionados con una fuente excitadora y al mismo tiempo se encontraron tres fuentes en la región HH 24-26 sin un HH asociado, LBS 17-H (Clase 0), HH24MMS (Clase 0) y SSV 59 (Clase II). En [18] se tomaba a SSV 59 como estrella fuente del objeto HH 26 sin embargo en [23] se toma a HH26 IRS como fuente del complejo HH 26 incluyendo los objetos HH y el flujo de salida. En general hay regiones en donde resulta difícil establecer la asociación de HHs con su fuente excitadora.

Un resumen de esta recopilación de objetos HH y fuentes progenitoras fue reportado como parte del póster presentado en el LXV Congreso Nacional de Física en Octubre de 2022 (LXV-005091), titulado Polarización en el NIR de NGC 2068 (ver Apéndice A).

En particular, la Figura 2.4, muestra la distribución y localización de los objetos HH de la región HH 24-26 encontrados como resultado de una profunda investigación en diversos artículos y con ayuda de SIMBAD¹, así como su fuente excitadora.

La Tabla 2.2 muestra una recopilación bibliográfica de los 50 objetos HH conocidos en las regiones estudiadas, incluye la fuente de excitación más probable según la literatura ([3], [4], [16], [24]), sus coordenadas ecuatoriales (con α en ascensión recta y δ en declinación), y la clasificación evolutiva de las estrellas fuente. En el capítulo de Discusión se mencionan los flujos de salida asociados con estos HHs de la región HH 24-26, así como sus características principales.

¹<http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fid>

CAPÍTULO 2. NEBULOSAS DE REFLEXIÓN NGC 2071, NGC 2068 Y HH 24-26 (HBC 502)

2.3. ESTRELLAS GENERADORAS Y CONTENIDO DE HHS

Tabla 2.1: Protoestrellas generadoras de HHs en las regiones NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26.

Estrella Fuente	Clase
NGC 2071-IR	I
V 1647 Ori	I/II
SSV 63E	II
SSV 63NE	II
SSV 63W	II
HOPS 317	0
HH 25MMS	0
HH 26IRS	I
HBC 510	II

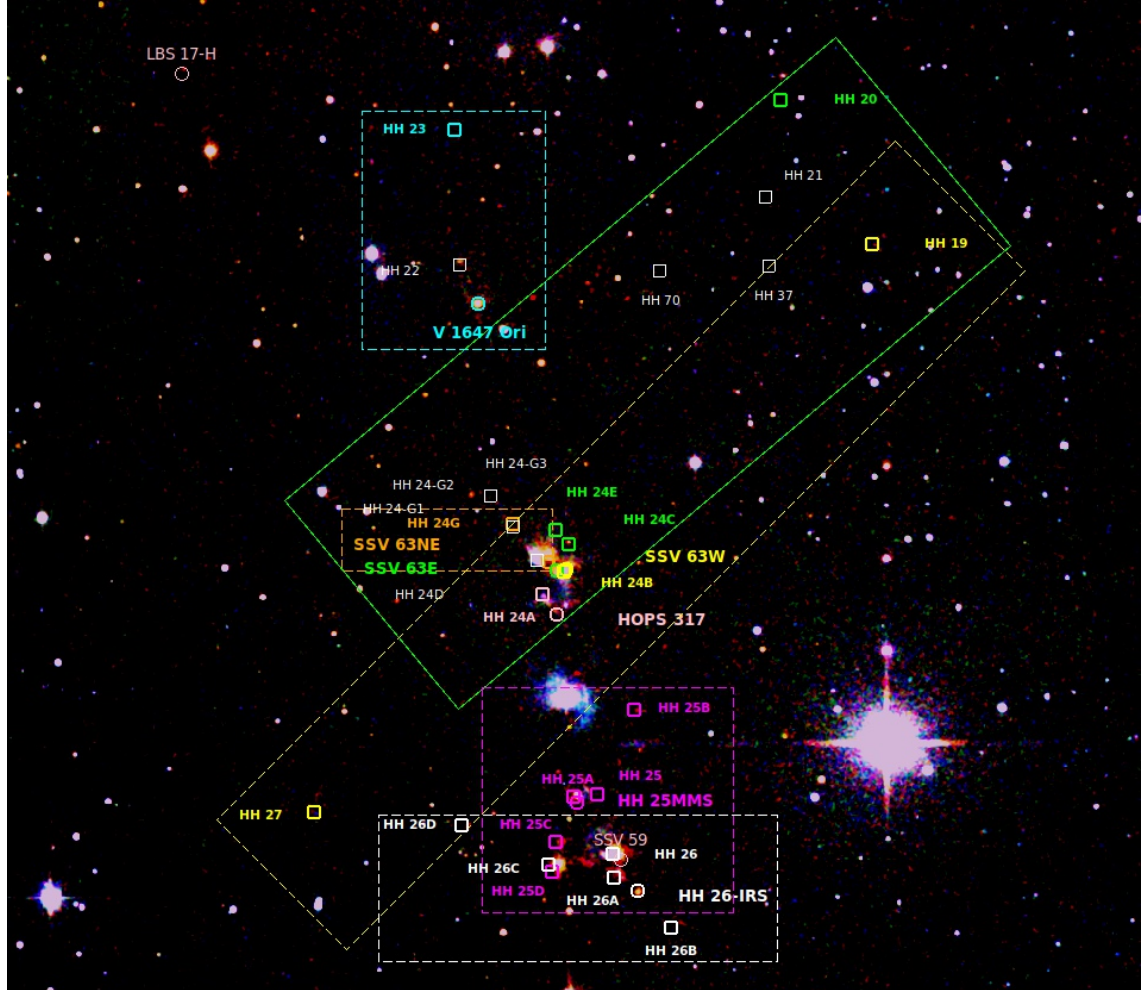


Figura 2.4: Estrellas fuentes en la región cercana a HBC 502. Los recuadros punteados limitan la extensión de los HHs (cuadros) asociados a su estrella progenitora (círculos) etiquetados con el mismo color. Las tres estrellas sin HH asociado se muestran en un círculo con color rosa, más tenue que las demás.

CAPÍTULO 2. NEBULOSAS DE REFLEXIÓN NGC 2071, NGC 2068 Y HH 24-26 (HBC 502)

2.3. ESTRELLAS GENERADORAS Y CONTENIDO DE HHS

Tabla 2.2: Objetos HHs en la región de NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26

HH	α (J2000)	δ (J2000)	Fuente	α (J2000)	δ (J2000)	Clase
19	05:45:49.60	-00:05:12.0	SSV 63W	05:46:07.87	-00:10:01.4	II
19-A	05:45:49.61	-00 05 12.1				
19-B	05:45:49.60	-00:05:12.0	SSV63W	05:46:07.89	-00:10:02.0	II
20	05:45:55.10	-00:03:04.1				
21	05:45:56.00	-00:04:30.0				
22	05:46:14.20	-00:05:31.0				
23	05:46:14.52	-00:03:30.8	V 1647 Ori	05:46:13.13	-00:06:04.9	I/II
24	05:46:09.00	-00:10:12.0				
24-A	05:46:09.23	-00:10:25.6	HOPS 317	05:46:08.42	-00:10:43.1	0
24-B	05:46:07.97	-00:10:05.5				
24-C	05:46:07.69	-00:09:40.3	SSV 63E	05:46:08.46	-00:10:03.0	II
24-D	05:46:09.64	-00:09:54.3				
24-E	05:46:08.50	-00:09:28.0				
24-G	05:46:11.00	-00:09:22.0	SSV 63NE	05:46:08.92	-00:09:56.0	II
24-G1	05:46:11.01	-00:09:24.3				
24-G2	05:46:11.70	-00:09:12.5				
24-G3	05:46:12.39	-00:08:57.3				
24-J	05:46:07.97	-00:10:05.5	SSV 63W	05:46:07.87	-00:10:01.4	II
25	05:46:06.00	-00:13:24.0				
25-A	05:46:07.40	-00:13:26.0	HH 25MMS	05:46:07.26	-00:13:30.7	0
25-B	05:46:03.80	-00:12:08.0	HH 25MMS	05:46:08.42	-00:10:43.1	0
25-C	05:46:08.50	-00:14:07.0				
25-D	05:46:08.70	-00:14:33.0	HH 25MMS	05:46:07.26	-00:13:30.7	0
26	05:46:05.10	-00:14:17.0	HH26 IRS	05:46:03.63	-00:14:49.3	II
26-A	05:46:05.00	-00:14:38.0	HH26 IRS	05:46:03.63	-00:14:49.3	I
26-B	05:46:01.60	-00:15:23.0	HH26 IRS	05:46:03.63	-00:14:49.3	I
26-C	05:46:08.90	-00:14:27.0	HH26 IRS	05:46:03.63	-00:14:49.3	I
26-D	05:46:14.05	-00:13:51.3	HH26 IRS	05:46:03.63	-00:14:49.3	I
27	05:46:22.90	-00:13:40.0	SSV 63W	05:46:07.87	-00:10:01.4	II
37	05:45:55.80	-00:05:32.0				
70	05:46:02.30	-00:05:36.0				
71	05:47:20.60	+00:40:44.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
437	05:47:05.68	+00:21:49.6	NGC 2071-IR	05:47:05.01	00:21:47.2	I
438-A	05:47:07.42	+00:11:47.1				
438-B	05:47:10.94	+00:11:06.8				
438-C	05:47:12.09	+00:11:04.2				
440-A	05:46:36.30	+00:26:24.0				
440-B	05:46:42.27	+00:25:39.8				
442	05:47:09.14	+00:01:16.9				
443	05:47:35.51	+00:32:35.9				
452-A	05:48:07.23	+00:18:57.1				
452-B	05:48:04.41	+00:19:15.0				
471-A	05:47:35.10	+00:38:47.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
471-B	05:47:34.40	+00:38:36.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
471-C	05:47:34.70	+00:38:21.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
471-D	05:47:33.40	+00:38:59.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
471-E	05:47:35.69	+00:37:54.0	HBC 510	05:47:35.76	+00:38:39.9	II
472	05:47:38.96	+00:38:36.2				
473	05:47:40.60	+00:37:59.0				
474	05:47:46.30	+00:39:05.0				

Capítulo 3

Polarización y Parámetros de Stokes

La polarimetría se utiliza en ambientes astronómicos para obtener información sobre la luz que emiten los objetos celestes, lo que puede proporcionar información valiosa sobre las propiedades físicas y la estructura de estos objetos. La polarimetría mide la polarización de la luz, que se refiere a la orientación del campo eléctrico de la luz.

La polarización de la luz puede ser causada por la reflexión, la dispersión, la emisión y la transmisión de la luz a través de medios materiales y magnéticos.

Estudiar regiones de formación estelar es entender la formación y evolución de las estrellas. En este caso la polarimetría es importante porque puede proporcionar información valiosa sobre la geometría de los campos magnéticos, la presencia de materiales alineados, la detección de objetos ocultos y la caracterización de la naturaleza de la luz emitida.

3.1. Polarización y campo magnético

La ecuación del campo eléctrico de una onda electromagnética que cumple con las ecuaciones de Maxwell (en el vacío), se define de la siguiente manera:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

cuya solución general es de la forma:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (3.2)$$

La parte real que representa la magnitud instantánea del vector eléctrico $\mathbf{E}$ está dada por:

$$E = E_0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t), \quad (3.3)$$

con el vector de onda $\mathbf{k}$ indicando la dirección de propagación en z . Las componentes en el plano perpendicular quedan entonces:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \sin(\omega t - \epsilon_x) \\ E_y &= E_{0y} \sin(\omega t - \epsilon_y) \end{aligned} \quad (3.4)$$

en donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de las vibraciones en dos direcciones perpendiculares y ω es la pulsación igual a $2\pi\nu$ [9]. Si $E_{0y}/E_{0x} = \tan \alpha$ ($0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$) y la diferencia de fase $\delta = \epsilon_x - \epsilon_y$, son constantes, el campo de las componentes en la Ecuación 3.4 está polarizado elípticamente en el plano xy .

CAPÍTULO 3. POLARIZACIÓN Y PARÁMETROS DE STOKES

3.1. POLARIZACIÓN Y CAMPO MAGNÉTICO

Si se rota el plano (ver Figura 3.1) un ángulo φ tal que $\tan 2\varphi = \tan \alpha \cos \delta$, los ejes coordenados coinciden con los ejes principales de la elipse y la Ecuación 3.4 toma la forma:

$$\begin{aligned} E_\varphi &= E_0 \cos \beta \sin \omega t \\ E_{\varphi+\frac{\pi}{2}} &= E_0 \sin \beta \cos \omega t \end{aligned} \quad (3.5)$$

donde $\tan \beta$ se conoce como la elipticidad y β el ángulo de elipticidad. Las expresiones que relacionan el plano inicial (xy) con el plano rotado ($\varphi, \frac{\varphi}{2}$) son las siguientes:

$$\begin{aligned} \sin 2\beta &= \sin 2\alpha \sin \delta \\ \tan 2\varphi &= \tan 2\alpha \cos \delta \end{aligned} \quad (3.6)$$

y

$$\begin{aligned} \cos 2\alpha &= \cos 2\beta \cos 2\varphi \\ \tan \delta &= \tan 2\beta \csc 2\varphi \end{aligned} \quad (3.7)$$

así

$$\begin{aligned} \frac{c}{4\pi} 2E_{0x}E_{0y} \cos(\epsilon_x - \epsilon_y) &= I \cos 2\beta \sin 2\varphi \\ \frac{c}{4\pi} 2E_{0x}E_{0y} \sin(\epsilon_x - \epsilon_y) &= I \sin 2\beta \end{aligned} \quad (3.8)$$

donde I es la intensidad de la onda, $I = \frac{c}{4\pi} E_0^2 = \frac{c}{4\pi} [E_{0x}^2 + E_{0y}^2] = I_x + I_y$

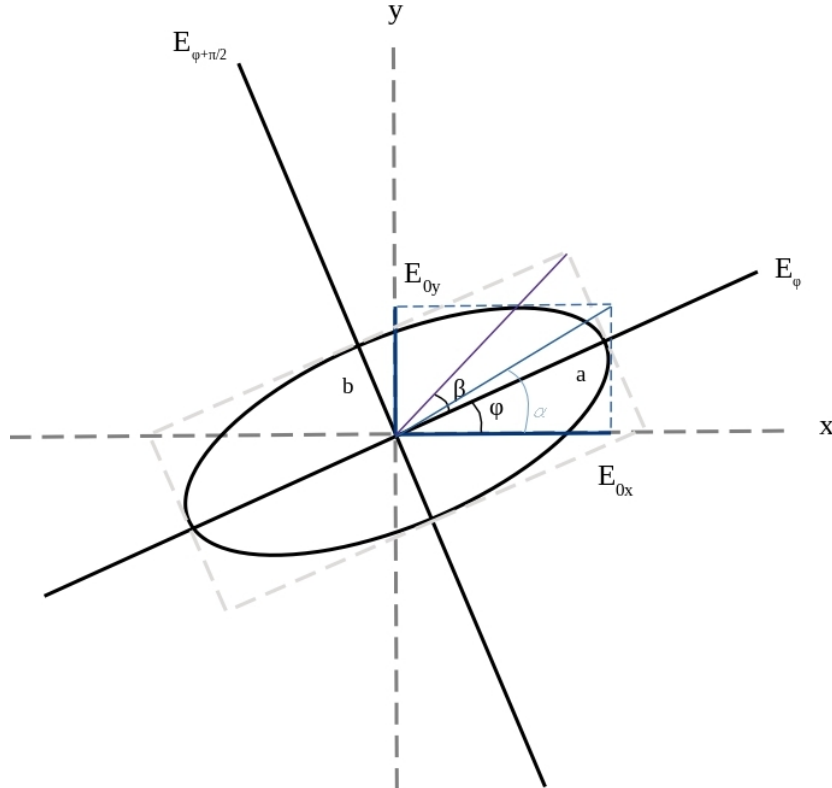


Figura 3.1: Representación de polarización elíptica rotada un ángulo ϕ

CAPÍTULO 3. POLARIZACIÓN Y PARÁMETROS DE STOKES

3.1. POLARIZACIÓN Y CAMPO MAGNÉTICO

Se pueden entonces definir los parámetros de Stokes Q , U y V que complementan a I :

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{c}{4\pi} (E_0)^2 = \frac{c}{4\pi} [(E_{0x})^2 + (E_{0y})^2] = I_x + I_y \\
 Q &= \frac{c}{4\pi} [(E_{0x})^2 - (E_{0y})^2] = I \cos 2\alpha = I \cos 2\beta \cos 2\varphi = I_x - I_y \\
 U &= \frac{c}{4\pi} 2E_{0x}E_{0y} \cos(\epsilon_x - \epsilon_y) = I \sin 2\alpha \cos \delta = I \cos 2\beta \sin 2\varphi = (I_x - I_y) \tan 2\varphi \\
 V &= \frac{c}{4\pi} 2E_{0x}E_{0y} \sin(\epsilon_x - \epsilon_y) = I \sin 2\alpha \sin \delta = I \sin 2\beta = (I_x - I_y) \tan 2\beta \sec 2\varphi.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Es más conveniente usar estos parámetros de Stokes que α y δ o β y φ . Un análisis más detallado de estos parámetros de Stokes se incluye en las Secciones B.2 y B.3. Los parámetros de Stokes Q , U y V pueden considerarse como las coordenadas cartesianas de un punto P en una esfera de radio I , de modo que 2β y 2φ son las coordenadas esféricas de dicho punto (ver Figura 3.2). Particularmente el estado de polarización circular dextrógira se representa en el polo norte con $\delta = \pi/2$, $Q = U = 0$, y $V = I$. En el hemisferio norte $\beta > 0$ (polarización elíptica dextrógira). En el ecuador $V = 0$ (polarización lineal con $\delta = 0$ o $n\pi$). De manera análoga para el hemisferio y polo sur la polarización elíptica y circular levógira cumplen con $\beta < 0$ y $Q = U = 0$, $V = -I$, $\delta = -\pi/2$ respectivamente.

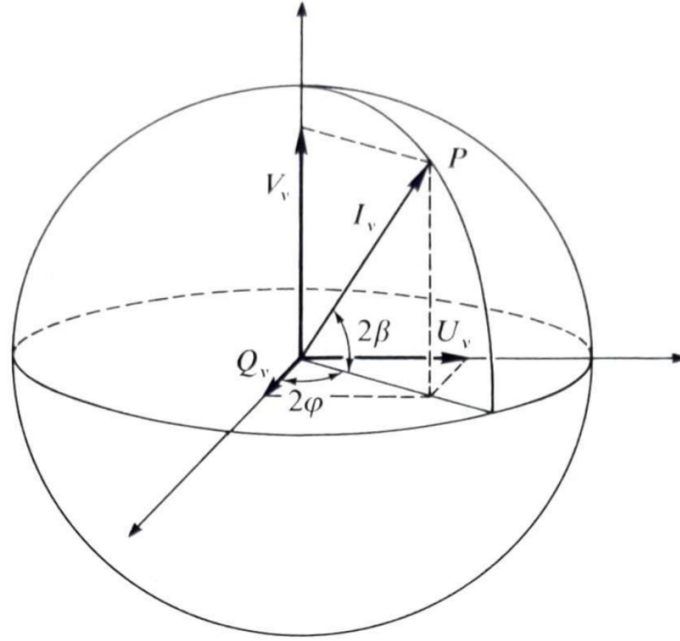


Figura 3.2: Representación de la radiación polarizada elípticamente en la esfera de Poincaré. Imagen tomada de [9]. Una explicación de los valores para polarización lineal, elíptica y circular en los hemisferios norte y sur se detallan en el Apéndice B.2.

Dado que para la luz polarizada arbitrariamente, la desigualdad $I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2$ es siempre válida, se define el grado de polarización (ver Sección B.3)

$$p = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{I}. \tag{3.10}$$

este valor está entre 0 y 1 por lo que también es llamado porcentaje de polarización (0 – 100 %).

3.2. POLICAN

POLICAN, consta de un polarizador lineal y una placa de media onda también llamada retardador. Ha servido en el estudio de distintos objetos astronómicos como nebulosas preplanetarias, nebulosas de reflexión, protoestrellas y objetos HH (ver Figura 3.3).

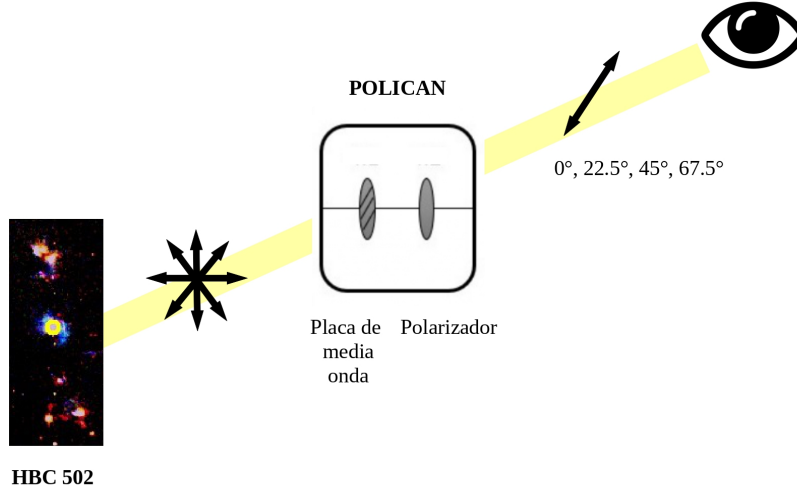


Figura 3.3: Esquema ilustrativo de la luz polarizada proveniente de HBC 502 y su paso por el detector POLICAN.

Este instrumento fue diseñado para medir polarización lineal por combinación de la placa de media onda (HWP, Half Wave Plate) al modular la luz incidente a diferentes ángulos, el diseño de POLICAN requiere un mínimo de cuatro ángulos de modulación para obtener las componentes de polarización necesarias para establecer los parámetros lineales de Stokes, dichos ángulos son: 0° , 22.5° , 45° y 67.5° .

Los cambios en el estado de polarización de la luz incidente se describen mediante el formalismo de las matrices de Mueller (ver Sección B.4). El arreglo algebraico de POLICAN se da mediante transformaciones matriciales del vector de Stokes de entrada (S_{in}) y el vector Stokes de salida (S_{out}), esto es:

$$S_{out} = M_{pol} * M_{HWP} * S_{in} \quad (3.11)$$

en donde M_{pol} es la matriz de Mueller del polarizador lineal orientado a 0° y M_{HWP} es la matriz de Mueller de la placa de media onda con la orientación elegida para el ángulo θ (0° , 22.5° , 45° y 67.5°), que adquieren la forma:

$$M_{pol} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$M_{HWP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2 & 2\sin(2\theta)\cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 2\sin(2\theta)\cos(2\theta) & \cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

CAPÍTULO 3. POLARIZACIÓN Y PARÁMETROS DE STOKES

3.2. POLICAN

sustituyendo estas matrices, y el vector de Stokes de entrada (S_{in}) la Ecuación 3.11 toma la forma:

$$S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2 & 2\sin(2\theta)\cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 2\sin(2\theta)\cos(2\theta) & \cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

realizando la multiplicación indicada entre ellas se tiene:

$$S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{in} - Q_{in}(\cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2) - U_{in}2\sin(2\theta)\cos(2\theta) \\ -I_{in} + Q_{in}(\cos(2\theta)^2 - \sin(2\theta)^2) + U_{in}2\sin(2\theta)\cos(2\theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Ya que la intensidad de salida medida depende del eje rápido θ , de la placa de media onda, se necesitan cuatro ángulos de modulación HWP para estimar los parámetros de Stokes lineales de entrada: Q_{in} y U_{in} . Dado que θ puede tener un número de valores entre 0° y 360° , se eligen valores tales que las funciones seno y coseno en la Ecuación 3.15 puedan cancelarse para permanecer Q_{in} y U_{in} . Esto es:

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ & \Rightarrow \sin(2\theta) = 0, \cos(2\theta) = 1 \\ \theta = 22.5^\circ & \Rightarrow \sin(2\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \cos(2\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \theta = 45^\circ & \Rightarrow \sin(2\theta) = 1, \cos(2\theta) = 0 \\ \theta = 67.5^\circ & \Rightarrow \sin(2\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \cos(2\theta) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

y la Ecuación 3.15, para cada ángulo toma la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ & \Rightarrow S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{in} - Q_{in} \\ -I_{in} + Q_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [\pm I_{in} \mp Q_{in}] = I_{0^\circ} \\ \theta = 22.5^\circ & \Rightarrow S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{in} - U_{in} \\ -I_{in} + U_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [\pm I_{in} \mp U_{in}] = I_{22.5^\circ} \\ \theta = 45^\circ & \Rightarrow S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{in} + Q_{in} \\ -I_{in} - Q_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [\pm I_{in} \pm Q_{in}] = I_{45^\circ} \\ \theta = 67.5^\circ & \Rightarrow S_{out} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{in} + U_{in} \\ -I_{in} - U_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [\pm I_{in} \pm U_{in}] = I_{67.5^\circ} \end{aligned} \quad (3.17)$$

combinando las últimas igualdades de cada caso, se obtienen:

$$\begin{aligned} I_{in} &= \frac{(I_0 + I_{22.5} + I_{45} + I_{67.5})}{2} \\ Q_{in} &= I_0 - I_{45} \\ U_{in} &= I_{22.5} - I_{67.5} \end{aligned} \quad (3.18)$$

CAPÍTULO 3. POLARIZACIÓN Y PARÁMETROS DE STOKES

3.2. POLICAN

De estas ecuaciones, la Ecuación 3.10, considerando el vector normalizado de Stokes $(I, Q, U) = (I_{in}, Q_{in}/I_{in}, U_{in}/I_{in})$ y $V = 0$ (debido a que POLICAN mide polarización lineal), se obtienen el porcentaje de polarización ($P = 100p$) y el ángulo de posición ecuatorial, PA (medido del norte al este), de la siguiente manera:

$$P = 100\sqrt{Q^2 + U^2} \quad (3.19)$$

$$PA = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (3.20)$$

El software de reducción de datos tomados con POLICAN (PStokes14.py) genera imágenes del parámetro I, Q y U de la región observada y también mapas de emisión de los ángulos de polarización y vectores de polarización.

Capítulo 4

Datos polarimétricos de HBC 502

Se llevaron a cabo tres épocas de observación astronómica de manera remota en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) ubicado en Cananea Sonora, las noches del 8 de Marzo y 5 de Abril de 2022, y 24-27 de Enero de 2023. El observatorio cuenta con un polarímetro (POLICAN, Polarímetro de Infrarrojo Cercano de Cananea) y una cámara (CANICA, Cananea Near Infrared Camera) de infrarrojo cercano (NIR, Near-Infrared). CANICA [10] cuenta con un detector de 1024×1024 pixeles y una escala de placa de $.32''/\text{pixel}$, así como un campo de visión (FOV, Field Of View) de aproximadamente 5.5×5.5 minutos de arco cuadrados (ver [11] y la Sección 3.2).

4.1. Observaciones

POLICAN está diseñado para observar fuentes puntuales y extendidas con un FOV medio de $4' \times 4'$, en cuatro ángulos de polarización lineal seleccionados por su placa de media onda: 0° , 22.5° , 45° y 67.5° .

Se utilizaron CANICA y POLICAN para las observaciones de la estrella T Tauri HBC 502, ubicada a una distancia de 397pc, utilizando el filtro H ($1.63 \mu\text{m}$).

Las observaciones fueron hechas por el método ON/OFF que consiste en alternar la posición del telescopio entre objeto de interés (ON) y fuera del objeto (OFF, con frecuencia llamado *cielo*) en cada exposición. Las observaciones de Marzo y Abril de 2022 siguieron un patrón de observación que involucra la región norte, central y sur de HBC 502 con el tiempo de integración de 120 seg en la primera época y 60 seg en la segunda. En este caso se siguió la secuencia de apuntados: objeto, cielo al norte, objeto, cielo al sur, objeto, nuevamente cielo al norte, etc. hasta completar 15 exposiciones (ver Figura 4.1).

Por otro lado, la observación correspondiente a Enero de 2023, se llevó acabo en los días 24 a 27 de manera remota en el OAGH con un tiempo de integración de 180s siguiendo una secuencia de apuntados en patrón de cruz: objeto, cielo al norte, objeto, cielo al sur, objeto, cielo al este, objeto, cielo al oeste, etc. hasta completar 15 exposiciones en cada ángulo. Durante la primera noche de observación se completaron las 15 exposiciones, mientras que en la segunda noche la observación fue interrumpida consiguiendo únicamente 11 exposiciones (ver Figura 4.2).

Estos apuntados son elegidos para obtener una cobertura completa de los objetos extendidos como es el caso de los HHs 24 y 26 ubicados al norte y al sur de HBC 502, respectivamente. Se incluye además la fuente infrarroja SSV 62 [24] ubicada en el extremo sur, en épocas anteriores ya había sido detectada, sin embargo no ha sido reportada con presencia de HH's por lo que se muestra como completéz de los resultados de las observaciones. Las observaciones polarimétricas se obtuvieron permitiendo el paso de la luz incidente también a través de los cuatro ángulos de polarización de POLICAN. El total de imágenes obtenidas en cada época de observación fue de $15 \times 4 = 60$ imágenes, por noche (excepto en la noche del 26 de Enero con $11 \times 4 = 44$) a reducir.

CAPÍTULO 4. DATOS POLARIMÉTRICOS DE HBC 502

4.1. OBSERVACIONES

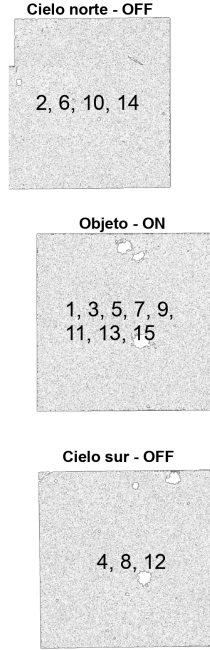


Figura 4.1: Secuencias de observación de Marzo y Abril de 2022. De las 15 imágenes por ángulo de polarización, 4 eran de la parte norte, 8 del objeto central (HBC 502) y únicamente 3 del sur. Los números en este esquema corresponden al orden de apuntados del telescopio.

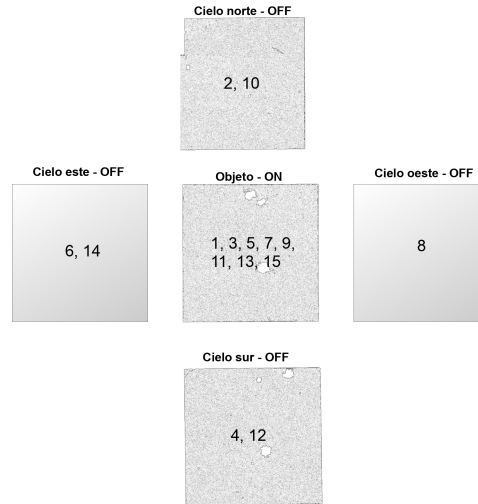


Figura 4.2: Secuencia de observación de Enero de 2023. De las 15 imágenes por ángulo de polarización, 2 fueron de la parte norte, 8 del objeto central y otras 2 correspondían al sur, las que fueron utilizadas para realizar los mosaicos. Los números en este esquema corresponden al orden de apuntados del telescopio. En la segunda noche (26 de Enero) no se completó la secuencia quedando 11 imágenes solamente: 2 imágenes al norte, 6 al centro y 1 al sur.

4.2. Reducción de datos

Las imágenes obtenidas en cada época poseen defectos que pueden corregirse hasta cierto punto. Los defectos suelen ser instrumentales como variaciones en la iluminación y en el voltaje, la linealidad del detector y aberraciones ópticas; o bien, defectos atmosféricos como el clima de la noche de observación, la humedad y cambios en la temperatura dentro del domo.

Para eliminar los defectos que hayan podido interferir en estas observaciones (concretamente las variaciones de iluminación y voltaje) se lleva a cabo un proceso conocido como reducción de datos.

En el caso de la iluminación variable del detector, se corrige con un proceso llamado Flat-fielding que consiste en calcular la diferencia entre una imagen tomada en una pantalla uniformemente iluminada dentro del domo (Flat ON) con otra tomada con la luz apagada (Flat OFF). La imagen resultante se divide entre el número de cosumas (30 cosumas) utilizadas en el tiempo de integración de estos flats, nombrándola **master flat**. Se obtiene un master flat para cada ángulo de polarización mencionado anteriormente.

CANICA es alimentada por un voltaje que puede ser fluctuante provocando errores en las imágenes finales. Este defecto se minimiza enfriando el detector con nitrógeno líquido y tomando una serie de imágenes llamadas Darks con el obturador cerrado y manteniendo el tiempo de integración asignado al objeto, con el fin de caracterizar la corriente oscura. Se toman 10 Darks (por cada tiempo de integración usado durante la noche) para luego promediarlos obteniendo una imagen a la que llamamos **master dark**.

Los datos de ambas épocas (Marzo, Abril 2022) fueron reducidos usando software especializado de IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) y Python. En este proceso fueron necesarios los datos del objeto, los **master flats** y los **master dark** [11]. Primero se utilizó Python para hacer el renombramiento de las imágenes (archivos .fits) ya que éstas vienen seriadas por ángulo y no ordenadas consecutivamente, tal como se requiere al correr las tareas de IRAF. En adelante se describirán los pasos para obtener los mapas de polarización en la región de HBC 502.

4.2.1. Cosuma de imágenes (IRAF)

Una vez teniendo los master flats, master dark y los datos ordenados (agrupados en secuencias de 15 exposiciones para cada ángulo), comenzamos con la reducción en IRAF y DS9 (compatible con la versión de IRAF) utilizando la rutina *polred* que efectúa la corrección de defectos por variaciones instrumentales y la cosuma de las imágenes del objeto. A grosso modo se hizo lo siguiente:

1. Con la tarea *epar polred* y situados en la carpeta que contiene los archivos de datos, dark y flats, editamos cuidadosamente los siguientes parámetros: **root** (nombre raíz de los datos), **rango de imágenes por ángulo** (1 a 15 en este caso), **darkim** (nombre del archivo master dark previamente creado), **flatim** (nombre del archivo master flat previamente creado, y del ángulo acorde al conjunto de datos), **skysubt** (debe estar activado para substrair el cielo de la imagen), **skyframe** (secuencia de observación, ON/OFF en este caso, por lo que corresponderá indicar *stack*), **angle** (debe llenarse con el ángulo que se está reduciendo, *polred* reconoce: 00, 22, 45, 67 ó 00, 22.5, 45, 67.5. NOTA: Se empezó con el ángulo 0 para conservar un orden en la reducción) y **sequence** (debe indicarse el valor *preview* como primer paso para obtener el archivo de secuencia .seq utilizado para desplegar imágenes de la resta de los datos). Se guardan los cambios correspondientes.
2. Se ejecuta *polred* y con el despliegue en DS9 seleccionaremos la misma estrella (de referencia) visible en todas las imágenes de objeto (ON), y un pixel en la esquina superior izquierda en las imágenes restantes (OFF), hasta concluir con las 15 exposiciones. Se debe cuidar que la identificación de la estrella de referencia sea consistente en cada imagen ON desplegada.
3. Con la tarea *polref* se calculó el offset entre cada imagen ON, respecto de la primera de ellas (considerada de referencia) en pixeles. Estos valores son guardados en un archivo .ref

los cuales son necesarios para alinear y combinar todas las imágenes en una segunda corrida de la tarea *polred*.

4. Nuevamente en *polred*, se editan los parámetros **sequence** (archivo *.seq*) y **ref image** (archivo con coordenadas de referencia de esta reducción *.ref*). Corriendo esta tarea, se despliega una imagen que muestra el cielo para ser extraído de las 15 observaciones y finalmente el programa preguntará imagen por imagen si deseamos incluirla en la cosuma final o si se desea descartar.

Estos 4 pasos se repitieron para cada conjunto de datos de cada ángulo y las imágenes reducidas pueden identificarse por la terminación **1b.fits**, y que se utilizarán para realizar los mapas polarimétricos (sección 4.2.3).

Debido a que la secuencia de observación incluye tres regiones (norte, objeto y sur) se realizó el procedimiento de reducción en cada región, cuidando una buena selección de la estrella de referencia en cada campo. En los casos en que el número de imágenes a cosumar era dos, la tarea se hacia manualmente con la siguiente linea de código:

```
imcombine rgHBC502H0100*fs.fits HBC502s00.fits combine=.average"$
scale="none"zero="medianreject="none"nlow=1 nhigh=1 logfile=logfil
```

así como ajustar el tamaño y orientación de las imágenes cosumadas con:

```
imcopy HBC502s00.fits[887:136,136:887] zzz00.fits
```

finalmente, todas estas regiones se ubicaron astrométricamente para recreación completa de la región observada.

4.2.2. Astrometría de imágenes (IRAF)

El objeto observado es una estrella T Tauri con dos estrellas generadoras de objetos HH en los extremos de sus flujos. La razón por la cuál la observación fue hecha en secuencia ON/OFF, es para tener un campo completo del objeto. Para ello la reducción descrita en la sección anterior, se realizó para las tres regiones que siguió la secuencia de observación del telescopio en cada observación, esto es, la región al norte, HBC 502 y la región al sur de la misma (ver Figura 4.1 y Figura 4.2).

La astrometría es una herramienta indispensable en la recreación de una región mapeada con varios apuntados, esto es tener la correlación de cada pixel con las coordenadas en el cielo, en este caso ascensión recta (α) y declinación (δ). Se realizó la astrometría de cada imagen reducida **1b.fits** comparando con el catálogo de 2MASS en banda H, esto consistió en:

1. Se compararon las cuatro imágenes reducidas de cada ángulo y se seleccionó la que tuviera mejor resolución de objetos puntuales, eligiendo un mínimo de cuatro estrellas de referencia tomando sus coordenadas en términos de pixeles, esto es, las coordenadas de la imagen hasta este momento.
2. En una imagen de 2MASS, banda H, del mismo campo se tomaron las coordenadas FK5 de las mismas estrellas antes elegidas. Se tuvo cuidado de que los objetos de referencia tuvieran contraparte en 2MASS, de lo contrario la astrometría sería imposible.
3. Con ayuda de un editor de texto creamos columnas en un archivo *.dat* que incluyeran las coordenadas en pixeles y FK5 de las estrellas en el orden siguiente: Coordenadas Imagen **x**, **y**, coordenadas FK5 α (sexagesimal), δ (grados). Este archivo fue guardado en la carpeta de datos de la región (norte, centro o sur) en la que estamos trabajando.
4. Situados en IRAF y la carpeta de trabajo hicimos uso de la tarea *ccmap*, con datos de entrada del archivo *.dat* y obteniendo un archivo *.db* que contiene el valor de la escala de placa de media onda (0.321 arcseg/pixel).

5. Al correr la tarea se desplegó una gráfica en la cuál debimos encontrar el valor más cercano a la escala de la placa de media onda, este se consiguió eliminando las estrellas más lejanas al ajuste.
6. Una vez conseguido el valor más cercano a 0.321 arcseg/pixel, se procede a editar el header de la imagen con la tarea **ccsetwcs**. Los parámetros que se editan son: **images** y **solution** (nombre de la imagen), **database** (archivo *.db*), **projection** (tan), **update** (yes).
7. Se cambiaron los headers de los tres ángulos restantes con la tarea **mkcwcs**, utilizando la información conseguida en los pasos anteriores para el ángulo 0°.

4.2.3. Mosaicos de la región (Montage.py)

Creación de mosaicos por ángulo de observación (0°, 22.5°, 45°, 67.5°) (descripción de como se realizó, imágenes en resultados)

Hacer un mosaico resultó favorable debido a que nuestro objeto estelar es más grande que el campo de visión del telescopio utilizado. Para ello se hizo uso de **Montage.py**, una librería que proporciona una forma de ejecutar el mosaico de varias imágenes astronómicas de Montage desde Python. Montage es un conjunto de herramientas para ensamblar imágenes del Sistema de transporte de imágenes flexible (FITS) en mosaicos personalizados.

Se tomó el código tutorial de la página <http://montage.ipac.caltech.edu/MontageNotebooks/Mosaic.html> y se tomó en cuenta lo siguiente:

- El código trabaja con imágenes descargadas en internet de 2MASS en distintas bandas (K, H y J), basta con poner las coordenadas del objeto o el nombre en sí y un tamaño aproximado de este para que el programa se ejecute. Para este caso no era necesario, únicamente se especificó la carpeta de trabajo.
- La creación de carpetas viene preescrita en el programa, la información descargada de 2MASS se guarda en la carpeta **RAW**. Dado que no fue el caso, se colocaron las imágenes de la región norte, central y sur del ángulo en cuestión. Se hizo un mosaico por cada ángulo de polarización (0°, 22.5°, 45°, 67.5°) por lo que el programa se corrió 4 veces, en cada una respetando su carpeta de trabajo.
- Este programa crea un header automáticamente para el mosaico resultante con la información tomada de la red. Ya que no fue útil para nosotros, se realizó de forma manual editando el archivo **region.hdr** de la siguiente forma:

CAPÍTULO 4. DATOS POLARIMÉTRICOS DE HBC 502

4.2. REDUCCIÓN DE DATOS

<i>SIMPLE</i>	= <i>T</i>	<i>ajuste estándar</i>
<i>BITPIX</i>	= <i>-32</i>	<i>bits por pixel</i>
<i>NAXIS</i>	= <i>2</i>	<i>número de ejes</i>
<i>NAXIS1</i>	= <i>1400</i>	<i>longitud del eje</i>
<i>NAXIS2</i>	= <i>3000</i>	<i>longitud del eje</i>
<i>CTYPE1</i>	= <i>'RA—TAN'</i>	<i>tipo de coordenada</i>
<i>CTYPE2</i>	= <i>'DEC—TAN'</i>	<i>tipo de coordenada</i>
<i>CRVAL1</i>	= <i>86.5382198</i>	
<i>CRVAL2</i>	= <i>-0.1787629</i>	
<i>CRPIX1</i>	= <i>700</i>	<i>referencia de pixel del eje</i>
<i>CRPIX2</i>	= <i>1500</i>	<i>referencia de pixel del eje</i>
<i>CDEL1</i>	= <i>-8.9747220000000 × 10⁻⁵</i>	
<i>CDEL2</i>	= <i>8.9747220000000E × 10⁻⁵</i>	
<i>CROTA2</i>	= <i>0.000000</i>	
<i>EQUINOX</i>	= <i>2000.0</i>	
<i>END</i>		

Finalmente se obtuvieron 8 mosaicos, esto es, un mosaico por ángulo para cada conjunto de datos de observación mostrados a continuación.

Mosaicos de la primera temporada de observación: Se muestran los 4 mosaicos de la temporada del 8 de Marzo del 2022 de la región HBC 502 con 120 seg de integración. Cada mosaico tiene un tamaño de 14 arcmin de extremo a extremo en forma vertical, y cada imagen corresponde a un ángulo de polarización de POLICAN, ver Figura 4.3. Comparando los cuatro mosaicos se observa que en la región correspondiente a HH 24 existe emisión extendida que crece conforme aumenta el ángulo de polarización. En la región de HBC 502 se observa una morfología de brazos espirales en su disco de acreción, este patrón también es observado en el óptico mediante imágenes de SIMBAD. En la región de HH 26IRS no se aprecian cambios suficientes.

Mosaicos de la segunda temporada de observación: En la Figura 4.4 se muestran los 4 mosaicos (cada uno corresponde a un ángulo de polarización de POLICAN) de la región HH 24-26, con 60 seg de integración y 14 arcmin de longitud vertical.

Mosaicos de la tercera temporada de observación: Los 4 mosaicos de cada ángulo de polarización de POLICAN en la región HH 24-26, con 180 seg de integración y 10 arcmin de longitud vertical se muestran en la Figura 4.5. En este mosaico no se incluyó la parte norte debido a que no se pudo realizar la astrometría por contaminación de fuentes saturadas de una observación anterior.

En cualquier temporada, el ángulo en que se observan más fuentes de emisión es el de 22.5°. Sin embargo, el mosaico de 120seg de exposición muestra mejor resolución en la parte norte. Posteriormente se obtuvo la polarimetría de los mosaicos y las regiones individuales cuyos resultados se presentan en el siguiente capítulo.

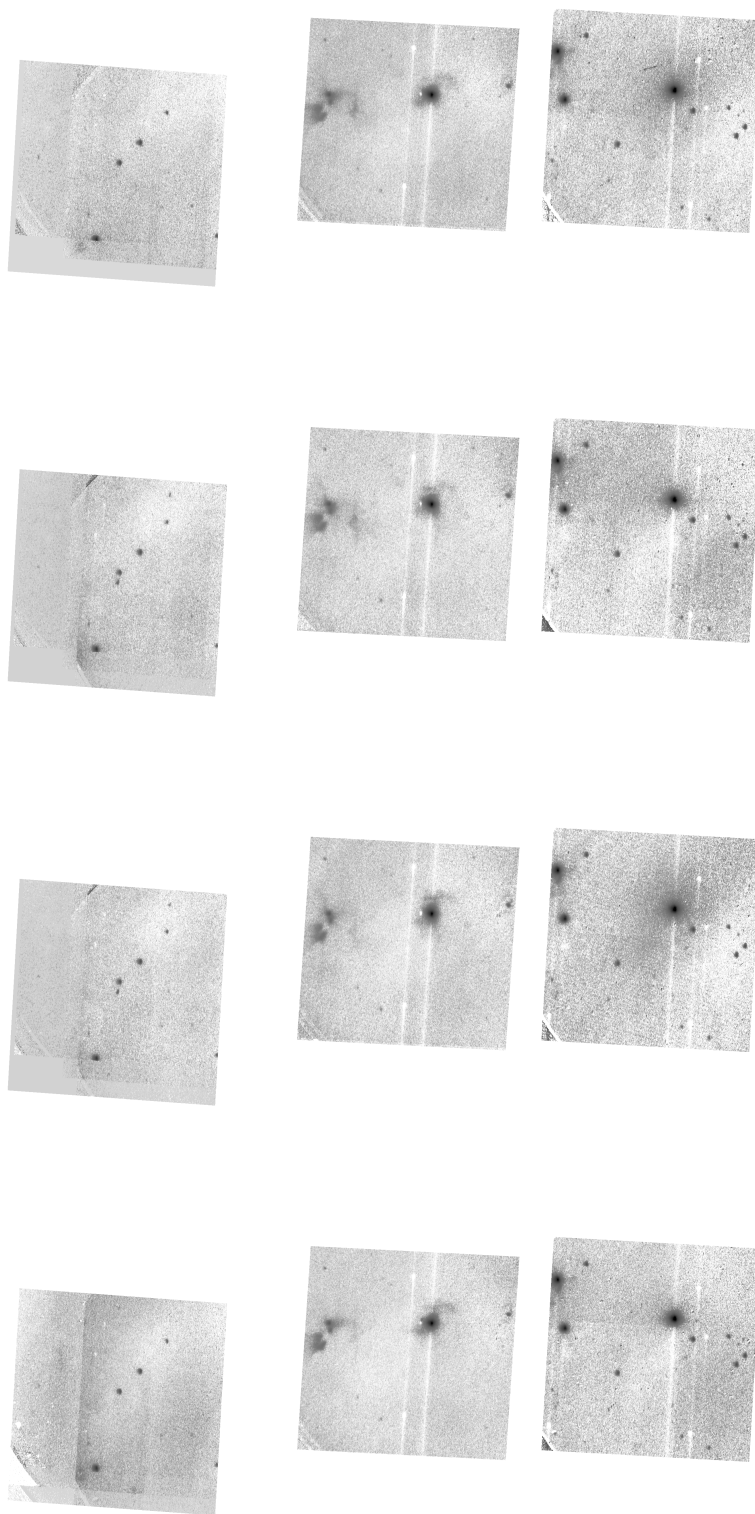


Figura 4.3: 4 mosaicos verticales de luz polarizada en el filtro H de la región HH 24-26 en los ángulos 0° , 22.5° , 45° y 67.5° , de la primera época, con un tiempo de integración de 120seg. El norte es hacia arriba y el este a la izquierda.

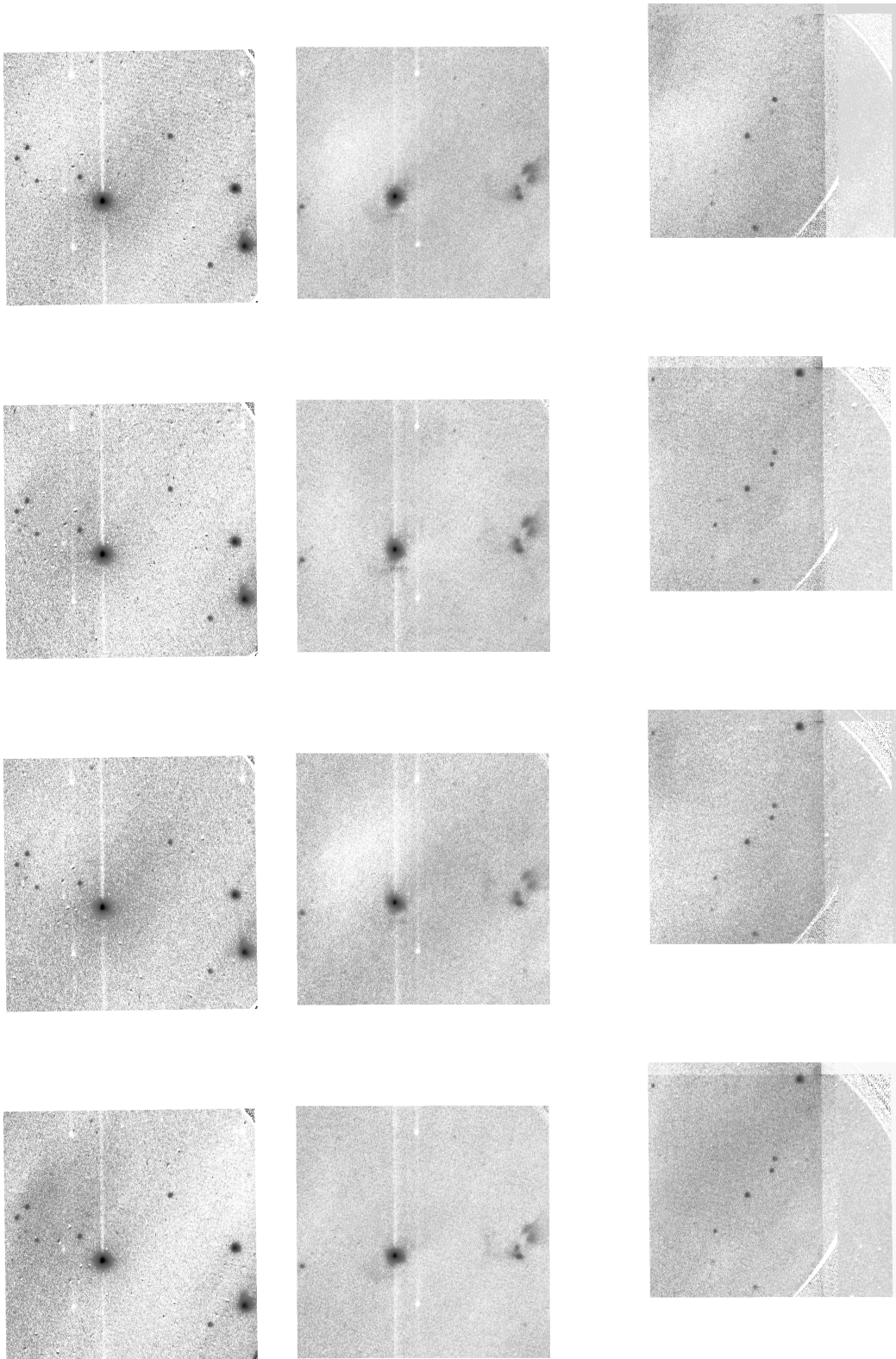


Figura 4.4: Idem Figura 4.3 para la segunda época de observación, con un tiempo de integración de 60seg.

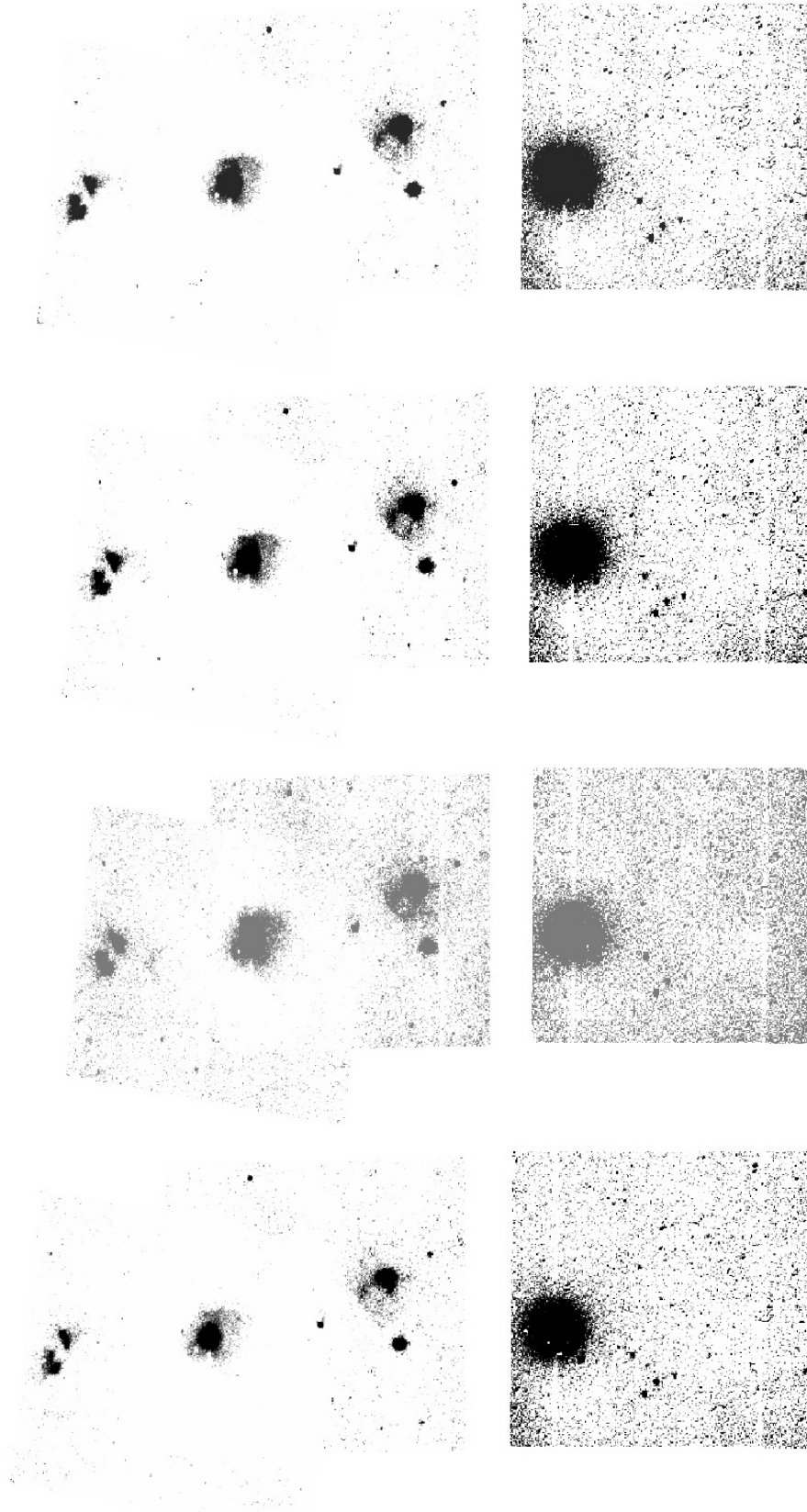


Figura 4.5: Idem Figura 4.3 para la segunda época de observación, con un tiempo de integración de 180seg. La observación se realizó las noches del 24 y 26 de Enero, la imagen de la primera noche corresponde al recuadro inclinado al norte mientras que las imágenes de la segunda noche corresponden a los recuadros verticales del centro y al sur.

Capítulo 5

Resultados polarimétricos (PStokes.py)

La polarimetría es el estudio de la luz polarizada. Su aplicación en la Astronomía es extenso, abarca el análisis de la luz de objetos distantes como exoplanetas, supernovas, nebulosas, etc., así como las propiedades de dispersión de cuerpos que reflejan luz polarizada, la indagación de la forma e intensidad de los campos magnéticos de objetos estelares y la orientación de partículas de polvo presentes en discos protoplanetarios observados en distintas morfologías en los patrones de polarización.

Utilizando el programa **PStokes14.py** se realizó la polarimetría de los datos reducidos (Capítulo 4, como datos de entrada). El programa dió como datos de salida gráficas en color de los parámetros de Stokes I, Q y U, así como del ángulo de polarización y del grado de polarización, este último indicado por vectores de color rojo superpuestos sobre una imagen de la intensidad de la emisión en el filtro H ($1.63 \mu\text{m}$). Las escalas de las gráficas varían para cada región y para cada época.

Recordemos que mediante el uso de polarimetría de luz estelar de fondo en el infrarrojo cercano se puede tener información de la orientación del campo magnético de objetos estelares. Cabe destacar que en las imágenes polarimétricas mostradas en este y el capítulo anterior, cada punto de la imagen es representado por un vector de polarización que indica la dirección y porcentaje de polarización en ese punto. Los vectores más largos representan una mayor cantidad de polarización, mientras que los vectores más cortos representan una menor cantidad de polarización.

También expusimos que los parámetros de Stokes (I, Q, y U) describen la polarización de la luz en una imagen y:

- I (intensidad): representa la cantidad total de luz en una imagen y no tiene en cuenta la polarización.
- Q y U: Representan la polarización lineal horizontal y vertical respectivamente, y miden la cantidad de polarización en una dirección específica.
- V: Representa la polarización circular, es decir, la polarización que rota en sentido horario o antihorario. En el caso de POLICAN este parámetro se anula por tratar solamente con polarización lineal.

Primeramente se procesó de manera individual cada una de las regiones, esto es, la parte norte, centro y sur de la región HBC 502 y posteriormente se procesó la región completa obtenida en los mosaicos, es decir, usando una misma escala de polarización.

5.1. Polarimetría de las regiones norte, centro y sur de HBC 502

Polarimetría de la primera época, Marzo 2022.

Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran los mapas en color de los parámetros de Stokes I, Q y U, así como los mapas de polarización que serán analizados con detalle en el Capítulo 6.

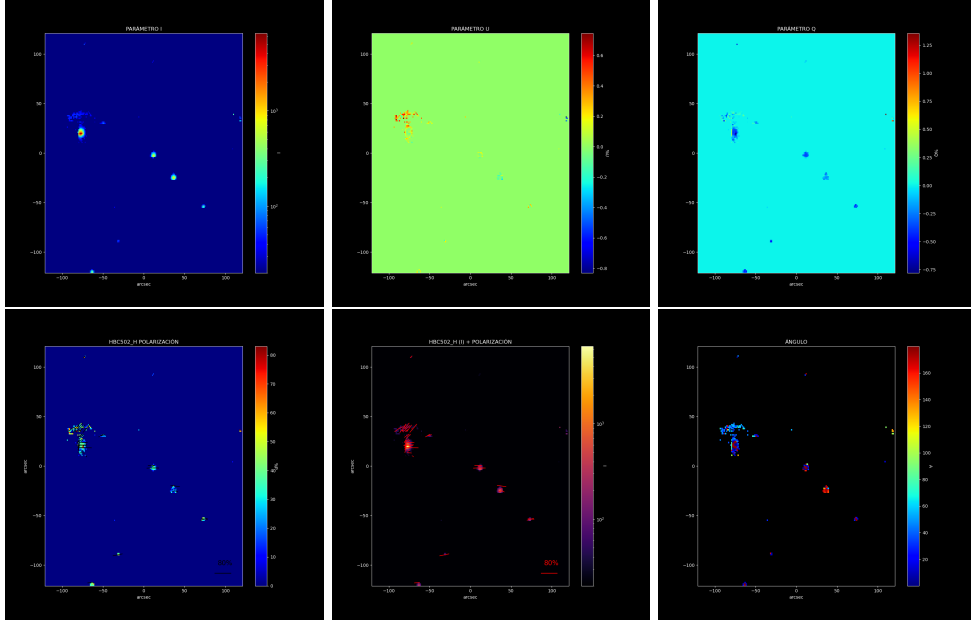


Figura 5.1: Imágenes de los parámetros I, U y Q de Stokes de la región norte a la estrella T Tauri HBC 502, en los tres recuadros superiores, respectivamente. En los recuadros inferiores, se muestran mapas de vectores de polarización sobre un fondo de porcentaje de polarización y el parámetro I de Stokes (izquierda y centro), respectivamente, mientras que el tercer mapa muestra el ángulo de polarización.

Polarimetría de la segunda época, Abril 2022.

Las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 muestran los mapas en color de los parámetros de Stokes I, Q y U, así como los mapas de polarización que serán analizados a detalle en el Capítulo 6.

Polarimetría de la tercera época, Enero 2023.

Las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 muestran los mapas en color de los parámetros de Stokes I, Q y U, así como los mapas de polarización de cada región: norte, centro, sur y sur más distante de HBC 502.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.1. POLARIMETRÍA DE LAS REGIONES NORTE, CENTRO Y SUR DE HBC 502

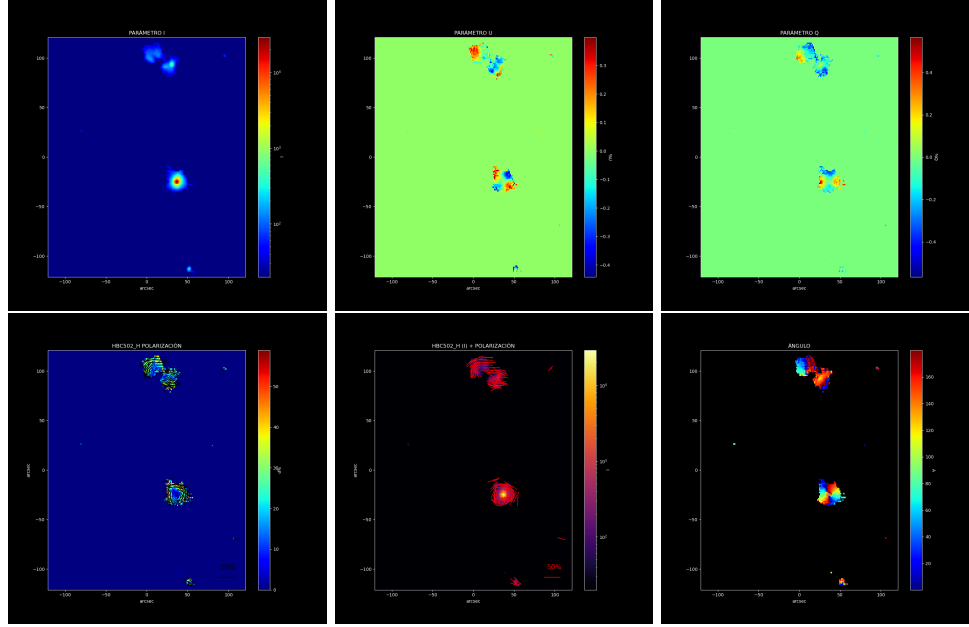


Figura 5.2: Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502.

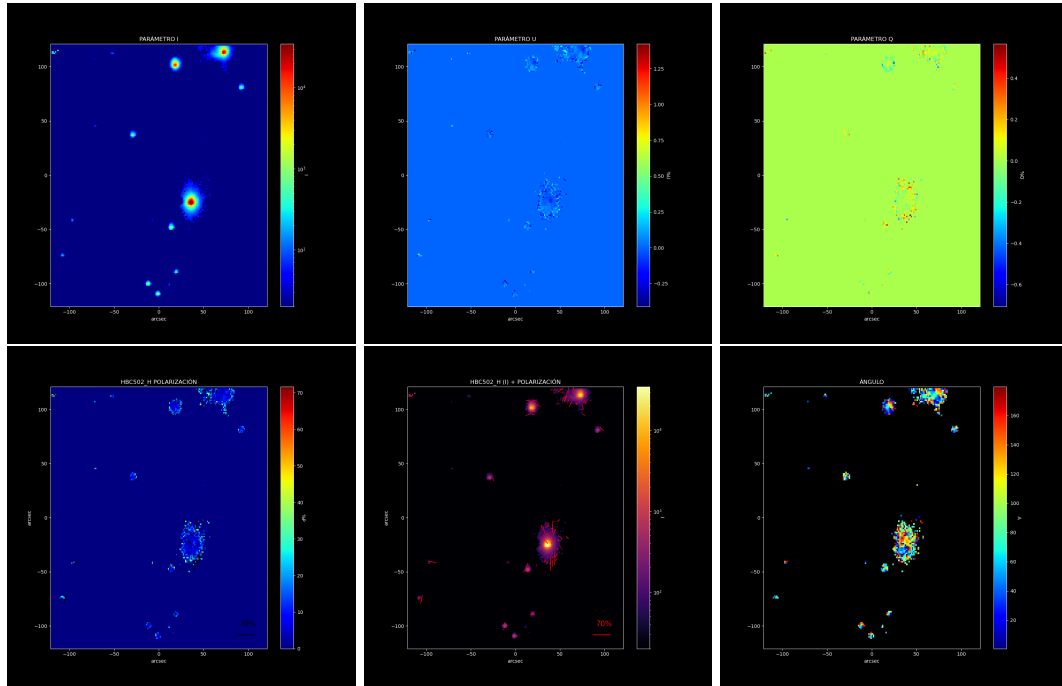


Figura 5.3: Idem Figura 5.1 para la región al sur de HBC 502.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.1. POLARIMETRÍA DE LAS REGIONES NORTE, CENTRO Y SUR DE HBC 502

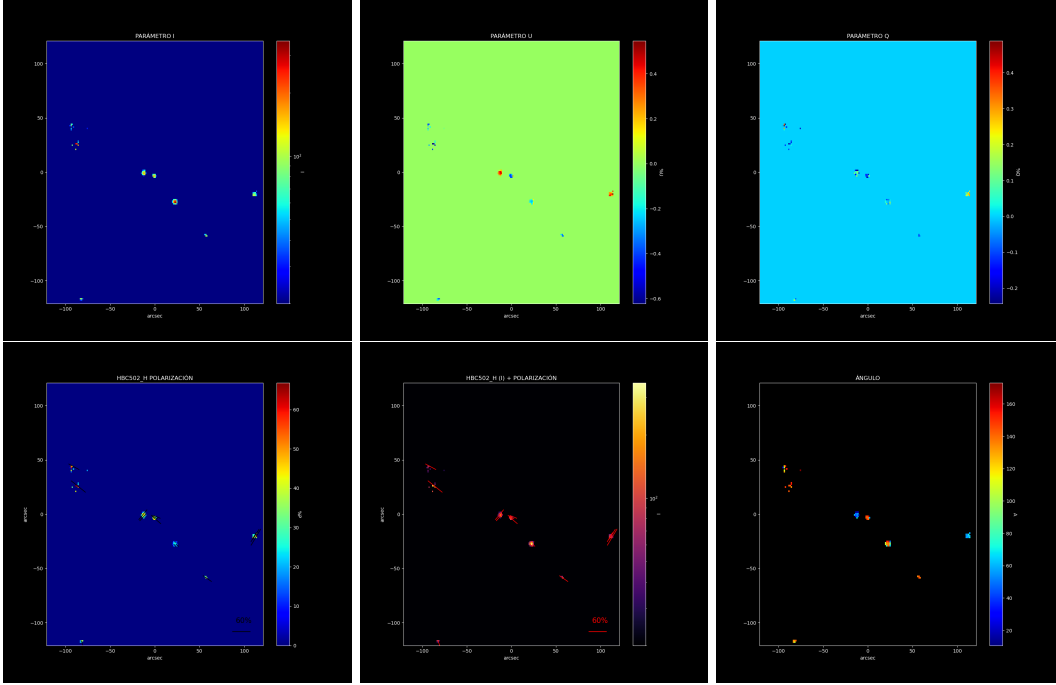


Figura 5.4: Idem Figura 5.1 para la región norte de HBC 502, de la segunda época.

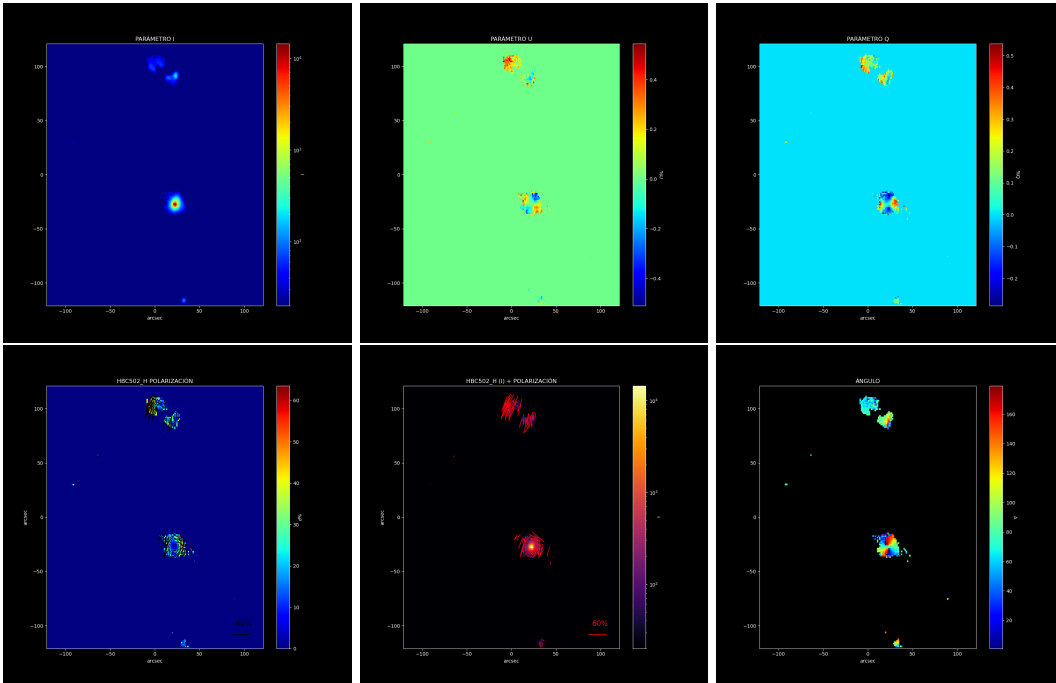


Figura 5.5: Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502, de la segunda época.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.1. POLARIMETRÍA DE LAS REGIONES NORTE, CENTRO Y SUR DE HBC 502

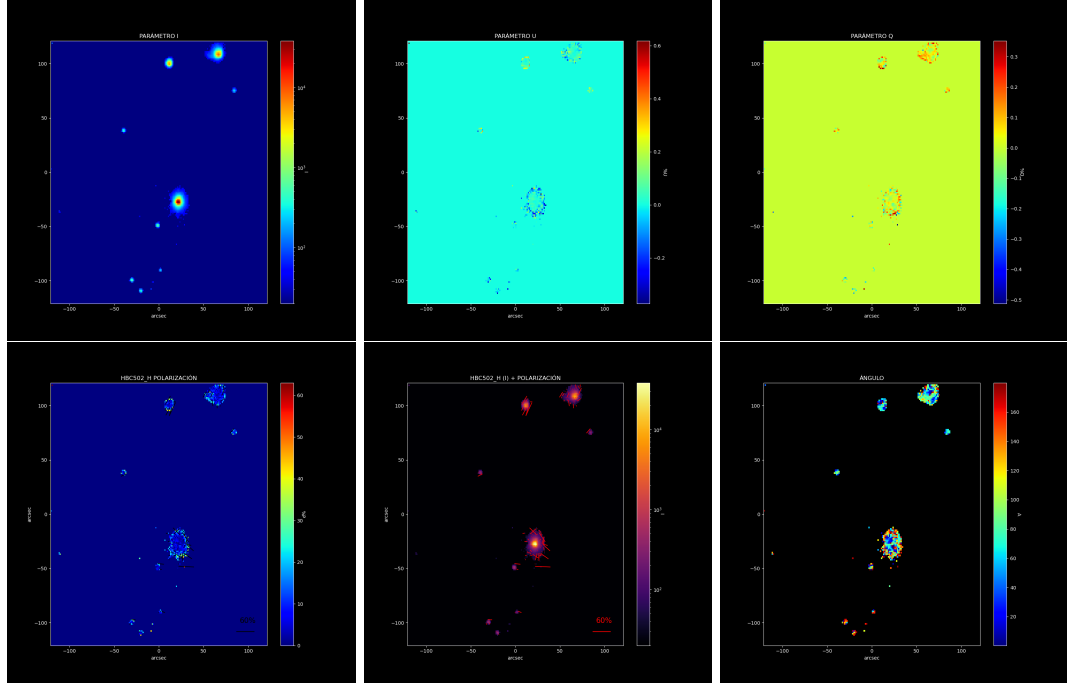


Figura 5.6: Idem Figura 5.1 para la región sur a HBC 502, de la segunda época.

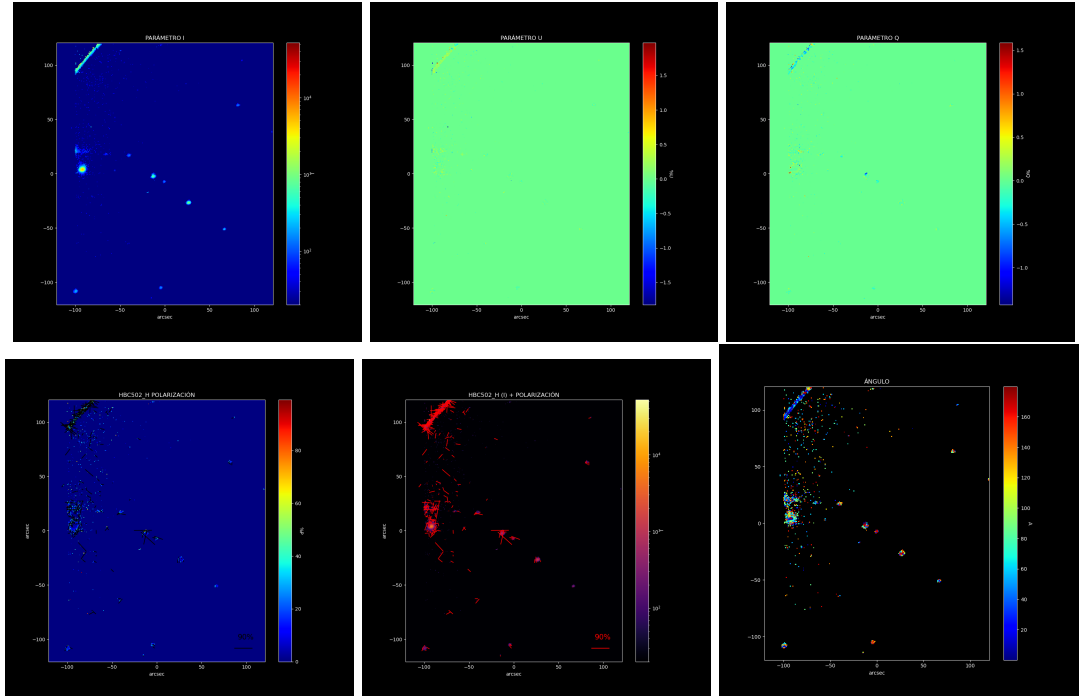


Figura 5.7: Idem Figura 5.1 para la región norte a HBC 502, de la tercera época.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.1. POLARIMETRÍA DE LAS REGIONES NORTE, CENTRO Y SUR DE HBC 502

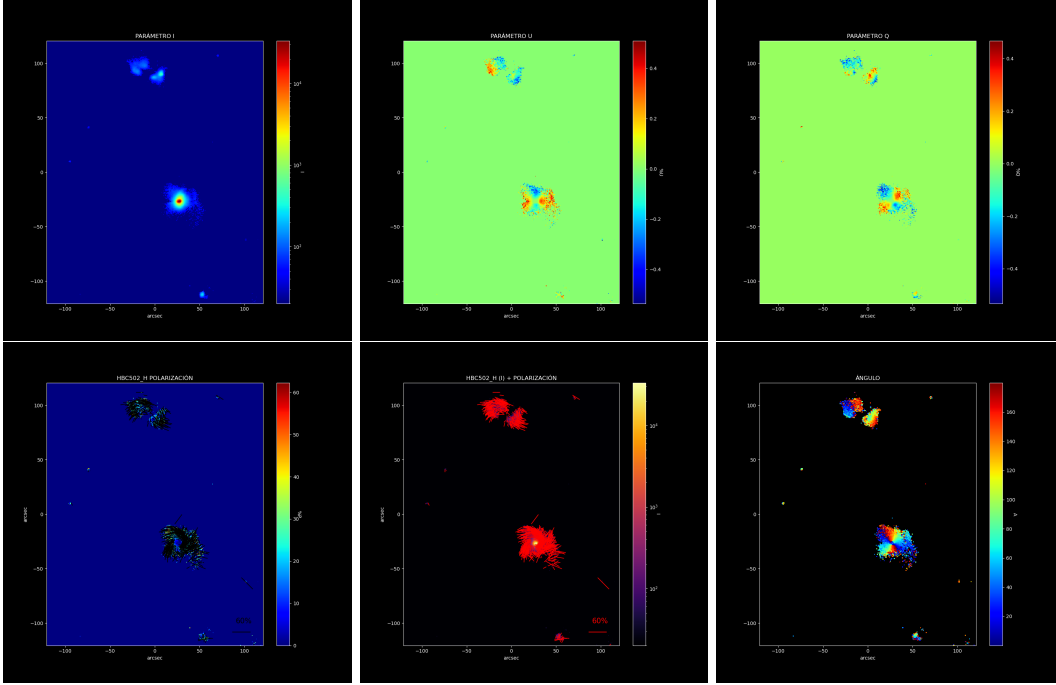


Figura 5.8: Idem Figura 5.1 para la región central que contiene a HBC 502, de la tercera época.

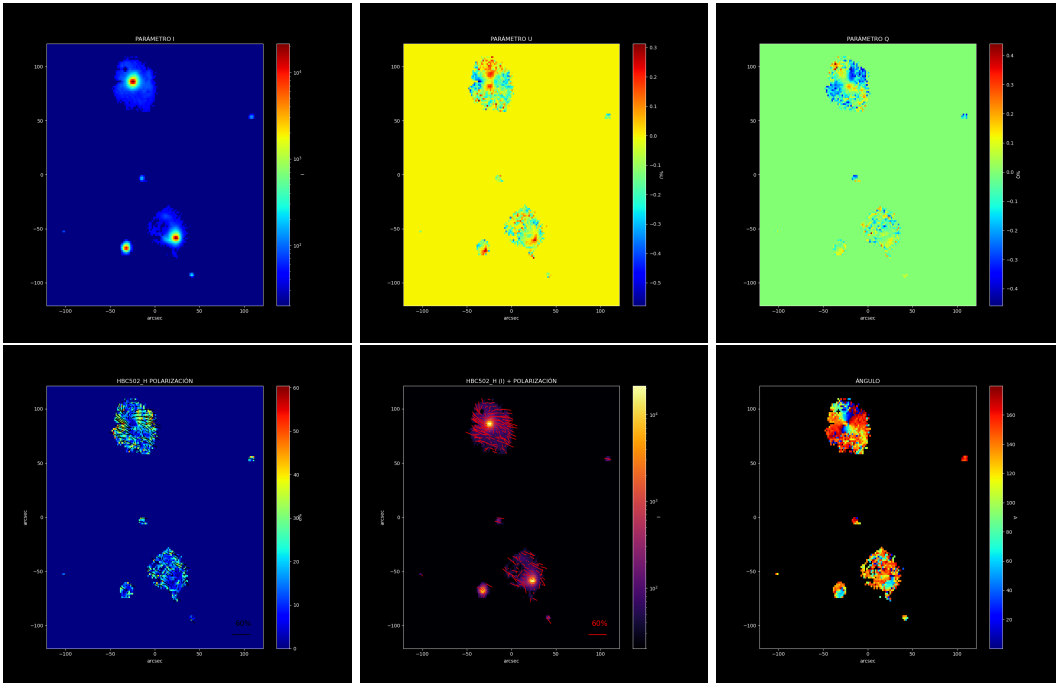


Figura 5.9: Idem Figura 5.1 para la región sur a HBC 502, de la tercera época.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.2. MOSAICOS DE LAS TRES ÉPOCAS DE OBSERVACIÓN

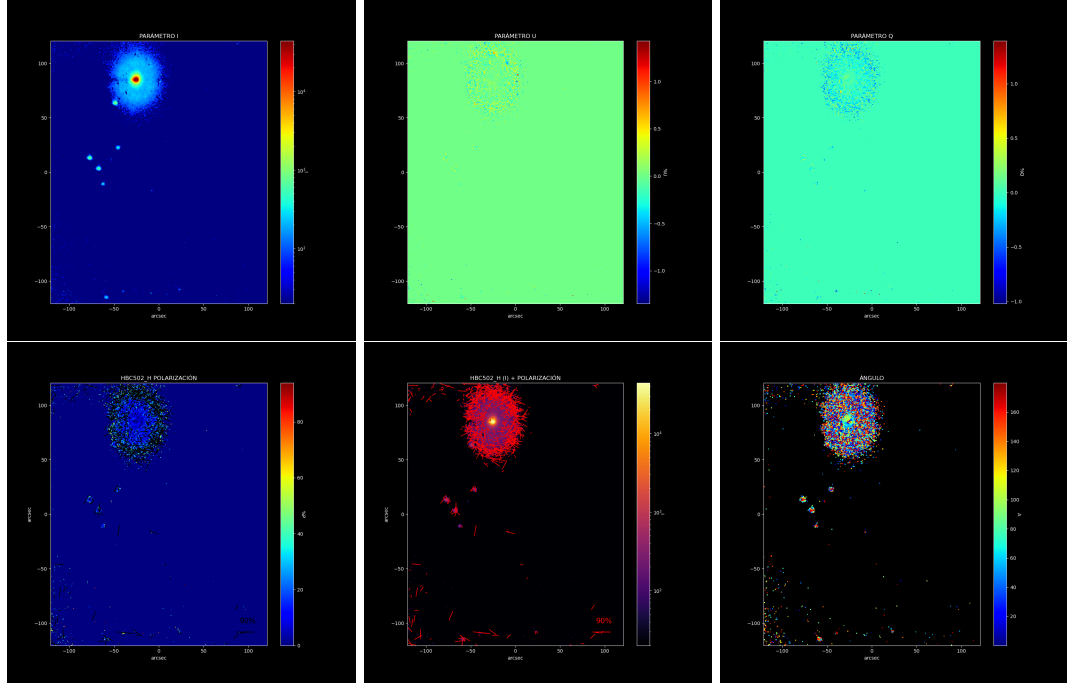


Figura 5.10: Idem Figura 5.1 para la región sur más distante de HBC 502, de la tercera época.

5.2. Mosaicos de las tres épocas de observación

Los elementos más sobresalientes de la región HH 24-26 se muestran en la Figura 5.11 tomada de SIMBAD en longitudes de onda del infrarrojo cercano.

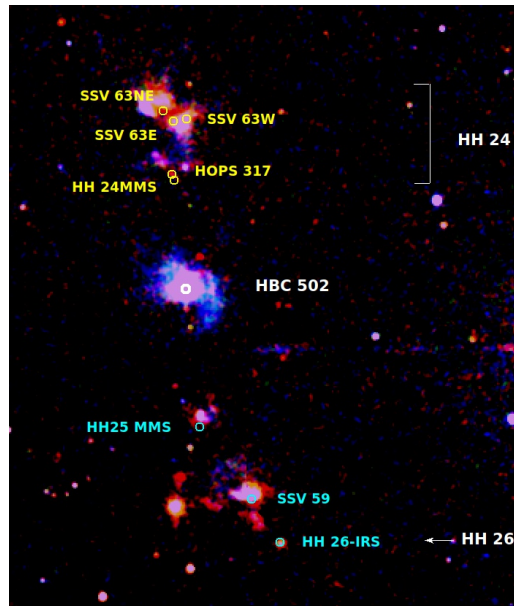


Figura 5.11: Imagen RGB de 2MASS en las bandas K,H y J, respectivamente de la región HH 24-26

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.2. MOSAICOS DE LAS TRES ÉPOCAS DE OBSERVACIÓN

De nuestras observaciones, los mosaicos realizados tienen una dimensión aproximada de $13.91' \times 4.67'$, lo que corresponde a la región del complejo HH 24-26. De esta manera los mosaicos formados se presentan en las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14.

La Figura 5.12 corresponde a los vectores de polarización sobre el filtro H de las primeras dos épocas de observación, sin embargo estos mosaicos no muestran claramente el comportamiento de los vectores de polarización (debido a las dimensiones de la imagen y el tratamiento del programa **PStokes14.py**) en la región de interés, por lo tanto en la discusión se considerarán las imágenes individuales para el análisis de la región.

La Figura 5.13 corresponde al grado de polarización e indica los vectores de polarización (en rojo) sobre el fondo del parámetro I de Stokes de las primeras dos épocas de observación. En el análisis de los mapas polarimétricos de esta región se utilizarán las imágenes individuales debido a que muestran mayor resolución que los mosaicos.

La Figura 5.14 corresponde a una imagen RGB de tres de los cuatro ángulos de polarización obtenidos con POLICAN (67.5° , 22.5° y 00°) y señalando los elementos más sobresalientes de la región HH 24-26. La imagen de 120 seg de integración es la que muestra mejor las diferencias de emisión en estos tres ángulos.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.2. MOSAICOS DE LAS TRES ÉPOCAS DE OBSERVACIÓN

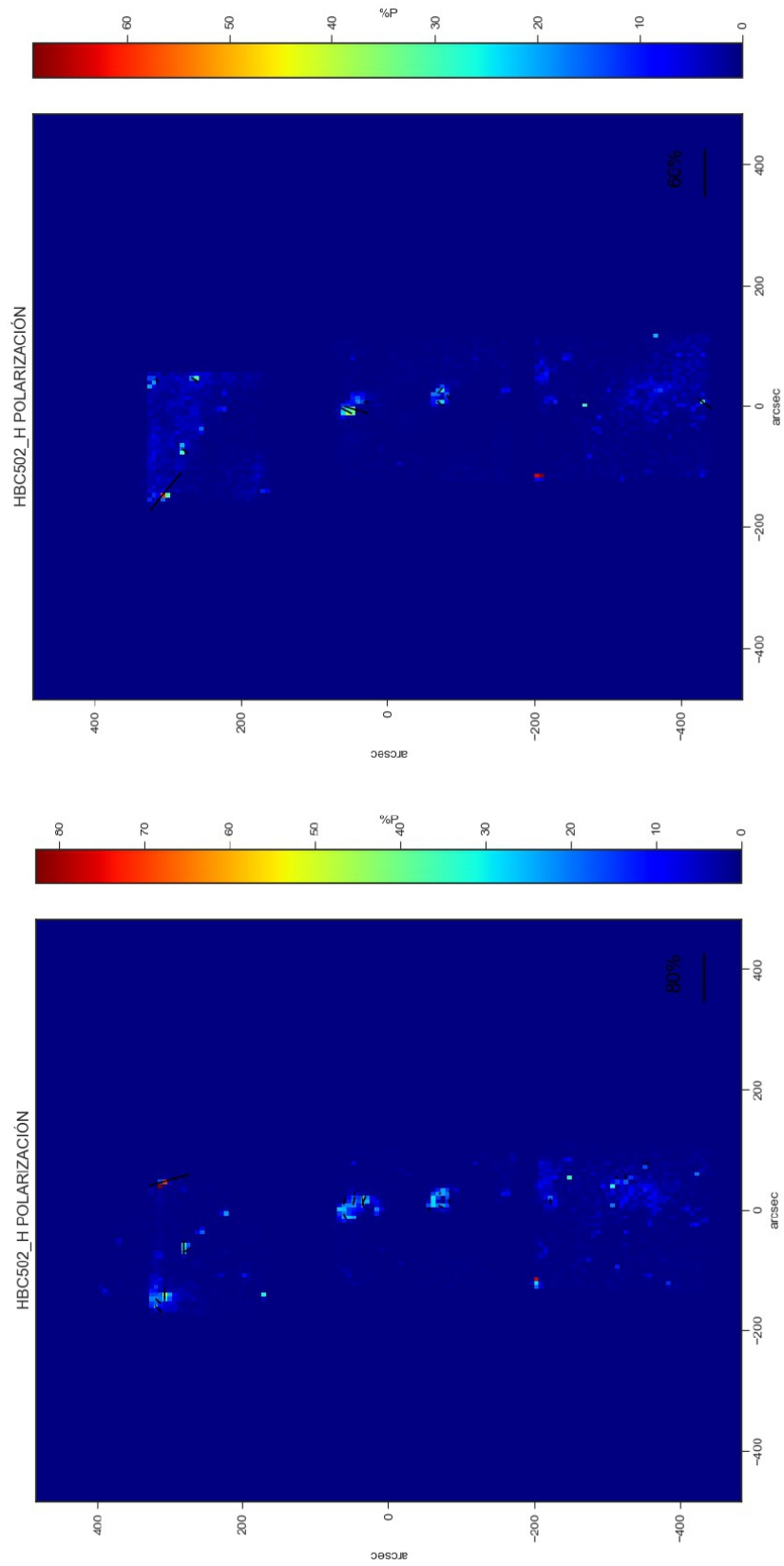


Figura 5.12: Mapas de polarización en el filtro H de CANICA de la región HH 24-26 (HH 24 al norte, HBC 502 en la emisión central y HH 26 al sur). La imagen a la izquierda muestra la polarimetría de la temporada de observación llevada acabo el 8/03/22 y la imagen de la derecha la temporada del 5/04/22.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)

5.2. MOSAICOS DE LAS TRES ÉPOCAS DE OBSERVACIÓN

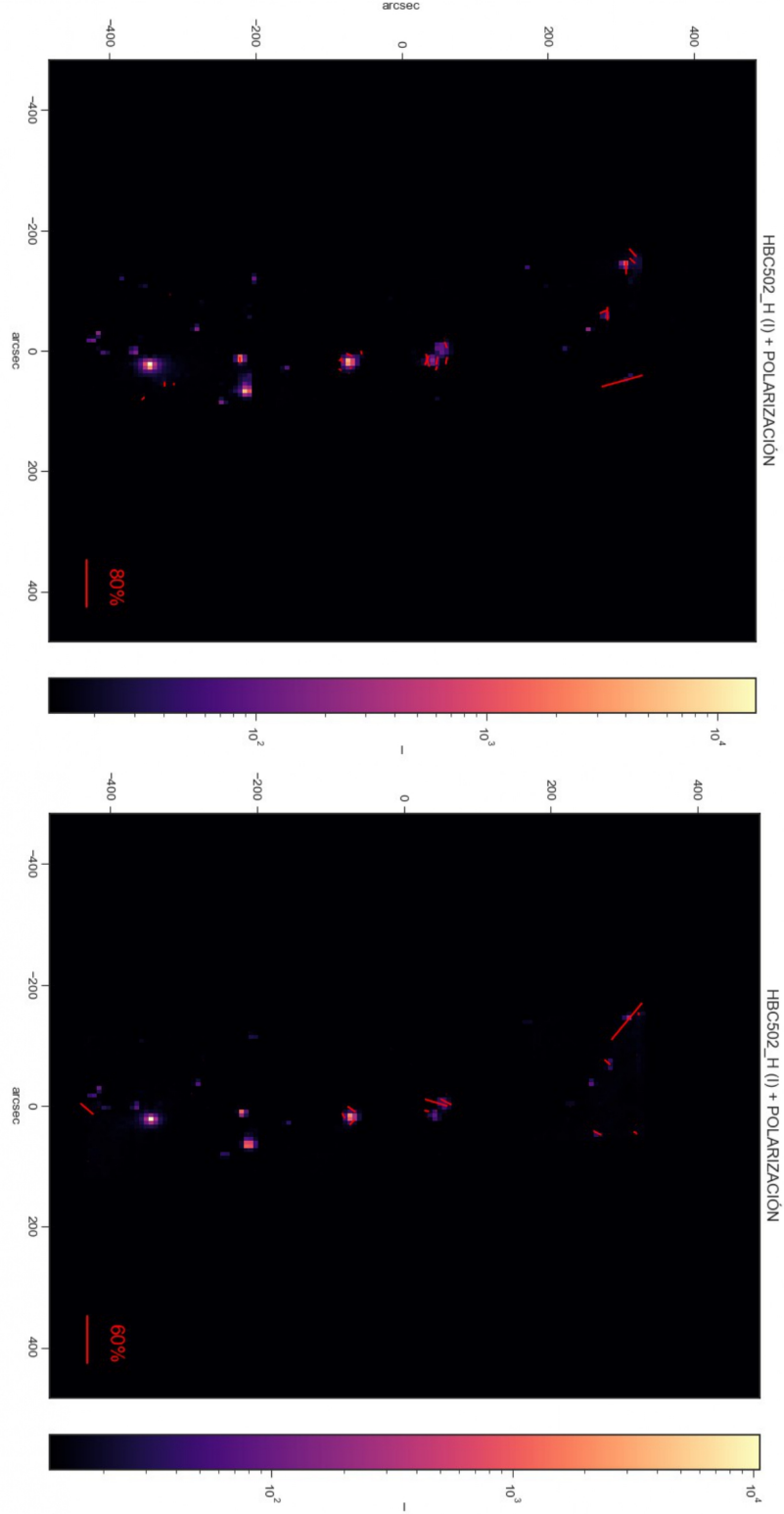


Figura 5.13: Mapas de intensidad, I, en el filtro H de CANICA, mostrando vectores de polarización (trazos rojos) asociados a HBC 502, y las regiones HH 24 y HH 26, al norte y sur respectivamente. La imagen a la izquierda muestra la polarimetría de la temporada de observación llevada acabo el 8/03/22 y la imagen de la derecha la temporada del 5/04/22

CAPÍTULO 5. RESULTADOS POLARIMÉTRICOS (PSTOKES.PY)
5.2. MOSAICOS DE LAS TRES ÉPOCAS DE OBSERVACIÓN

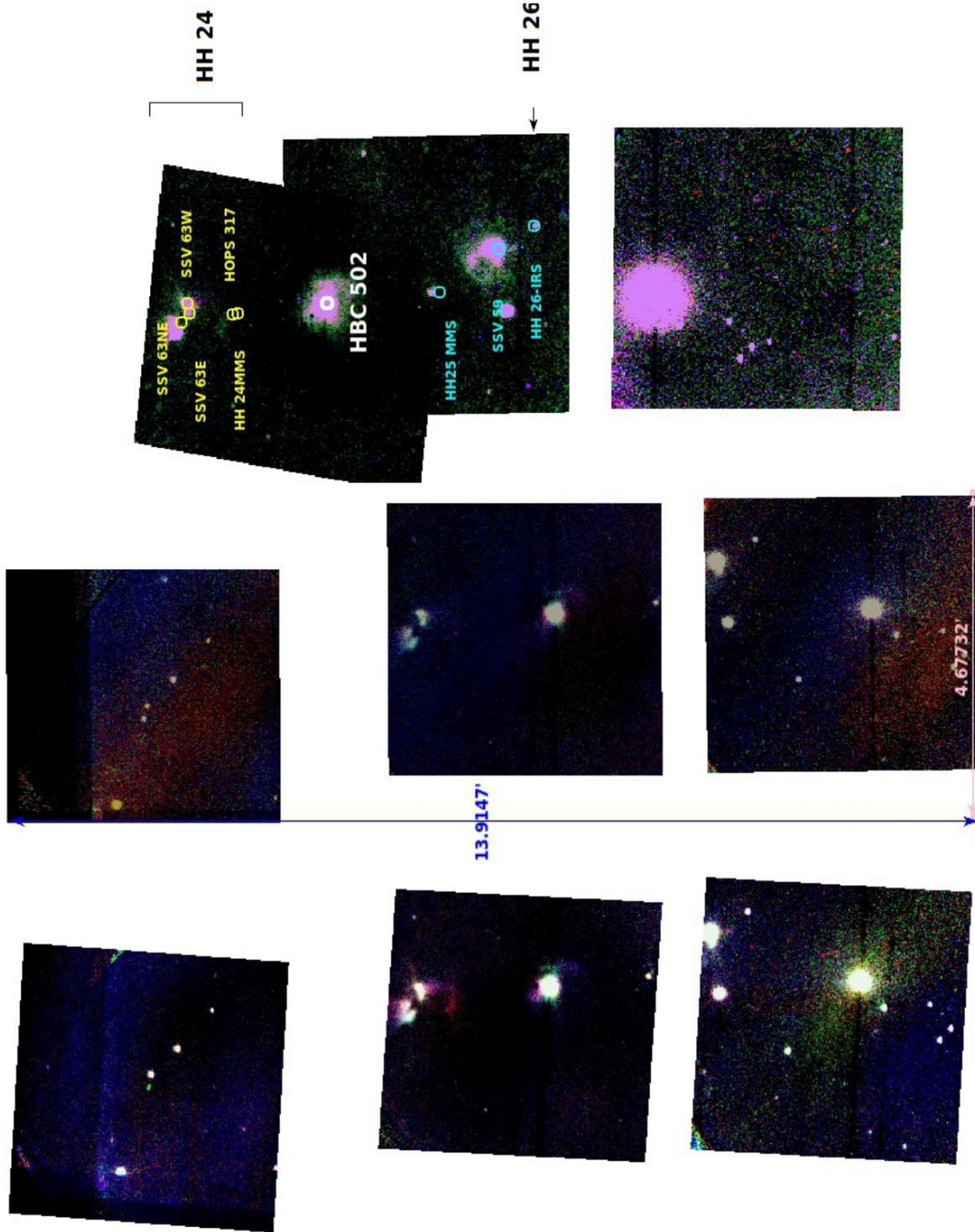


Figura 5.14: Mosaicos en tres colores, RGB de los ángulos de polarización 67.5° , 22.5° y 00° , respectivamente. La imagen de la izquierda corresponde a la primera temporada de observación (120s de integración), la imagen del centro a la segunda temporada (60s) y la imagen de la derecha a la tercera temporada (180s).

Capítulo 6

Discusión

La polarimetría se ocupa del estudio de la polarización de la luz y de otros tipos de ondas electromagnéticas. Cuando la luz atraviesa un campo magnético, la polarización de la luz puede cambiar. Este efecto se puede medir en observaciones polarimétricas, y puede proporcionar información sobre la orientación del campo magnético, lo que puede ser útil para entender la evolución y comportamiento de una estrella.

La luz infrarroja procedente de una protoestrella Clase 0-II (por ejemplo en HH 24-26) se polariza debido a la dispersión en los granos de polvo de las capas superficiales de un disco circumestelar y se muestra un patrón centro-simétrico con origen en la fuente iluminadora [26].

Cuando una protoestrella comienza a formarse de una nube de gas y polvo, los granos de polvo presentes en el entorno absorben y dispersan la luz de la protoestrella, actuando como polarizadores de la luz. Debido a que los granos de polvo son asimétricos y pueden estar orientados de manera preferencial, la luz dispersada puede tener una polarización preferencial en una dirección particular.

En las regiones moleculares, los granos de polvo interestelar pueden estar expuestos a la radiación electromagnética como la radiación cósmica y luz estelar. Esta radiación puede causar que los granos de polvo se alineen de cierta manera en relación al campo magnético local. Cuando los granos de polvo se alinean, sus ejes largos tienden a orientarse perpendicularmente al campo magnético local (debido a la emisión de radiación dipolar causada por la interacción de la radiación electromagnética y los pares radiativos producidos en el gas molecular circundante), esto se debe a que la radiación dipolar de los granos de polvo es más intensa en la dirección perpendicular al plano que contiene al dipolo eléctrico, y la fuerza magnética que actúa sobre la partícula cargada se orienta perpendicularmente al campo magnético.

Además de realizarse un análisis detallado de los mapas polarimétricos con la finalidad de investigar si HBC 502 está relacionada directamente con los HHs en las regiones norte y sur (HH 24 y HH 26), se estimó la distancia a la región HH 24-26 a partir del paralaje de HBC 502 en el catálogo Gaia-DR3. También se estimaron las distancias proyectadas en el plano del cielo de los flujos HH conocidos en la región. Como los objetos HH 24, 25 y 26 están asociados con una sola región de formación estelar, un núcleo de nube molecular alargado, bien definido y orientado, se analizan en este orden los patrones de polarización, los flujos de salida y sus estrellas generadoras.

Finalmente se muestra una comparación de los mapas de polarización NIR con otras longitudes de onda.

6.1. GAIA

El tercer catálogo de datos de la misión Gaia, Gaia-DR3 comprende la solución astrométrica completa: posiciones en el cielo (α , δ), paralaje y movimiento propio, para alrededor de 1.46×10^9 de fuentes. El paralaje consiste en observar los desplazamientos que se producen en la posición

aparente de las estrellas a medida que la Tierra se mueve alrededor del Sol y en Astronomía se utiliza paralaje trigonométrico para calcular distancias. La distancia a una estrella en pársecs ($1pc = 3.086 \times 10^{14}$ km) es la inversa de la paralaje trigonométrica medida en segundos de arco.

Las fuentes en el catálogo Gaia DR3 son estrellas visibles en el óptico, mientras que la mayoría de las fuentes de interés (asociadas con objetos HH's) son estrellas embebidas, esto es, visibles en longitudes de onda más largas como las del infrarrojo.

Para HBC 502 se encontró que el paralaje equivale a 2.4911, dando así una distancia de 401 pc. Se adoptó una distancia de 400 pc, en base a este resultado que concuerda con la distancia reportada en artículos más recientes ([12], [16]).

6.2. HH 24

El patrón de polarización en esta región se hizo más fácil de ver e interpretar en las imágenes polarimétricas con mayor tiempo de integración. En la primera (120s de integración) y tercera (180s) temporadas se observa que en el complejo HH 24 la intensidad de la polarización de la luz es muy alta sin embargo solo se detectó un patrón consistente en toda el área, los vectores, en su mayoría no tienen orientación preferencial y sus longitudes son variantes. Esto puede tener alguna de las siguientes dos implicaciones: 1) La estrella excitadora en la región tiene un disco inclinado, o 2) hay más de una estrella excitadora [26], tratándose de un complejo que contiene objetos HH. flujos de salida y estrellas fuente.

Del lado izquierdo del complejo HH 24 en los mapas de vectores de polarización (ver Figura 6.1) se destaca una geometría en forma de arco en donde los vectores parecen rodear un área de impacto, suponiendo así un arco de choque causado por el impacto de un flujo bipolar (o flujos) excitado por estrellas Clase 0-II (ver Sección 1.3).

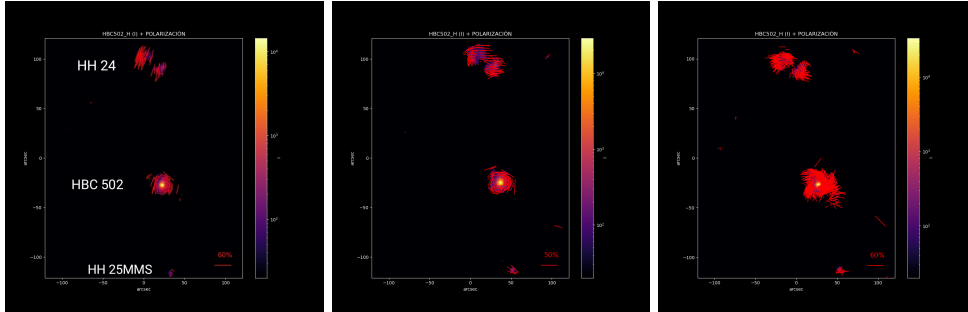


Figura 6.1: Comparación de los mapas de polarización de POLICAN (filtro H) en tres épocas de observación con tiempos de integración en forma creciente (60s, 120s y 180s).

Se encontró en Reipurth B., et al. 2023, [12] que el complejo HH 24 alberga cinco flujos colimados que emanan de un pequeño sistema múltiple protoestelar conformado de aproximadamente nueve fuentes, SSV 63Ea, SSV 63Eb, SSV 63Wa, SSV 63Wb, SSV 63NE, SSV 63S, SSV 63N, HH 24MMS y HOPS 317, clasificadas en la literatura como protoestrellas de Clase 0-II, estas fuentes tienen además objetos HH asociados, las relaciones se pueden ver en la Tabla 6.1.

Se realizó la distribución espectral de energía (SEDs, Spectral Energy Distributions) de tres de las fuentes del complejo: SSV 63NE, SSV 63E y SSV 63W, tomando la fotometría de VizieR Photometry viewer¹ y procesándola con el software de modelos de SED para objetos estelares jóvenes [25] sin considerar IRAS. Las gráficas del mejor ajuste en cada caso se muestran en la Figura 6.2 las cuales indican que las estrellas cuentan aún con una gran componente de disco, así mismo en la Tabla 6.2 se muestran algunos de los parámetros de salida del ajuste de modelos.

¹<http://vizier.cds.unistra.fr/vizier/sed/>

Tabla 6.1: Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].

Fuente	Clase	Jet	HH's
SSV 63E	II	HH 24C, E	HH 20, HH 24C, HH 24E
SSV 63NE	II	HH 24G	HH 24G
SSV 63W	II	HH 24 J	HH 19, HH 24J, HH 27
HOPS 317	0	HH 24 L	HH 24A

Considerando el análisis de los flujos y objetos HH asociados, se concluye que las estrellas se encuentran en una etapa temprana dentro de la Clase II de acuerdo a la clasificación evolutiva protoestelar.

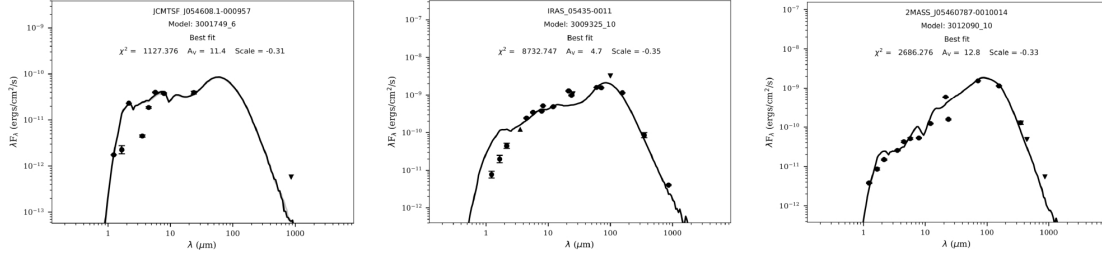


Figura 6.2: Distribuciones espectrales de energía y parámetros de salida de las estrellas SSV 63NE, SSV 63E y SSV 63W

Tabla 6.2: Parámetros físicos obtenidos de ajustes de SEDs

Fuente	A_V	Edad (años)	Masa estrella ($M_\odot$)	Masa disco ($M_\odot$)	Inclinación ($^\circ$)
SSV 63NE	11.365	80250	0.4097	9.373×10^{-3}	56.63
SSV 63E	4.665	1974	0.6613	3.714×10^{-2}	18.19
SSV 63W	15	2063	0.7038	9.08×10^{-4}	18.19

Las características más sobresalientes del complejo asociado a SSV 63 y de HOPS 317 se resumen a continuación, y se incluye la fuente HH24 MMS, que no es considerada una estrella fuente hasta este momento.

SSV 63: La región asociada con SSV 63 es compleja con múltiples fuentes integradas, varios objetos HH y flujos ionizados con diferentes ángulos de posición. SSV 63 es la fuente de infrarrojo cercano encontrada por Strom et al. [24].

Gibb [16], reportó dos flujos de salida bien definidos, HH 24C cuya dirección es de noroeste a sureste, del sistema SSV 63, y HH 24G perpendicular al mismo. También se considera el flujo HH 24J, el más extenso del complejo con $\sim 11.98'$ que excita los objetos HH 19 y 27. Gibb [16] supone que SSV 63E es responsable de HH 24C y HH 24E (considerándolos también como las componentes de un mismo flujo bipolar) y que SSV 63W impulsa el flujo HH 24J mientras que el jet HH 24G probablemente esté propulsado por SSV 63NE. Sin embargo investigaciones más recientes ([12] y sus referencias) muestran que el sistema múltiple, SSV 63, contiene al menos 7 fuentes, Ea, Eb, Wa, Wb, NE, S y N, cuya masa varía desde el límite de quemado de hidrógeno hasta las protoestrellas Herbig Ae [12].

Las estrellas están dispuestas de manera desordenada y no estable y las dominantes en el sistema son Ea, Eb, Wa, Wb y NE. Se establece la relación entre flujos de salida y fuentes excitadoras como se muestra en la columnas 1 y 2 de la Tabla 6.3.

HOPS 317: Es una protoestrella Clase 0 asociada al flujo de salida HH 24L y al nudo Herbig-Haro ópticamente visible designado con el mismo nombre. El objeto HH se encuentra a $9''$ de HOPS 317, que a una distancia de 400 pc corresponde a una separación proyectada de 3600 AU [12].

HH 24MMS y HOPS 317 están separados por $5''$ aunque se espera que en algún momento se unan como un sistema binario con una órbita cada vez más pequeña debido a la fricción dinámica o bien se fusionen con el complejo SSV 63 [12].

HH 24MMS: La fuente ha reportado fuerte emisión continua milimétrica y submilimétrica debido a una mejora significativa en la emisividad del polvo, posiblemente causada por la acumulación de mantos de hielo y la coagulación de pequeños granos de polvo en granos más grandes. Su espectroscopía ISO (Infrared Space Observatory) ha revelado la presencia de gas de choque denso y cálido con una temperatura de 1000 ± 400 K, las imágenes no revelan presencia de flujo de salida bipolar. La fuente no se detecta en longitudes de onda del infrarrojo cercano pero sí en longitudes centimétricas [16]. En 2016 Furlan et al. [13], identificó a $\sim 5''$ de HH 24MMS una fuente de NIR, Clase 0 llamada HOPS 317 y para 2021 se encontró una tercera fuente a $\sim 12''$, denominada HH 24mms-NW, lo que sugiere a HH 24MMS parte de un pequeño sistema múltiple, posiblemente con una estructura no organizada y poco estable.

Se presentan en la Tabla 6.3 las características principales de cada jet asociado con su fuente excitadora, V_t velocidad tangencial, V_T velocidad total, θ ángulo de inclinación del jet respecto al plano del cielo, L longitud del lóbulo del jet observado.

Tabla 6.3: Parámetros de los flujos encontrados en la literatura de la región aledaña a HBC 502.

Jet	Fuente	$V_t(\frac{km}{s})$	$V_T(\frac{km}{s})$	$\theta(^{\circ})^a$	$L(')$	t(años)	Ref.
HH 24C ^b	SSV 63E - Ea	250	300.00	35 (b)	0.605	274.46	[12]
HH 24E	SSV 63E - Ea	250	300.00	35 (r)	0.980	444.58	[12]
HH 24G	SSV 63NE	100-200	173.21	30 (b)	1.190	899.76	[12]
HH 24J	SSV 63W - Wb	100	101.54	10 (b)	5.991	6794.73	[12]
HH24 L	HOPS 317	100	-	-	0.150	170.13	[12]

^aSe indica si el corrimiento del lóbulo del jet es hacia el azul (b) o hacia el rojo (r)

^bHH 24C y HH 24E son reportados como componentes del mismo jet

De estos datos podemos calcular la edad cinemática (edad aproximada en que el jet fue excitado por la estrella fuente) de los flujos de la siguiente forma:

$$V_T = \frac{L}{t} \Rightarrow t = \frac{L}{V_T} \quad (6.1)$$

donde V_T es la velocidad del flujo (en $\frac{km}{s}$) y L la longitud del flujo (en $'$). Se realiza la siguiente conversión de unidades de la longitud para fines prácticos. Considerando una distancia de 400 pc en todos los casos.

$$\begin{aligned} 1' &= 0.116pc = 3.5794 \times 10^{12}km \\ 1año &= 3.156 \times 10^7s \end{aligned} \quad (6.2)$$

Jet C: Sea

$$t = \frac{2.165 \times 10^{12}km}{250\frac{km}{s}} = 8.66 \times 10^9s \approx 274.46 \text{ años}$$

Jet E: Usando la Ec. 6.1 y Ec. 6.2 se tiene:

$$t = \frac{3.507 \times 10^{12}km}{250\frac{km}{s}} = 1.4031 \times 10^{10}s \approx 444.58 \text{ años}$$

Jet G: Usando la Ec. 6.1 y Ec. 6.2 se tiene:

$$t = \frac{4.259 \times 10^{12} km}{150 \frac{km}{s}} = 2.8396 \times 10^{10} s \approx 899.76 \text{ años}$$

Jet J: Usando la Ec. 6.1 y Ec. 6.2 se tiene:

$$t = \frac{2.1444 \times 10^{13} km}{100 \frac{km}{s}} = 2.1444 \times 10^{11} s \approx 6794.73 \text{ años}$$

Jet L: Usando la Ec. 6.1 y Ec. 6.2 se tiene:

$$t = \frac{5.3691 \times 10^{11} km}{100 \frac{km}{s}} = 5.3691 \times 10^9 s \approx 170.13 \text{ años}$$

En la Figura 6.3 se muestra un esquema de las estrellas fuente del complejo HH 24-26 con sus respectivos flujos de salida y objetos HH asociados. En el esquema debe considerarse lo siguiente:

- Los flujos C y E podrían ser las componentes de un flujo bipolar [12].
- La representación del flujo J corresponde a la extensión total del flujo bipolar excitado por la fuente SSV 63-Wb. Se considera simetría en J se toma la mitad de la longitud total para calcular la edad cinemática, ver Tabla 6.3.
- Para los flujos restantes se ha considerado únicamente un lóbulo del flujo bipolar y las longitudes de estos son las utilizadas para calcular las edades cinemáticas, ver Tabla 6.3.

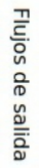


Figura 6.3: Distribución de la temperatura en esta zona.

6.3. HBC 502

La estrella T Tauri HBC 502 se considera el objeto más evolucionado del complejo HH 24-26, es una estrella Clase II tardía, que puede considerarse incluso Clase III por la ausencia de flujos bipolares en imágenes NIR y el remanente de disco que posee (ver Figura 6.4). La estrella no está relacionada con ningún objeto HH debido a su evolución avanzada. Se estima que la estrella tiene aproximadamente 623300 años, de acuerdo al parámetro obtenido del ajuste de la SED (Tabla 6.4).

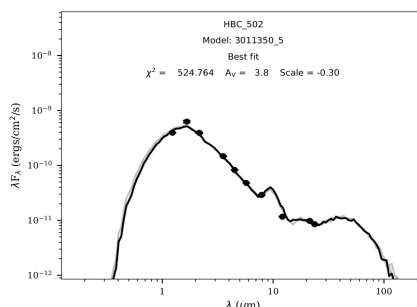


Figura 6.4: Distribución espectral de energía de la estrella T Tauri HBC 502. Observe que la contribución del disco corresponde a un remanente pequeño comparado con las estrellas Clase II más jóvenes (Figura 6.2).

Tabla 6.4: Parámetros físicos de HBC 502

A_V	Edad (años)	Masa estrella ($M_\odot$)	Masa disco ($M_\odot$)	Inclinación ($^\circ$)
3.763	623300	3.067	7.223×10^{-6}	63.26

El patrón de polarización observado (ver Figura 6.1) mantuvo una tendencia hacia una geometría circunsimétrica en las primeras dos temporadas de observación, sin embargo los trazos de los vectores se suavizaron mientras se aumentaba el tiempo de integración obteniendo en la tercera temporada mayor emisión y la presencia de lo que parecieran brazos espirales, modificando la simetría en el patrón. Esto indicaría que el remanente de disco no está siendo observado de frente sino inclinado, lo cual está de acuerdo con el valor de $\sim 63^\circ$ en la última columna de la Tabla 6.4. Esta inclinación se refiere a la orientación del disco protoplanetario en relación con nuestra línea de visión, y no a la orientación del disco en el espacio tridimensional [25].

Dado que el patrón de polarización no es uniforme [26] y no presenta evidencia de una compañera, se deduce entonces que la estrella T Tauri HBC 502 posee una intensa actividad magnética. La polarización de la luz observada en esta estrella ha sido atribuida a la dispersión de la luz polarizada por granos de polvo en el disco. Así los vectores de polarización indicarían la orientación de los granos de polvo en relación al campo magnético. En particular la polarización de la luz en HBC 502 es generada por la dispersión de la luz polarizada en la dirección perpendicular al plano del disco circunestelar, donde el campo magnético está orientado perpendicular a la dirección de propagación de la luz. Esta polarización es conocida como polarización de dispersión perpendicular y puede ser utilizada para inferir la orientación del campo magnético en el disco [26].

En la Figuras 6.5 y 6.6 se muestran las imágenes polarimétricas de los parámetros U y Q de Stokes de las tres épocas de observación, respectivamente. El parámetro U de Stokes se utiliza para medir polarización lineal diagonal de la luz. En HBC 502 específicamente, se observa un patrón constante en las primeras dos épocas (con un mes de diferencia entre ellas), sin embargo en la tercera época (con 11 meses de diferencia a la segunda) el patrón cambió cierto ángulo (ver Figura 6.5) que podría estar relacionado con los procesos físicos de la estrella y sus alrededores,

como la rotación de la estrella, los campos magnéticos y la estructura del disco circunestelar, probablemente protoplanetario.

El parámetro Q se refiere a la componente lineal horizontal de la polarización de la luz. En la Figura 6.6 de la misma manera que para el parámetro U, se aprecia un cambio angular de las primeras dos épocas de observación a la tercera fortaleciendo la posibilidad de que la estrella esté rotando y/o cambiando la estructura del disco circunestelar posiblemente debido a la formación de planetas.

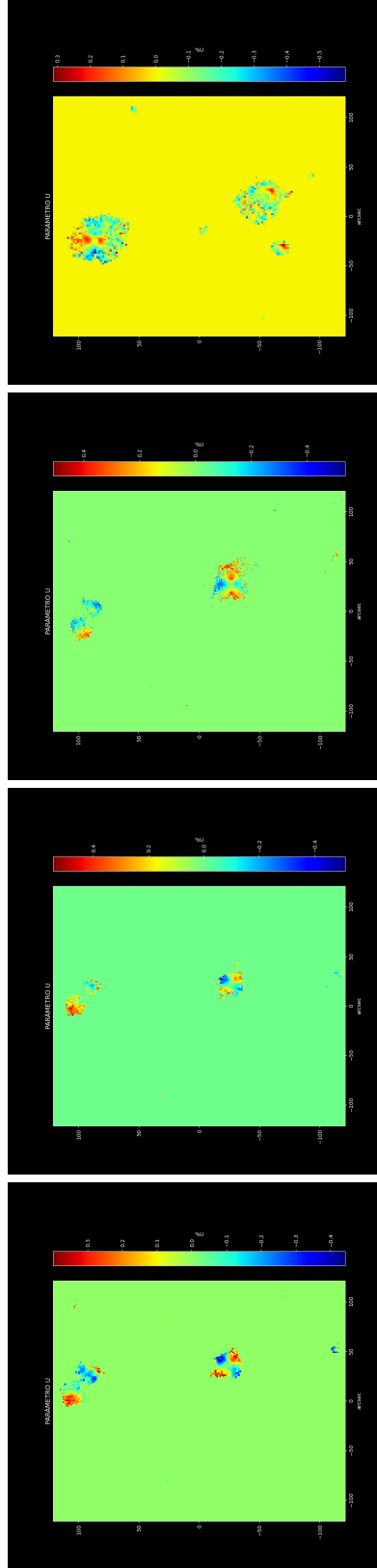


Figura 6.5: Parámetro U de Stokes de las tres épocas de observación (de izquierda a derecha, respectivamente). La cuarta imagen corresponde a la región más al sur observada en la tercera época.

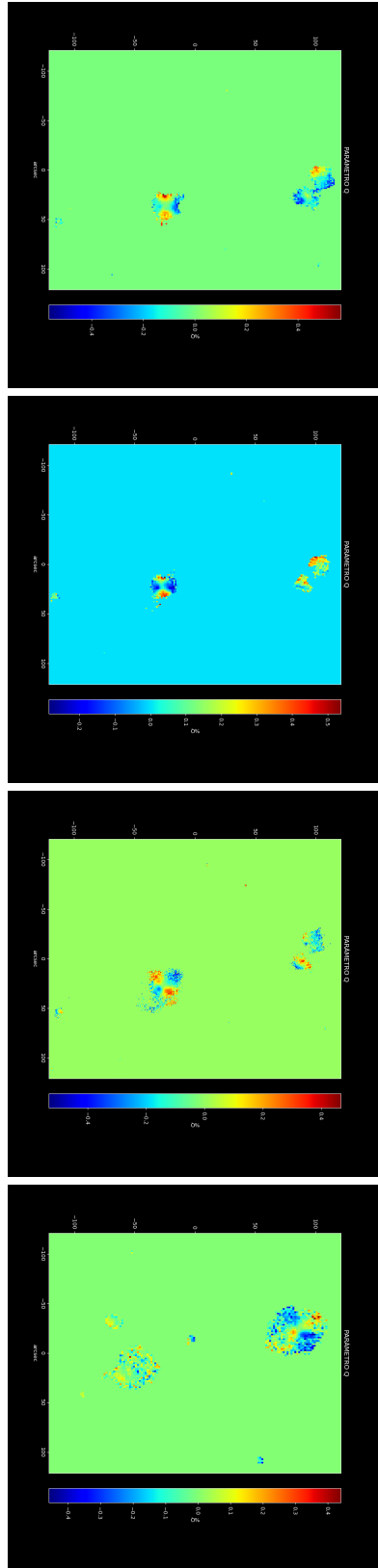


Figura 6.6: Idem Figura 6.5 para el parámetro Q de Stokes.

6.4. HH 25 y HH 26

Al sur de HBC 502 se encuentran las protoestrellas HH 25MMS y HH 26IRS, generadoras de varios HHs como se listan en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].

Fuente	Clase	Jet	HHs
HH 25MMS	0	No nombrado	HH 25A, HH 25B, HH 25C, HH 25D
HH 26IRS	I	No nombrado	HH 26A, HH 26B, HH 26C, HH 26D

En cuanto a la polarización medida, en la Figura 6.1 se puede apreciar la emisión de HH 25MMS en el borde inferior, mostrando un patrón casi horizontal con ligera inclinación que pasa por el centro de la estrella. Los mapas de polarización de la región sur y más al sur (época tres) se comparan en la Figura 6.7, donde se distinguen los vectores de polarización asociados a HH 26IRS. La información para discutir sobre HH 26IRS es escasa, se aprecia un vector de polarización atravesando la estrella cuya inclinación cambia según el tiempo de integración.

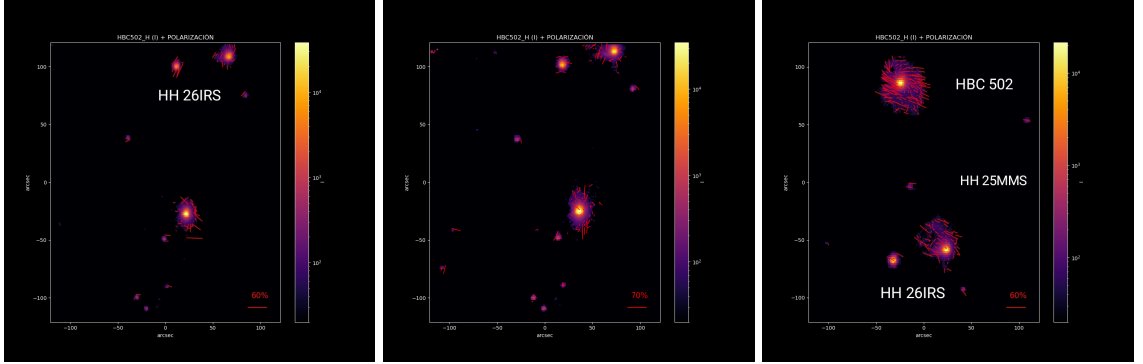


Figura 6.7: Comparación de los mapas de polarización de POLICAN (filtro H) en tres épocas de observación con tiempos de integración en forma creciente (60s, 120s y 180s).

La clasificación de ambas estrellas en la literatura, corresponde correctamente con las distribuciones espectrales de energía mostradas en la Figura 6.8, y en la Tabla 6.6 se muestran los parámetros físicos obtenidos del ajuste espectral.

Tabla 6.6: Clasificación de estrellas fuente excitadoras de flujos de salida, Gibb et al. 2008 [16].

Fuente	Av	Edad (años)	Masa estrella ($M_{\odot}$)	Masa disco ($M_{\odot}$)	Inclinación ($^{\circ}$)
HH 25MMS	6.217	2844	0.836	0.1021	49.46
HH 26IRS	4.237	1216	0.4158	7.346×10^{-3}	18.19

Las características más sobresalientes de las estrellas fuente se muestran a continuación.

HH 25MMS: La fuente se encuentra en el centro de un flujo de salida molecular bipolar altamente colimado, que se encuentra cerca del plano del cielo. El flujo se extiende hasta $2'$ (0.23 pc) a cada lado de la fuente de conducción. Se considera que muchas fuentes de Clase 0 generan flujos de salida moleculares potentes y bien colimados, a menudo acompañados de emisiones significativas de trazadores de choque como H_2 y SiO [16].

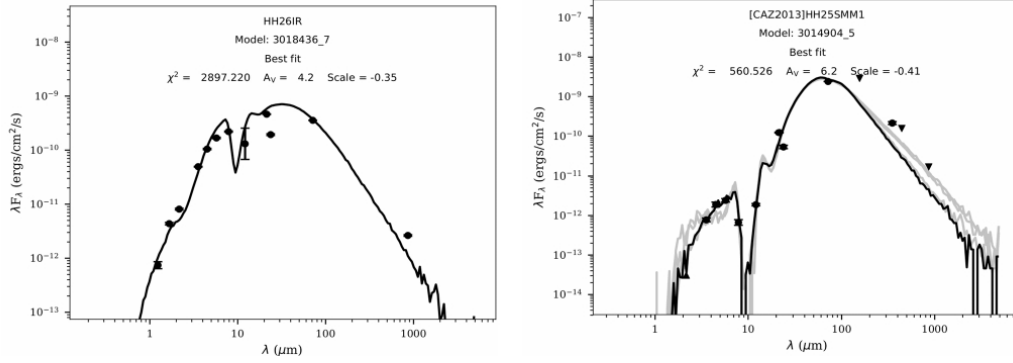


Figura 6.8: Distribuciones espectrales de energía de las estrellas HH 25MMS y HH 26IRS, respectivamente.

HH 26IRS: La fuente HH 26IRS de Clase I, posee un grupo pequeño de objetos HH 26 (ver Tabla 6.5) y dos lóbulos (observados en $CO J = 2 \rightarrow 1$) que pueden pertenecer al mismo flujo de salida, que se extienden $\sim 2.155'$ cada uno. El lóbulo suroeste se encuentra desplazado hacia el rojo mientras que el lóbulo noreste hacia el azul. Gibb [16] considera además de la curvatura del flujo diferencias estructurales entre los lóbulos como la posibilidad de la presencia de un sistema binario aún no resuelto en HH 26IRS.

Anteriormente se consideraba a la estrella SSV 59 como fuente de los objetos HHs 26.

Aunque los flujos de salida de una estrella son bipolares, en el análisis de estos se toma como referencia solo un lóbulo, ver Tabla 6.7.

Se presentan a continuación las características principales (d_o distancia al objeto, V_t velocidad tangencial, V_T velocidad total, θ ángulo de inclinación del jet respecto al plano del cielo, L longitud del lóbulo del jet observado) de cada jet asociado con su fuente excitadora.

Tabla 6.7: Parámetros de los flujos encontrados en la literatura de la región HH 26

Jet	Fuente	$d_o(\text{pc})$	$V_t(\frac{\text{km}}{\text{s}})$	$V_T(\frac{\text{km}}{\text{s}})$	$\theta(^{\circ})$	$L(')$	$t(\text{años})$	Ref.
-	HH 25MMS	400	22.55	24	20	2	10081.39	[16] [22]
-	HH 26IRS	400	4.19	-	-	2.155	-	[16] [17] [23]

De manera análoga al sistema HH 24, se calcula la edad cinemática del flujo de HH 25MMS usando los datos de la tabla 6.7 de la siguiente manera:

Jet de HH 25MMS: Usando la Ec. 6.1 y Ec. 6.2 se tiene:

$$t = \frac{7.1588 \times 10^{12} \text{ km}}{22.5 \frac{\text{km}}{\text{s}}} = 3.1816 \times 10^{11} \text{ s} \approx 10081.39 \text{ años}$$

Jet de HH 26IRS: Para este flujo no ha sido encontrado el ángulo de inclinación por lo que no es posible aproximar una edad dinámica.

En la Figura 6.3 se muestra un esquema de las estrellas fuente del complejo HH 24-26 con sus respectivos flujos de salida y objetos HH asociados.

6.5. Comparación con otras longitudes de onda

Resumiendo la polarimetría de la región completa, se destacan las siguientes observaciones:

- En el complejo HH 24 hay mayor actividad magnética que en HH 26. Los mapas polarimétricos dieron información de la estructura del campo magnético seguida por los vectores de polarización evidenciando el ambiente de formación estelar en el complejo que posee un gran número de objetos Herbig-Haro, estrellas progenitoras y flujos protoestelares.
- HBC 502 es la fuente más brillante mostrando fuerte actividad magnética, los vectores de polarización señalan esta actividad a través de la estructura del disco circunestelar. La peculiaridad de su patrón de polarización podría deberse a procesos físicos como la rotación de la estrella.
- La información obtenida en los mapas polarimétricos de HH 26IRS no permite realizar un análisis detallado de la región probablemente debido a la edad temprana de la estrella Clase I.

Se realizó una investigación en la literatura sobre datos polarimétricos en esta región, ya sea con observaciones en la misma u otra longitud de onda. Matthewss C.B. et al. 2002 [27], reporta observaciones hechas con el telescopio James Clerk Maxwell (JCMT, James Clerk Maxwell Telescope) que detectó emisión térmica polarizada a $850\mu\text{m}$ del polvo hacia tres regiones de formación estelar en la nube molecular Orión B: NGC 2071, NGC 2024 y LBS 23N (HH 24). Los patrones de polarización para estas 3 regiones muestran porcentajes de polarización disminuidos hacia los picos de mayor intensidad.

Comparando la polarización de $850\mu\text{m}$ en la región de HH 24-26 con una imagen RGB de 2MASS en K, H y J respectivamente, y con los datos polarimétricos de POLICAN sobrepuestos (ver Figura 6.9), se destaca lo siguiente:

- Los patrones de polarización submilimétrica guardan pequeña similitud con los obtenidos en NIR. En el núcleo 58 (HH 24) de la imagen de $850\mu\text{m}$ se aprecia medianamente un arco de choque (mismo que se observa en las imágenes de POLICAN), cuyo patrón no es tan evidente debido a que el número de vectores presentados en [27] es menor como resultado de un binning más alto (binning=4) respecto a las observaciones hechas con POLICAN (binning=2).
- La estrella T Tauri HBC 502 corresponde al núcleo 60 en la imagen de $850\mu\text{m}$. Los patrones de polarización no son semejantes debido a la diferencia de intensidad captada en cada longitud de onda, H ($1.63\mu\text{m}$) vs. $850\mu\text{m}$. Sin embargo, en los datos obtenidos se muestra un patrón circunsimétrico sobre la silueta de emisión en el óptico, sobre todo en lo que parecen ser brazos espirales.
- El cambio abrupto en la intensidad de los vectores que indican el grado de polarización en HBC 502 puede deberse a que el disco (posiblemente protoplanetario) de la estrella está inclinado respecto a la línea de visión.
- Los vectores de polarización de $850\mu\text{m}$ no cubren la región sur, es decir HH 25MMS (núcleo 65) por lo tanto no se puede comparar con los datos de POLICAN.

A pesar de haberse hecho una investigación cuidadosa, no se encontraron datos polarimétricos en otras longitudes de onda.

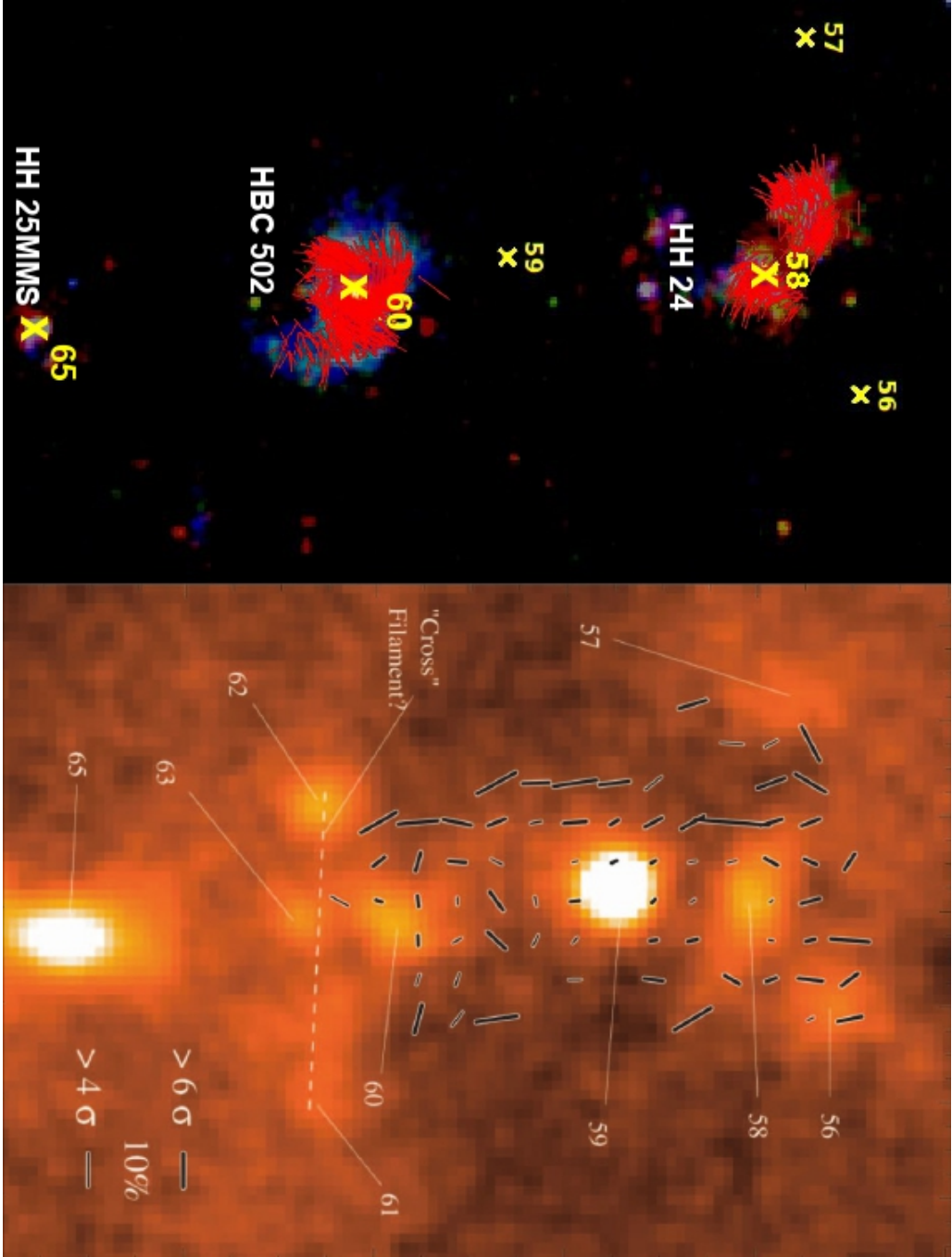


Figura 6.9: Comparación gráfica de la polarimetría en la región HH 24-26 obtenida con POLICAN y el JCMT. La primera imagen muestra los vectores de polarización en NIR utilizando filtro H ($1.63 \mu\text{m}$) sobre una RGB de 2MASS en las bandas K, H y J, respectivamente. La segunda imagen muestra el mapa de polarización en longitud de onda de $850 \mu\text{m}$, tomada de [27], identificando con números los núcleos submilimétricos. Se etiquetan algunas estrellas fuente reportadas en esta tesis.

Capítulo 7

Conclusión

Se recopiló una lista de cincuenta objetos Herbig-Haro (HH), nueve estrellas generadoras (de HHs) en las regiones de NGC 2071, NGC 2068 y HH 24-26. Aún existen veintisiete HHs no asociados a una fuente generadora probablemente muy embebida y todavía no observada.

La región HH 24-26 fue observada en la banda H ($1.63\mu\text{m}$) del infrarrojo cercano (NIR) como resultado de la clasificación de HBC 502 como una protoestrella T Tauri ubicada al noreste de la nube molecular L1630. El objeto de interés fue en un inicio HBC 502 quien en longitudes de onda ópticas mostraba la presencia de emisión en sus extremos norte y sur. Estos objetos identificados como objetos HH serían consecuencia de los flujos bipolares que la estrella emitiera en etapas evolutivas anteriores.

Se realizaron tres épocas de observaciones astronómicas en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) en el periodo de 2022 a 2023 (Marzo y Abril de 2022 y Enero de 2023) de HBC 502 con POLICAN y CANICA. Debido al patrón de observación y con la intención de considerar los objetos al norte y sur de HBC 502 se obtuvo un campo de aproximadamente $14' \times 5'$ en el procesamiento de los datos y la obtención de la polarimetría. El cúmulo al norte de HBC 502 fue identificado como HH 24 y la región sur como HH 26. HBC 502 se encuentra aproximadamente en el centro de estas dos regiones.

Se obtuvieron imágenes polarimétricas de los parámetros I, Q y U de Stokes y del grado (p) y ángulo (θ) de polarización de cada región y en cada época de observación.

El análisis de los mapas de polarización fueron el elemento clave para el estudio de la formación estelar en HH 24-26 concluyendo que:

1. En HH 24 se observaron vectores de polarización en todas direcciones y particularmente un arco de choque pero demasiado a la izquierda para poder considerarlo como un flujo de salida excitado por HBC 502. Se encontró posteriormente en la literatura que en HH 24 habían nueve fuentes protoestelares asociadas a cinco flujos colimados y a sus respectivos objetos HH. Todas estas fuentes generadoras se encuentran iniciando la Clase II en la evolución protoestelar (siendo estrellas jóvenes de $\approx 2,000$ años y masas menores a una masa solar).
2. HBC 502 mostró el patrón de observación más peculiar de la región pues para las primeras dos épocas de observación (120 y 60 seg de integración, respectivamente) se tenía una distribución circunsimétrica en la envoltente de la estrella, relacionandolo así con el disco de la misma y reiterando la premisa de que la polarización en protoestrellas Clase 0-II es debida a dispersión por los granos de polvo presentes en su disco protoestelar. Para la tercera época el patrón se apegaba más a lo observado en el óptico (por medio de SIMBAD), la morfología en la envoltente de la estrella tiene tendencia a lo que parecen ser brazos espirales lo cual puede deberse al movimiento rotacional de HBC 502, sin embargo para reiterar esto es necesario realizarse más investigaciones y observaciones de alta resolución espacial. HBC 502 no es asociada a los objetos HHs en sus extremos debido a la falta de flujos protoestelares en las

observaciones siendo clasificada como estrella T Tauri tardía con una edad aproximada de 620,000 años y $M \approx 3M_{\odot}$.

3. Para el sistema HH 26 se encontró en la literatura que la estrella HH 26IRS es fuente de las componentes de flujo de salida y los objetos HH en esta región. En un primer artículo revisado [18] de esta región se menciona a la estrella SSV 59 como fuente de la región, sin embargo esto se descarta en artículos posteriores y en esta tesis se comprobó por medio de la edad obtenida en los parámetros de salida de los ajustes de SEDs, en donde SSV 59 tiene una edad aproximada de 660,000 años, clasificándose como estrella T Tauri tardía. Por otro lado HH 26IRS es una estrella joven Clase 0 cuya emisión observada en NIR es baja comparada con las demás estrellas en el complejo HH 24-26 que en su mayoría se encuentran en Clase II.

En el sur también se encuentra el sistema HH 25 que contiene cuatro objetos HH y una componente de flujo protoestelar asociados a HH 25MMS (estrella Clase 0 con edad aproximada de 2,800 años). Tanto HH 26IRS como HH 25MMS tienen masas menores a una masa solar.

Los complejos HH 24 y HH 26 parecen ser independientes a HBC 502 y no guardar relación con ella, sin embargo no se descarta la idea de que en algún momento estuvieron involucrados entre sí, pero para ello hace falta tener más datos como imágenes polarimétricas de alta resolución y/o en longitudes de onda más larga (por ejemplo, submilimétricas) y trazadores moleculares de flujos protoestelares, así como un análisis de los movimientos propios de HBC 502. En general la región HH 24-26 contiene un gran número de objetos Herbig-Haro y flujos de salida que proporcionan una fuerte evidencia de que el cúmulo ha estado formando estrellas de baja masa activamente.

Capítulo 8

Glosario

Acreción: La acreción ocurre a medida que el material circundante, que aún no se ha incorporado completamente a la protoestrella, cae hacia ella debido a la gravedad. El material en el entorno de la protoestrella forma un disco de acreción alrededor de ella, donde el gas y el polvo se concentran en órbitas alrededor del objeto central. Este disco de acreción actúa como un suministro de material para la protoestrella, permitiéndole crecer en tamaño y masa a medida que incorpora el material del disco.

IR: La radiación infrarroja, o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Por ello, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 0.7 hasta los 1000 micrómetros.

NIR: El infrarrojo cercano es la región de longitud de onda más corta del espectro infrarrojo, situada entre la luz visible y el infrarrojo medio, aproximadamente entre 800 y 2.500 nanómetros, aunque no hay una definición universalmente aceptada. En astronomía, la espectroscopía en infrarrojo cercano se utiliza para estudiar las atmósferas de estrellas frías. En este rango pueden observarse líneas de transiciones rotacionales y vibracionales de moléculas como el óxido de titanio, cianógeno y monóxido de carbono, que dan información sobre el tipo espectral de la estrella. También se utiliza para estudiar moléculas en otros objetos astronómicos, como las nubes moleculares.

HH: Los objetos Herbig-Haro (denominados comúnmente objetos HH) son nebulosas asociadas con estrellas recién formadas. Estudiados en detalle por Guillermo Haro y George Herbig. Estas nebulosas son de vida muy corta, del orden de unos pocos miles de años y se forman por la interacción entre el gas expulsado por la estrella central con nubes de material gaseoso y polvo interestelar colisionando a velocidades de varios kilómetros por segundo ionizando el gas. Los objetos HH son fenómenos altamente variables en el tiempo y pueden evolucionar de manera perceptible en escalas de tiempo muy cortas de unos pocos años.

T Tauri: Las estrellas T Tauri son un tipo de estrellas variables irregulares nombradas a partir del objeto prototípico del grupo, la estrella T Tauri. Son estrellas jóvenes que aún no han entrado en la secuencia principal (estrellas presecuencia principal). Se encuentran cerca de nubes moleculares y se identifican por su variabilidad estelar y la presencia de líneas intensas en su cromosfera.

NGC: El Nuevo Catálogo (NGC, New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars) es el catálogo de objetos de cielo profundo más conocido en la astronomía amateur. Contiene 7840 objetos difusos tales como nubes estelares, nebulosas planetarias y galaxias, la totalidad de objetos del cielo profundo conocidos a finales del siglo XIX.

$M_{\odot}$: Es la unidad de masa solar, esto es, la masa del sol con un valor de $1.989 \times 10^{30} kg$

[S II]: La línea de emisión [S II] se encuentra en la región del espectro de luz visible en el rango de longitud de onda de aproximadamente 671 a 673 nanómetros (nm). Esta línea es importante en astronomía porque su presencia puede indicar la presencia de gas ionizado y excitado en un objeto celeste, lo que puede ayudar a los astrónomos a entender la estructura y dinámica de ese objeto. Además, la relación entre la intensidad de la línea [S II] y otras líneas de emisión en el espectro de un objeto celeste puede proporcionar información sobre la temperatura, densidad y composición química del gas que se encuentra en el objeto.

MS: Se denomina secuencia principal (Main Sequence) a la región del diagrama de Hertzsprung-Russell en la que se encuentran la mayor parte de las estrellas cuyo aspecto común principal es el consumo de hidrógeno como fuente principal de la luminosidad estelar. Es una banda continua y distintiva de estrellas que aparece en las parcelas de color estelar versus brillo.

PMS: Una estrella de presecuencia principal (estrella u objeto PMS, pre-Main Sequence star) es una estrella que está en la fase evolutiva previa a la secuencia principal. Se dividen en estrellas T Tauri o estrellas FU Orionis (con una masa inferior a 2 masas solares), y estrellas Herbig Ae/Be (entre 2 y 8 masas solares).

YSO: Objeto estelar joven es una estrella en sus primeros estadios de evolución. En la literatura científica escrita en inglés aparece con el acrónimo YSO (young stellar object). Los objetos estelares jóvenes son usualmente clasificados usando un criterio basado en la pendiente de su distribución espectral de energía.

SSV: La abreviatura "SSV" se refiere a los objetos estelares identificados por los astrónomos Strom, Strom y Verba en su estudio de 1976 titulado "Variable Stars in the Small Magellanic Cloud". En este estudio, los autores identificaron y clasificaron varios tipos diferentes de estrellas variables en la Pequeña Nube de Magallanes. En su clasificación, los autores utilizaron la abreviatura "SSV" para referirse a las estrellas variables que exhibían una variabilidad de tipo "sinusoidal" en su curva de luz,

GAIA: Misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) para crear un mapa tridimensional de nuestra galaxia, la Vía Láctea, en el proceso de revelar la composición, formación y evolución de la galaxia.

Apéndice B

Polarización de la luz

El siguiente tratamiento es una síntesis del tema tratado en el libro [8].

B.1. Luz polarizada y no polarizada

Una onda electromagnética como lo es la luz, consiste de un campo eléctrico y uno magnético perpendiculares entre sí, que a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación. La luz usualmente se encuentra en un estado no polarizado, es decir, su campo eléctrico puede estar oscilando en todas las direcciones posibles (el uso del campo eléctrico es por convención, bien se podría usar como referencia el campo magnético, por la ortogonalidad entre los campos en medios isotrópicos.)

En el laboratorio, para obtener luz polarizada se utilizan diversos dispositivos ópticos, llamados polarizadores o retardadores, configurados adecuadamente para dejar pasar la luz de un haz incidente en una dirección establecida (la orientación del campo eléctrico es constante aunque su magnitud y signo varíen con el tiempo) o retardar la luz que incide, dado que existen diversas direcciones en que pueden configurarse estos dispositivos. Se utiliza geometría básica para mejor comprensión, en los tipos de polarización se hace uso de patrones seccionales, esto es, un haz polarizado horizontalmente se representa como una línea horizontal, la polarización vertical con una línea vertical, la polarización circular derecha es representada con un círculo cuyo sentido sigue las manecillas del reloj, ver ejemplos en la Figura B.1

Un parámetro importante de un polarizador es su polarización $\mathbf{p}$, definida como el grado de polarización que es una propiedad del haz incidente que inicialmente se encuentra no polarizado. Se denominan tres tipos de polarización: lineal, circular y elíptica. El tipo lineal tiene infinitas formas de polarización que difieren en ángulo, el tipo circular tiene dos formas que difieren en lateralidad (giro: sentido de las manecillas del reloj o contrario a este) y el tipo elíptico posee un número infinito de formas que difieren en ángulo, lateralidad y elipticidad.

La polarización elíptica abarca lineal y circular cuando la elipticidad es 0 y 1 respectivamente, y en conjunto con los parámetros definidos en la Figura B.2 se puede describir el patrón de sección general de un haz monocromático. El ángulo φ (entre el semieje mayor y el eje X) se denomina *acimut* del patrón de sección; $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. La razón b/a de los semiejes se llama *elipticidad*; el símbolo β puede usarse para representar $\arctan(b/a)$; $-45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$. La elipticidad se usa con preferencia a la excentricidad, que se define como $(a^2 - b^2)^{1/2}/a$.

E_y es el valor máximo de la componente y del vector de campo eléctrico y E_x es el valor máximo de la componente x del campo eléctrico.

Cada tipo de polarización puede ser representada usando la Ecuación 3.3 de la Sección 3, por ejemplo, un haz de luz monocromático con polarización circular podría ser la suma de dos expresiones, una para la componente vertical y otra para la horizontal, en este caso con misma

APÉNDICE B. POLARIZACIÓN DE LA LUZ
B.1. LUZ POLARIZADA Y NO POLARIZADA

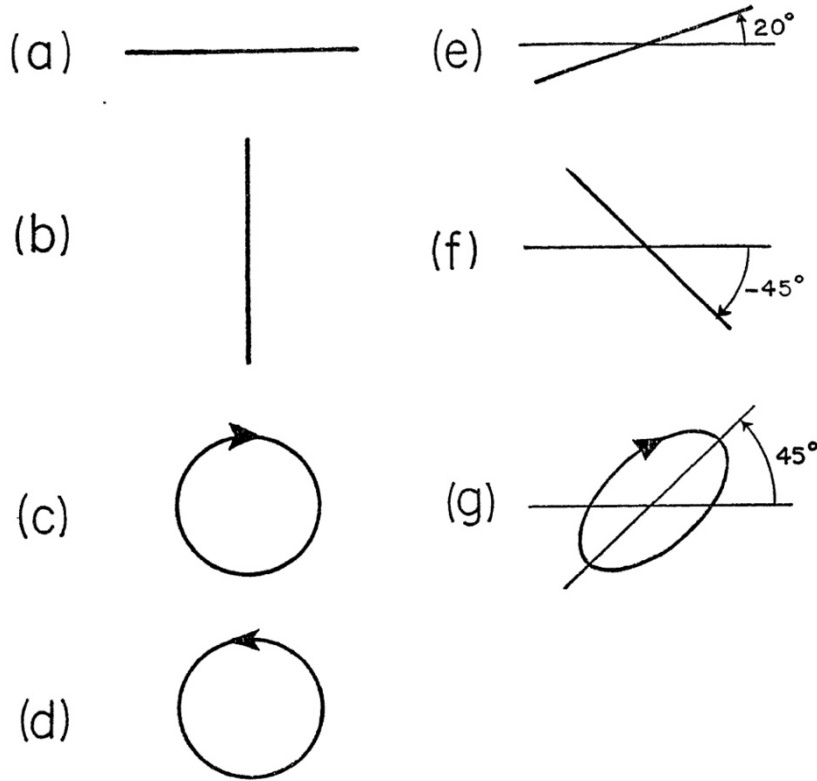


Figura B.1: Patrón seccional de un haz polarizado a) horizontalmente b) verticalmente, c) circular derecha, d) circular izquierda, e) lineal a 20° , f) lineal a -45° , g) elíptica derecha a 45° . Imagen tomada de [8].

amplitud y un desfase ($\epsilon_x - \epsilon_y$) de 90° . El signo de la diferencia de fase denotado por δ indica el sentido de la polarización, esto es, si $0^\circ < \delta < 180^\circ$ el sentido es positivo con las manecillas del reloj y si $-180^\circ < \delta < 0^\circ$ es negativo en sentido antihorario. Ya que el patrón seccional general es una elipse, si $\delta = 0^\circ$ el patrón es una línea recta y cuando $|\delta| = 90^\circ$ el patrón es un círculo, como se mencionó anteriormente.

De la representación anterior se puede considerar ahora la suma de dos haces monocromáticos. El caso más sencillo es considerar haces polarizados linealmente, con misma fase (**coherentes**) y frecuencia, ya que se suman directamente los dos vectores que representan la raíz cuadrada media de las vibraciones eléctricas, por otro lado, si los haces están en desfase (**incoherentes**) basta con sumar sus intensidades (si ambos tienen la misma intensidad la suma de ellas es 0).

Usualmente en la teoría de la polarización de la luz se indaga en las dos contrapartes descritas en esta sección, luz polarizada y no polarizada, pero naturalmente la luz no tiene total inclinación por alguno de estos estados, es decir, se encuentra parcialmente polarizada dando pie al grado de polarización, $\mathbf{p}$.

El grado de polarización ($\mathbf{p}$) se define en términos de las componentes en que un haz puede ser dividido, tomando en cuenta lo siguiente:

1. Un haz es dividido en un par de componentes no coherentes, C_a corresponde a una componente totalmente polarizada (dependiendo de su dirección de polarización se define la polarización del haz final) y C_b a una no polarizada. Esta definición es útil en el uso de polarizadores parciales y retardadores.

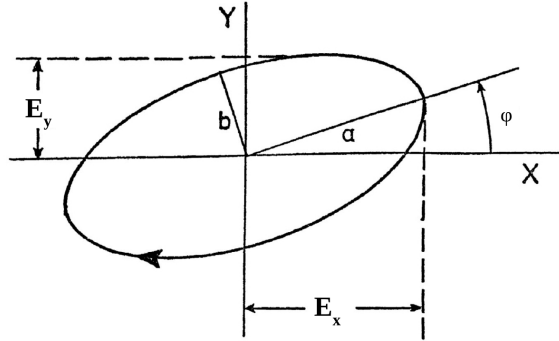


Figura B.2: Luz polarizada elípticamente. Imagen tomada de [8]. En el caso de la luz E_x y E_y corresponden a los máximos de las componentes del campo eléctrico

2. Un haz se divide en dos componentes completamente polarizadas y ortogonales entre sí que difieren en intensidad. C_d corresponde a la componente mas intensa y C_i a la componente con menor intensidad. Utilidad en el uso de polarizadores y divisores birrefringentes

de manera que se describe la porción polarizada de una onda electromagnética, así, una onda completamente polarizada tiene un grado de polarización igual al 100 % mientras que para una onda no polarizada $p = 0\%$, y en un haz polarizado parcialmente se tendrá una oscilación de 0 – 100 %. Tomando la intensidad de cada componente en que se dividieron los haces, el grado de polarización es calculado de la siguiente manera:

$$p = \frac{I_a}{I_a + I_b} \quad (\text{B.1})$$

o bien

$$p = \frac{I_d - I_i}{I_d + I_i} \quad (\text{B.2})$$

de acuerdo a la definición elegida, y se puede visualizar gráficamente en la esfera de Poincaré, como un auxiliar en la descripción moderna de la luz polarizada.

B.2. Esfera de Poincaré

La esfera de Poincaré, creada por Henri Poincaré en 1892 proporciona una forma eficiente de representar la luz polarizada y predecir el comportamiento de un retardador en la forma de llevar acabo la polarización. El método es esencialmente un mapeo; cada punto en la esfera representa una forma de polarización. Un esquema ilustrativo de ésta se presenta en la Figura B.3.

Los polos superior e inferior representan la luz polarizada circularmente a la izquierda y a la derecha respectivamente. Otros puntos indican polarización elíptica. Un punto H elegido arbitrariamente en el ecuador designa la polarización horizontal, y el punto V diametralmente opuesto designa la polarización vertical. Los haces cuyas formas de polarización son ortogonales se representan mediante puntos en los extremos opuestos de un diámetro. Por lo general, se supone que el radio de la esfera es la unidad; a veces se considera proporcional a la intensidad del haz.

La ubicación de un punto arbitrario $\mathbf{P}$ en la esfera de Poincaré estará en términos la longitud (2φ) y la latitud (2β) en donde $-180^\circ \leq 2\varphi \leq 180^\circ$ es positiva al medirla en el sentido horario desde el punto H, y $-90^\circ \leq 2\beta \leq 90^\circ$ es positiva al medirse hacia el abajo desde el ecuador. De manera que $\mathbf{P}$ representa un haz completamente polarizado elípticamente con acimut φ , elipticidad $\tan\beta$ y el sentido depende de que P esté en el hemisferio norte o sur, esto es, en términos de los parámetros de la Figura B.2

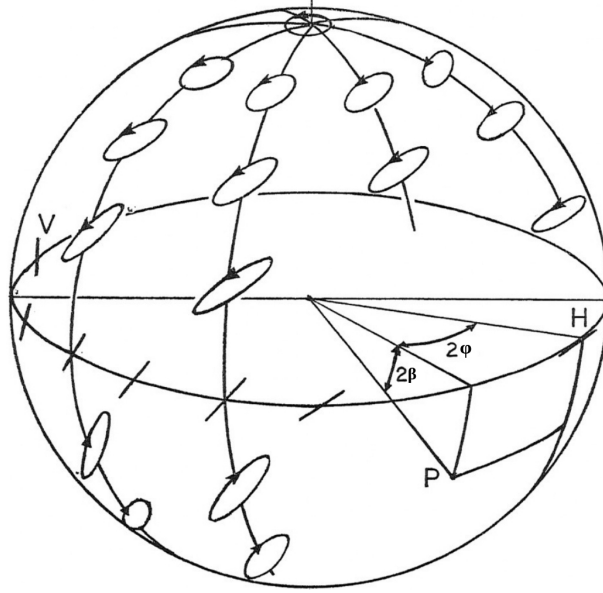


Figura B.3: La esfera de Poincaré muestra diferentes áreas y la especificación del punto general P en términos de los ángulos 2φ , medido en el sentido de las agujas del reloj desde H , y 2β , medido hacia abajo desde el ecuador.

$$\begin{aligned} \varphi(\text{acimut}) \\ \frac{b}{a} = \tan|\beta| \end{aligned} \tag{B.3}$$

orientación: izquierda o derecha para 2β negativo o positivo respectivamente.

La representación de $\mathbf{P}$ en coordenadas cartesianas X , Y y Z es entonces de la forma:

$$\begin{aligned} X &= \cos 2\beta \cos 2\varphi \\ Y &= \cos 2\beta \sin 2\varphi \\ Z &= \sin 2\beta \end{aligned} \tag{B.4}$$

tomando en cuenta los casos siguientes:

- Luz polarizada horizontalmente: $2\beta = 2\varphi = 0 \Rightarrow X = 1, Y = 0 \text{ y } Z = 0, P_H = (1, 0, 0)$
- Luz polarizada verticalmente: $2\beta = 0, 2\varphi = \pi \Rightarrow X = -1 \text{ y } Y = Z = 0, P_V = (-1, 0, 0)$

De manera análoga, si se tienen los valores X , Y y Z , se pueden calcular el acimut y la elipticidad con las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{2} \arctan \frac{Y}{X} \\ \frac{b}{a} &= \tan |\beta| = \tan \left| \frac{1}{2} \arcsin Z \right| \end{aligned} \tag{B.5}$$

orientación: izquierda o derecha para Z negativo o positivo respectivamente.

En general, cualquier haz completamente polarizado tiene valores X, Y y Z idénticos a los parámetros de Stokes *normalizados* Q, U y V (notación de Walker) respectivamente.

B.3. Parámetros de Stokes

Sir George Stokes demostró en 1852 que el haz más general de luz parcialmente polarizada podría caracterizarse por cuatro variables que ahora se denominan **Parámetros de Stokes**. Son cuatro cantidades que se producen en el tratamiento mecánico cuántico de los haces de luz, escritos en forma de un vector columna u horizontalmente entre llaves de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad \{I \quad Q \quad U \quad V\}. \quad (\text{B.6})$$

en donde **I** es la intensidad, **Q** representa preferencia horizontal, **U** preferencia a más de 45° y **V** preferencia circular derecha.

Los parámetros de Stokes describen la intensidad y polarización de un haz de luz polarizado completa o parcialmente e incluso no polarizado, así como de haces monocromáticos o policromáticos.

En notación de Walker, basada en la teoría electromagnética descrita en dimensiones de intensidad (Ecuación B.7) [8], se supone a la luz suficientemente monocromática para que, en cualquier momento, exista un ángulo de fase definible entre las componentes escalares instantáneas E_x y E_y del campo eléctrico, pero también la luz debe ser lo suficientemente policromática para que el estado no polarizado no esté excluido.

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2 + E_y^2 \rangle \\ Q &= \langle E_x^2 - E_y^2 \rangle \\ U &= \langle 2E_x E_y \cos \delta \rangle \\ V &= \langle 2E_x E_y \sin \delta \rangle \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

E_x y E_y , son valores definidos positivos instantáneos de las componentes del vector eléctrico en un sistema de coordenadas rectangulares ortogonales a la dirección de propagación y δ es la diferencia de fase relativa instantánea restringida al rango entre $-\pi$ y $+\pi$. Los corchetes angulares representan el promedio temporal.

Para un haz no polarizado, el vector eléctrico cambia rápidamente con el tiempo, tanto en amplitud como en fase. En este caso, I es la intensidad medida y Q, U, V promedian a cero. Para un haz polarizado elípticamente, el vector eléctrico también cambia rápidamente, pero de tal manera que E_x/E_y y δ permanecen constantes. En este caso I es la intensidad medida y Q, U, V tendrán valores constantes.

Dado un vector de Stokes (Ecuación B.6) cuyas entradas dependen del campo eléctrico (Ecuación B.7) se toman únicamente los valores relativos llamados parámetros *normalizados*, estos se obtienen dividiendo toda la expresión por el valor del primer parámetro de Stokes, I. Al respecto, se tienen las siguientes afirmaciones:

- Ningún parámetro (Q, U, V) es mayor que I.
- Por ejemplo, en el vector de Stokes $\{3,0,1,0\}$, la normalización corresponde a $\{1,0,0.3,0\}$.
- Un haz no polarizado corresponde a

$$Q = U = V = 0. \quad (\text{B.8})$$

- Un haz completamente polarizado tiene la forma

$$I = (Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{B.9})$$

- El grado de polarización es igual a

$$p = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{I}. \quad (\text{B.10})$$

- Dos haces con el mismo vector de Stokes son indistinguibles.

El vector de Stokes de un haz completamente polarizado se relaciona con la esfera de Poincaré utilizando la magnitud del conjunto de Ecuaciones B.7. En donde I se considera el radio de la esfera mientras que Q , U y V se asocian a las coordenadas cartesianas X , Y y Z respectivamente, de un punto en la esfera.

En la resolución de problemas que involucran luz coherente se trata el cálculo de Jones mientras que para luz incoherente se opta por el cálculo de Mueller.

B.4. Matrices de Mueller

El vector de Stokes en conjunto con las matrices de Mueller describen el cambio ocurrido en la intensidad y polarización de un haz que incide un grupo de dispositivos ópticos, como polarizadores, retardadores o dispersores.

La acción de un dispositivo óptico, por ejemplo, un polarizador es transformar el estado de polarización de un haz a otro dividiendo el haz incidente en dos componentes ortogonales, absorbiendo una y emitiendo la otra según la forma de polarización. Existen cuatro tipos de polarizadores que producen este fenómeno:

Dicroísmo: El dicroísmo se refiere a la absorción selectiva de una de las componentes ortogonales del estado de polarización de un haz. Un polarizador dicroico absorbe preferencialmente una componente del campo mientras que es transparente a la otra.

Birrefringencia: La birrefringencia, o doble refracción, es un fenómeno que se presenta en cristales no cúbicos como la calcita o en plásticos sometidos a tensión. Debido a su estructura atómica son anisótropos. El rayo incidente al pasar por la calcita se separa en dos rayos, llamados ordinario o y extraordinario e , el rayo e se desvía más que el o .

Reflexión: La luz no polarizada puede polarizarse si se refleja en condiciones especiales como la superficie de una placa de vidrio o algún material dieléctrico. La polarización es en este caso paralela a la superficie y depende del ángulo en que la luz llega a la superficie o ángulo de incidencia.

Dispersión: Un haz incidente que pasa a través de un medio con cierto índice de refracción dado, disminuye su intensidad a medida que su energía pasa a luz dispersa.

Por otro lado, el efecto de un retardador es el de dividir un haz monocromático polarizado (sin alterar la intensidad o el grado de polarización) en dos componentes retardando la fase de una con respecto a la otra para después sumarlos y tener un único haz final.

Los retardadores son llamados placas de onda o desfasadores y están hechos de materiales birrefringentes, el efecto de estas placas en un haz incidente es el de desfasar (retardar) relativamente las componentes vibracionales. La retardancia (δ) puede ser expresada en términos de ciclos (δ_c), grados o ángulo de fase (δ_{deg}). Los retardadores más comunes son los retardadores lineales con una retardancia de 90° y 180° , llamados placas de un cuarto de onda y placas de media onda, respectivamente.

La retardancia, en general, está dada por J_p , $\mathbf{t}$ y λ_v en donde J_p es la magnitud de la diferencia de la longitud de los ejes mayor y menor de la sección transversal elíptica, $\mathbf{t}$ corresponde al espesor del retardador y λ_v a la longitud de onda en el vacío. La descripción de un retardador es en términos de su lateralidad, retardo y ángulo de rotación (ζ) que es igual a la mitad de la retardancia: $|\zeta| = \frac{1}{2}\delta$, se puede describir el retardador en términos de su matriz de Mueller asociada.

Mueller señaló que los parámetros de Stokes podrían considerarse como los componentes de una matriz de columna o vector de 4 entradas (también llamado cuadvectores o 4-vector). Así, un haz de luz polarizada elípticamente podría representarse mediante un cuadvector, y cualquier cambio de polarización estaría representado en él. Matemáticamente, una matriz 4×4 es un operador que cambia un cuadvector en otro linealmente dependiente. Por lo que cualquier dispositivo óptico que cambie el estado de polarización de un haz de luz puede representarse mediante una matriz 4×4 . El mayor aprovechamiento de esta representación es la simplicidad en arreglos en serie de dispositivos ópticos atravesados a su vez por un haz incidente pues el resultado viene dado por el producto de las matrices de los dispositivos separados. Las matrices individuales depende de la composición del dispositivo y su orientación.

La convención al realizar la multiplicación de matrices es: el vector que representa el haz incidente debe escribirse a la derecha seguido por las matrices que representan los dispositivos encontrados.

Ejemplos de polarizadores ideales:

- El arreglo de un polarizador lineal ideal con transmisión horizontal golpeado por un haz de luz no polarizado e intensidad unitaria $\{1, 0, 0, 0\}$, es:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

de forma que el primer elemento indica la intensidad del haz emergente, el segundo elemento cuyo valor es positivo indica preferencia por la polarización horizontal y los últimos dos elementos son cero.

- Arreglo de un haz polarizado horizontalmente de intensidad unitaria $\{1, 1, 0, 0\}$, que incide un retardador simple e ideal de 180° cuyo eje rápido está a 45° :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

en donde $I = 1$ y el valor negativo del segundo elemento corresponde a luz polarizada verticalmente.

- Caso general de cualquier arreglo matricial con n -dispositivos ópticos ideales involucrados:

$$[M_n] \dots [M_3][M_2][M_1][V_i] = [V_e] \quad (\text{B.13})$$

Las matrices de Mueller no derivan de la teoría electromagnética de la luz sino de la experimentación. Para ello se anticipa primero el resultado de colocar un dispositivo óptico en un haz incidente y se busca la matriz que represente dicho objeto de mejor manera.

El procedimiento de las Matrices de Mueller es válido para polarizadores del tipo ideal y no ideales o retardadores elípticos, sin embargo, en los últimos dos casos la estructura de la matriz se torna compleja. En la creación de una matriz debe probarse su utilidad en cuatro tipos independientes de haces incidentes:

APÉNDICE B. POLARIZACIÓN DE LA LUZ
B.5. CLASIFICACIÓN ESPECTRAL DE HARVARD

1. Luz no polarizada
2. Luz polarizada linealmente-horizontalmente
3. Luz polarizada linealmente a 45°
4. Luz polarizada circularmente a la derecha

Encontrar la matriz $[P_\theta]$ de un polarizador con acimut θ depende de la matriz $[P_0]$ del polarizador en su orientación principal (con su eje de transmisión horizontal.) de la siguiente manera:

$$[P_\theta] = [T(-2\theta)][P_0][T(2\theta)] \quad (\text{B.14})$$

en donde $[T(2\theta)]$ es la matriz de rotación ya conocida,

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & S_2 & 0 \\ 0 & -S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.15})$$

con $C_2 = \cos 2\theta$ y $S_2 = \sin 2\theta$, y $[T(-2\theta)]$ corresponde a la matriz contrarrotante de $[T(2\theta)]$. Efectuando la multiplicación correspondiente se tiene lo siguiente

$$\begin{aligned} [P_\theta] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & -S_2 & 0 \\ 0 & S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & S_2 & 0 \\ 0 & -S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & C_2 & S_2 & 0 \\ C_2 & C_2^2 & C_2 S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 S_2 & S_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

Este procedimiento es aplicable a retardadores lineales, polarizadores y retardadores elípticos; la matriz de un dispositivo en un acimut no principal se calcula a partir de la matriz del dispositivo en el acimut principal con la ayuda de la matriz de rotación y la matriz contrarrotatoria.

Las matrices más usadas son:

- placa de vidrio isotrópico no absorbente
- placa ideal de vidrio isotrópico con transmitancia k
- placa totalmente absorbente
- despolarizador ideal
- polarizadores lineales homogéneos ideales de ángulos: 0° , 90° , 45° , -45°

ver más detalles en el Apéndice 2 de [8], Polarized Light: Production and Use.

B.5. Clasificación espectral de Harvard

La clasificación espectral de Harvard, también conocida como clasificación estelar de Harvard, es un sistema utilizado para categorizar y clasificar las estrellas en función de sus características espectrales. Fue desarrollado por Annie J. Cannon en la Universidad de Harvard a fines del siglo XIX y principios del XX.

APÉNDICE B. POLARIZACIÓN DE LA LUZ

B.5. CLASIFICACIÓN ESPECTRAL DE HARVARD

La clasificación espectral de Harvard se basa en el análisis de la luz emitida por las estrellas, descomponiéndola en su espectro mediante el uso de un espectrógrafo. El espectro resultante muestra líneas de absorción y emisión características que corresponden a elementos químicos presentes en la atmósfera estelar.

El sistema utiliza una combinación de letras y números para representar las clases espectrales de las estrellas. Las letras van desde la clase O, que representa las estrellas más calientes, hasta la clase M, que representa las estrellas más frías. Dentro de cada clase, se utilizan números del 0 al 9 para proporcionar una mayor subdivisión y refinar la clasificación.

Aunque el significado exacto de los números puede variar dependiendo del contexto y del sistema de clasificación utilizado, se pueden interpretar de la siguiente manera:

- 0: Indica que la estrella muestra características espectrales excepcionales dentro de su clase principal, como líneas de absorción o emisión inusualmente fuertes o débiles. Estas estrellas se consideran prototipos o representantes destacados de su clase.
- 1-9: Proporcionan una gradación en las características espectrales dentro de cada clase. Estos números pueden indicar diferencias en la temperatura efectiva de la estrella, la fuerza de las líneas espectrales, la gravedad superficial u otras propiedades físicas.

La secuencia de letras O, B, A, F, G, K, M se estableció basándose en la apariencia del espectro y en la evolución estelar. Esta secuencia también está relacionada con la temperatura superficial de las estrellas, donde las estrellas de clase O son las más calientes y las estrellas de clase M son las más frías.

Bibliografía

- [1] MEADOWS A.J. *EVOLUCIÓN ESTELAR*, Editorial Reverté, S. A., 1987.
- [2] ZHAO B., WANG M., YANG J., ET AL. *NEWLY DISCOVERED HERBIG-HARO OBJECTS IN THE NGC 2068 AND NGC 2071 REGIONS*, The Astronomical Journal, 118:1347-1353, 1999 September.
- [3] EISLÖFFEL J., MUNDT R. *PARSEC-SCALE JETS FROM YOUNG STARS*, The Astronomical Journal, 1997.
- [4] VON HIPPEL, T., BELL BURNELL, S. J., WILLIAMS, P. M *A working catalogue of Herbig Haro objects*, Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser., Vol. 74, p. 431-442 (1988).
- [5] STALELLA R., ANGLADA G., *Introducción a la física del medio interestelar*, 1ª edición, Publicacions UB, 1996.
- [6] INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE LA PLATA. (S. F.). OBJETOS ESTELARES JÓVENES, <https://www.iar.unlp.edu.ar/boletin/objetos-estelares-jovenes/>
- [7] KAUFFMANN J., *The State and Evolution of Isolated Dense Molecular Cores*, Junio, 2007.
- [8] SHURCLIFF W. A. *POLARIZED LIGHT PRODUCTION AND USE*, Cambridge, Massachusetts, 1962.
- [9] PACHOLCZYK A. G. *Radio Astrophysics: Nonthermal processes in galactic and extragalactic sources*, Steward Observatory. The universe of Arizona, 1970.
- [10] DEVARAJ R., MAYYA Y. D., CARRASCO L. Y LUNA A. *Characterization and Performance of the Cananea Near-infrared Camera (CANICA)*, Astronomical Society of the Pacific, 130:055001 (16pp), 2018 May.
- [11] DEVARAJ R., LUNA A., CARRASCO, L., ET AL. *POLICAN: A Near-infrared Imaging Polarimeter at the 2.1m OAGH Telescope*, Astronomical Society of the Pacific, 130:055002, 21pp, 2018 May.
- [12] REIPURTH B., BALLY J., HSI-WEI Y., ET AL. *The HH 24 Complex: Jets, Multiple Star Formation, and Orphaned Protostars*, arXiv e-prints, 2023.
- [13] FURLAN, E., FISCHER, W. J., ALI, B., STUTZ, ET AL. *The Herschel Orion Protostar Survey: Spectral Energy Distributions and Fits Using a Grid of Protostellar Models*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 224:5 (45pp), 2016 May
- [14] MATTHEWS, B. C., WILSON, C. D *Magnetic Fields in Star-forming Molecular Clouds. IV. Polarimetry of the Filamentary NGC 2068 Cloud in Orion B*, The Astrophysical Journal, Mayo2002, ApJ, 571, 356

- [15] KARGALTSEVA N. S., KHAIBRAKHMANTOV S. A., DUDOROV A. E., ET AL. *Influence of the magnetic field on the formation of protostellar disks*, Open Astronomy, 7 April 2022.
- [16] GIBB A.G. *Star Formation in NGC 2068, NGC 2071, and Northern L1630*, Handbook of Star Forming Regions Vol. I, Astronomical Society of the Pacific, 2008.
- [17] SNELL, R. L., EDWARDS, S. *OBSERVATIONS OF HIGH-VELOCITY MOLECULAR GAS NEAR HERBIG-HARO OBJECTS: HH 24-27 AND HH 1-2*, The Astrophysical Journal, 259:668, 1982.
- [18] JONES B. F., MARTIN C., ET AL. *PROPER MOTIONS OF HERBIG-HARO OBJECTS. VIII. THE REGION OF NGC 2068*, THE ASTRONOMICAL JOURNAL, NOVEMBER 1987.
- [19] MATTHEWS, N., LITTLE, L. T. *Ammonia observations of the Herbig-Haro objects HH 24-27*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 205, 123-130, October 1983.
- [20] LADA E., BALLY J., STARK A. *An Unbiased Survey for Dense Cores in the Lynds 1630 Molecular Cloud*, Astrophysical Journal v.368, p.432, February 1991.
- [21] HARJU J., WALMSLEY C., WOUTERLOOT J. *Ammonia clumps in the Orion and Cepheus clouds.*, Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser., Vol. 98, p. 51-76, April 1993.
- [22] GIBB A.G., RICHER J.S., CHANDLER C.J., DAVIS C.J. *A survey of SiO 5 $\rightarrow$ 4 emission toward outflows from low-luminosity protoestellar candidates*, The Astrophysical Journal, 603:198-212, 2004 March 1.
- [23] BENEDETTINI M., GIANNINI T., NISINI B., TOMMASI E., LORENZETTI D., DI GIORGIO A.M., SARACENO P., SMITH H.A., AND WHITE G.J. *The ISO spectroscopic view of the HH 24-26 region*, Astron. Astrophys. 359, 148-158, 2000.
- [24] STROM, K. M., STROM, S. E., VRBA, F. J. *Infrared surveys of dark-cloud complexes. I. The Lynds 1630 dark cloud*, THE ASTRONOMICAL JOURNAL VOLUME 81, NUMBER 5, 1976, AJ, 81, 3083.
- [25] ROBITAILLE P., WHITNEY A., INDEBETOUW R., ET AL. *INTERPRETING SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTIONS FROM YOUNG STELLAR OBJECTS. I. A GRID OF 200,000 YSO MODEL SEDs*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 167:256Y285, 2006 December.
- [26] FERNÁNDEZ LÓPEZ M. *Emisión (sub)milimétrica polarizada de discos protoplanetarios*, Asociación Argentina de Astronomía. Boletín de artículos científicos. 2022.
- [27] MATTHEWS B. C., FIEGE J. D., MORIARTY-SCHIEVEN G. *MAGNETIC FIELDS IN STAR-FORMING MOLECULAR CLOUDS. III. SUBMILLIMETER POLARIMETRY OF INTERMEDIATE-MASS CORES AND FILAMENTS IN ORION B*, The Astrophysical Journal, 569:304-321, 10 April 2002.
- [28] DEVARAJ R., D.P. CLEMENS, L.K. DEWANGAN, ET AL. *Magnetic fields and Star Formation around H ii regions: The S235 complex*, 5 Marzo 2021