

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**ESTRUCTURA MORFOCINEMÁTICA DE LA  
NEBULOSA PLANETARIA NGC 2346**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
FÍSICO

PRESENTA:

**LEONARDO OCIEL ESPINOZA ZEPEDA**

ENSENADA B.C.

OCTUBRE DEL 2017

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTRUCTURA MORFOCINEMÁTICA DE LA NEBULOSA  
PLANETARIA NGC 2346

TESIS PROFESIONAL

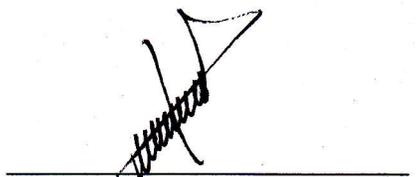
QUE PRESENTA

LEONARDO OCIEL ESPINOZA ZEPEDA

APROBADO POR:



Dr. Roberto Vázquez Meza  
Director de Tesis



---

Dr. José Manuel López Rodríguez  
Sinodal



---

M.C. Maria Hortensia Riesgo Tirado  
Sinodal



---

M.C. Pedro Francisco Guillén Reyes  
Sinodal

ENSENADA B.C.

OCTUBRE DEL 2017

---

RESUMEN de la Tesis de Leonardo Ociel Espinoza Zepeda presentada para la obtención del título de Físico. Ensenada, Baja California, México, octubre del 2017.

## ESTRUCTURA MORFOCINEMÁTICA DE LA NEBULOSA PLANETARIA NGC 2346

Se realizó un estudio morfocinemático de la Nebulosa Planetaria NGC 2346. Utilizando observaciones realizadas en el Observatorio Astronómico Nacional de la Sierra de San Pedro Mártir se realizó el procesamiento e interpretación de los datos. Para esto fue necesario el uso de diversos programas de computadora especializados y diversos conceptos de física, para finalmente obtener un modelo tridimensional del objeto y su estructura cinemática. Encontramos que NGC 2346 es una nebulosa bipolar con una estructura toroidal en su centro. Su velocidad de expansión ecuatorial es de  $11 \text{ km s}^{-1}$  y la sistémica es de  $v_{\text{Hel}} = 26 \text{ km s}^{-1}$  ( $v_{\text{LSR}} = 9 \text{ km s}^{-1}$ ). De acuerdo a nuestro modelo, la estructura tiene una edad cinemática aproximada de 17 mil años.



---

Dr. Roberto Vázquez Meza  
Director de Tesis

## ***Agradecimientos:***

*Al Dr. Roberto Vázquez Meza por aceptarme como tesista y dejarme trabajar con él*

*Al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN107914 por el apoyo económico para la  
realización de este proyecto*

*A la M.C. Hortensia Riesgo, el Dr. José Manuel López y el M.C. Francisco Guillén por  
aceptar leer este trabajo y ser sinodales del mismo*

*A Matematiké A.C., la C. Karen Macías Cárdenas y la Dra. Laurence Sabín por el  
apoyo con equipo de cómputo*

*Al M.C. Marco Antonio Gómez Muñoz por el apoyo técnico*

*“Somos polvo de estrellas que piensa acerca de estrellas”*

***Carl Sagan***

---

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Nebulosas planetarias . . . . .	1
1.2. Morfología . . . . .	2
1.3. Formación de Nebulosas Planetarias . . . . .	4
1.4. Modelos de formación de nebulosas planetarias . . . . .	5
1.4.1. Modelo Generalizado de Vientos Estelares Interactuantes . . . . .	5
1.4.2. Modelo de Barral y Cantó (1981) . . . . .	6
1.4.3. Chevalier y Luo (1994) . . . . .	7
1.4.4. Modelo de Cliffe (1996) . . . . .	7
1.4.5. Modelo de formación de NP a partir de una estrella binaria . . . . .	8
<b>2. Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Espectroscopía . . . . .	8
2.1.1. Resolución espectral . . . . .	10
2.2. Cinemática . . . . .	11
2.2.1. Velocidades supersónicas . . . . .	11
2.2.2. Efecto del viento estelar sobre el gas interestelar . . . . .	12
2.2.3. Efecto Doppler . . . . .	14
2.2.4. Velocidad sistémica . . . . .	16
2.3. Tamaño y distancia a los objetos celestes . . . . .	16
2.3.1. Tamaño . . . . .	16
2.3.2. Paralaje . . . . .	18
2.4. Edad cinemática de una Nebulosa Planetaria . . . . .	19
<b>3. Metodología</b>	<b>19</b>
3.1. Instrumentación . . . . .	19
3.1.1. Telescopio 2.1 m . . . . .	20
3.1.2. Manchester Echelle Spectrograph . . . . .	21
3.1.3. CCD's . . . . .	21
3.2. Observaciones . . . . .	22
3.2.1. BIAS . . . . .	23
3.2.2. Espectros de comparación . . . . .	24
3.2.3. Imagen directa . . . . .	25
3.2.4. Imagen mas rendija . . . . .	25
3.2.5. Espectro . . . . .	26
<b>4. Resultados</b>	<b>27</b>
4.1. El caso de NGC 2346 . . . . .	27
4.2. Velocidad sistémica . . . . .	28
4.3. Diagramas Posición-Velocidad . . . . .	28

---

4.4. Estructura morfocinemática . . . . .	32
4.4.1. Modelado de los diagramas Posición-Velocidad . . . . .	32
4.5. Velocidad de expansión . . . . .	34
4.6. Tamaño y distancia . . . . .	36
4.7. Edad cinemática . . . . .	38
<b>5. Discusión</b>	<b>38</b>
<b>6. Conclusión</b>	<b>39</b>
<b>7. Referencias</b>	<b>40</b>

---

# 1. Introducción

## 1.1. Nebulosas planetarias

Cuando las estrellas como nuestro Sol llegan a sus etapas evolutivas más avanzadas liberan sus capas más externas al espacio quedando un núcleo caliente y compacto que ioniza el gas a su alrededor. La presión de radiación promueve la generación de un viento que empuja mecánicamente al gas circundante, generando una estructura muy particular que se expande rápidamente, la cual es conocida como Nebulosa Planetaria (NP) (Figura 1). Las NP's constituyen la fase final de estrellas cuya masa inicial esta entre  $0.8 < M/M_{\odot} < 8$ . En su núcleo, la estrella central puede tener temperaturas que van desde 30,000 hasta 300,000K.

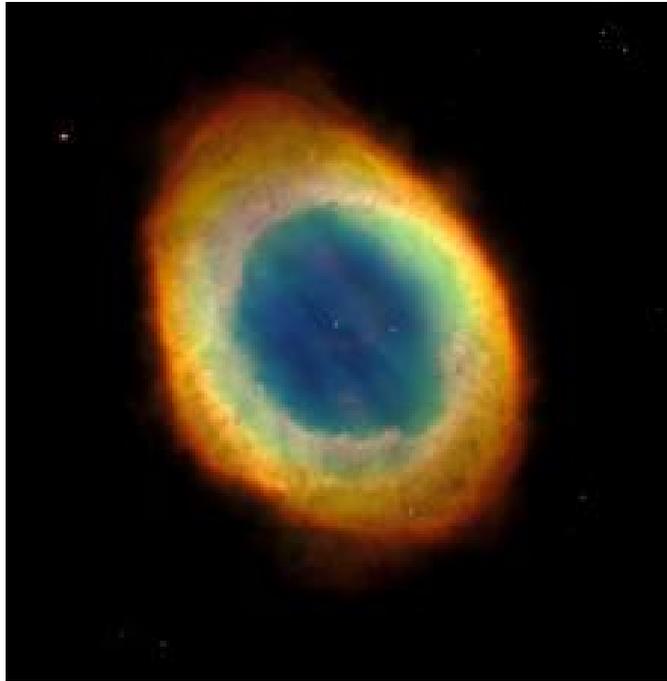


Figura 1: Nebulosa del anillo, con una estrella central en el núcleo y cascarón de gas. Imagen tomada de [observatorio.info/2013/06/m57-la-nebulosa-anillo/](http://observatorio.info/2013/06/m57-la-nebulosa-anillo/)

La primera observación registrada de una NP ocurrió en el año de 1794 y fue realizada por el astrónomo francés Charles Messier, aunque el nombre le fue asignado por William Herschel, notable astrónomo alemán, que le puso ese nombre debido a su apariencia semejante a la de los planetas más alejados del Sistema Solar. Por otro lado, en 1887, las NP's se catalogaron junto con galaxias y cúmulos estelares en el New General Catalog of Clusters and Nebulae (NGC).

---

## 1.2. Morfología

En nuestra galaxia podemos encontrar diversas estructuras morfológicas en las NP's. Estas se clasifican por su forma geométrica aparente, la cual es moldeada principalmente por el viento de su estrella central. Las hay:

- Redondas: Su forma es completamente simétrica, por lo que deducimos que se trata de una estructura esférica.

-Elípticas: Su apariencia es la de una elipse (dos ejes de simetría), lo cual implica que la forma tridimensional es la de una elipsoide.

-Bipolares: Poseen dos ejes de simetría, pero presentan una estructura estrecha en el centro generando dos lóbulos.

-Irregulares: No poseen una simetría regular lo cual puede generar diversos lóbulos que emanan de éstas. Destacan en este caso estructuras multipolares o de simetría puntual.

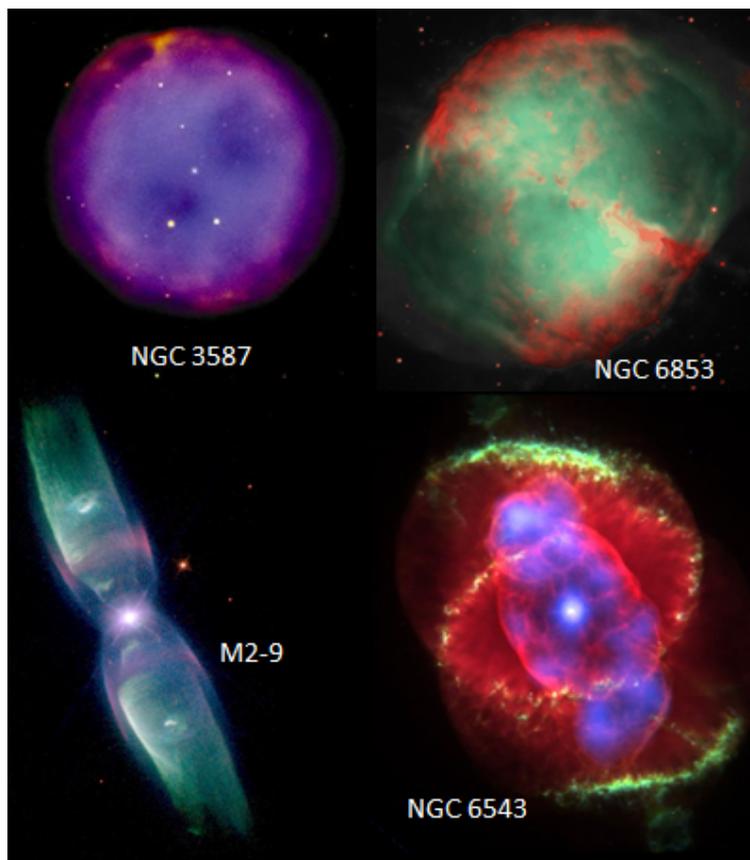


Figura 2: Principales formas de las NP's (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo redonda, elíptica, bipolar e irregular) Imágenes tomadas de [www.iac.es/nebu/catalogo.html](http://www.iac.es/nebu/catalogo.html)

---

La NP estudiada en este trabajo es NGC 2346 cuya simetría en el plano del cielo es bipolar.



Figura 3: NGC 2346. Imagen adquirida en el Observatorio Nacional de Astronomía Óptica Kitt Peak en Tucson, Arizona. Imagen tomada de [www.caelumobservatory.com/obs/n2346.html](http://www.caelumobservatory.com/obs/n2346.html)

Algunos aspectos importantes que hay que considerar son, por ejemplo, las masas de las progenitoras; para el caso de las bipolares, la masa de la estrella progenitora es mayor de  $1.5 M_{\odot}$ , mientras que para las elípticas y redondas de  $1.1 M_{\odot}$  (Zuckerman y Aller, 1986). Aunque estudios posteriores afirman que la formación de los dos lóbulos en este tipo de nebulosas se debe a que en su centro hay un sistema binario (Soker, 1998). Otro aspecto importante es que las NP's también pueden presentar flujos colimados de alta velocidad, es decir un chorro (*jet*) de material con una dirección específica. Éstos pueden originarse debido a distintos procesos como campos magnéticos, núcleos binarios, etc., que producen la eyección del material a velocidades relativamente altas. Dichos flujos ahora ya son considerados estructuras típicas de las NP's. Existen diversas estructuras en las NP's asociadas a los flujos colimados:

-Bipolaridad: Se cree que estas estructuras se producen debido a que inicialmente hubo una eyección de material en forma de disco o toroide, generando un gradiente de densidad que enfoca hacia los polos una posterior liberación de gases isotrópica formando así los lóbulos bipolares característicos.

-Chorros: También se les conoce como *Jets*, generalmente son chorros de material colimados que aparecen en pares simétricos respecto a la estrella central, éstos se caracterizan por velocidad alta y la emisión de líneas espectrales de baja excitación como nitrógeno, azufre y oxígeno ionizados.

---

-FLIERS (*Fast Low-Ionization Emission Regions*): Estos flujos colimados aparecen en pares de condensaciones pequeñas ( $\approx 0.01$  pc) y brillantes. Las observaciones muestran que estas condensaciones tienen velocidades supersónicas ( $\approx 50\text{km s}^{-1}$ )

-BRETs (*Bipolar Rotating Episodic Jet*): Son condensaciones muy brillantes que presentan estructuras bipolares. Es decir, que son eyectados con la misma rapidez pero en sentidos opuestos. Tienen un carácter episódico en el que se distinguen dos o más eventos de eyección independientes, tales como chorros de alta velocidad que son flujos muy colimados con velocidades de eyección altas ( $\geq 50\text{km, s}^{-1}$ ).

-Simetría puntual: Son microestructuras que se encuentran localizadas en lados opuestos y equidistantes respecto al núcleo las que se cree que se forman debido al flujo colimado del tipo BRET (Vázquez, 1999).

### 1.3. Formación de Nebulosas Planetarias

Como ya se mencionó, las NP's se forman en estrellas similares en masa a nuestro Sol. Se cree que todas las estrellas progenitoras de las NP's siguen una traza en el diagrama HR (Hertzsprung-Russell). En donde la estrella se convierte primero en lo que se conoce como estrella Gigante Roja la cual, al terminar de consumir el hidrógeno en su núcleo durante la etapa de secuencia principal, comienza a consumir helio por fusión termonuclear, llevando el quemado de hidrógeno a una cáscara alrededor del núcleo de helio inerte. Al final, las capas externas serán lanzadas al espacio convirtiendo al objeto en una proto-NP (Figura 5) y posteriormente en una NP.

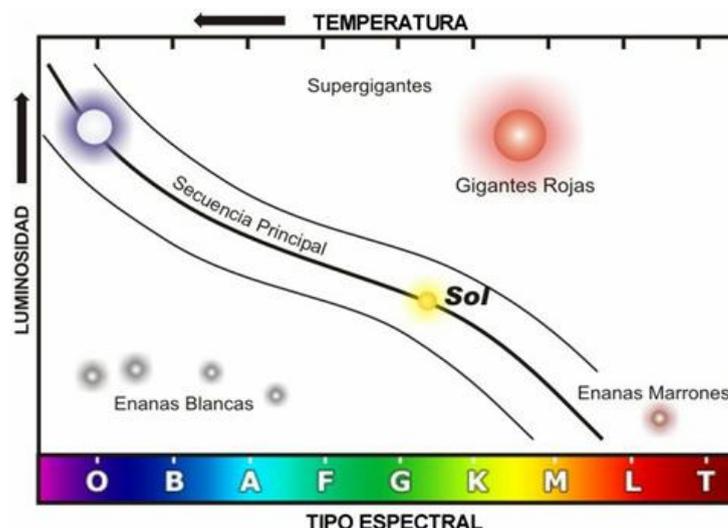


Figura 4: Diagrama HR. Imagen tomada de [astronoma.julieta.blogspot.mx/2012/?m=0](http://astronoma.julieta.blogspot.mx/2012/?m=0)



Figura 5: proto-NP PGC 3074547 mejor conocida como nebulosa del Boomerang. Imagen tomada de [www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/](http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/)

## 1.4. Modelos de formación de nebulosas planetarias

Existen diversos modelos para explicar la formación estructural de las NP's así como sus microestructuras y flujos colimados.

### 1.4.1. Modelo Generalizado de Vientos Estelares Interactuantes

De acuerdo a Kwok, Purton y Fitzgerald en 1978, una NP es un cascaron relativamente denso, que se forma por la interacción de dos vientos: un viento lento ( $10\text{km s}^{-1}$ ) y denso ( $10^{-4}\text{M}_{\odot}\text{yr}^{-1}$ ), eyectado mientras la estrella está en la etapa evolutiva AGB (Rama Asintótica de las Gigantes), y un viento rápido ( $1000\text{km s}^{-1}$ ) y tenue ( $10^{-8}\text{M}_{\odot}\text{yr}^{-1}$ ) que surge por la presión de radiación de los fotones UV provenientes del núcleo estelar, una vez que se ha liberado de las capas externas de su superficie y avanza de la etapa AGB a la de enana blanca. Este modelo es conocido como el Modelo de Vientos Estelares Interactuantes y explica muy bien la formación de NP's esféricas. Por otra parte la morfología elíptica puede crearse a partir de un gradiente de densidad de forma toroidal generando una especie de elipsoide en lugar de una estructura completamente esférica. (Icke et al. 1989, Mellema y Frank 1995). A esta modificación del modelo de Kwok et al. (1978) se le conoce como el Modelo Generalizado de Vientos Estelares Interactuantes.



---

### 1.4.3. Chevalier y Luo (1994)

El modelo muestra que el viento magnetizado crea una burbuja hinchada que se expande arrastrando el material que hay en su camino, material que a su vez tiende a alinearse formando dos lóbulos debido a la compresión que crea el campo magnético intenso que sale de la estructura toroidal central (Chevalier y Luo 1994; García-Segura et al. 1999).

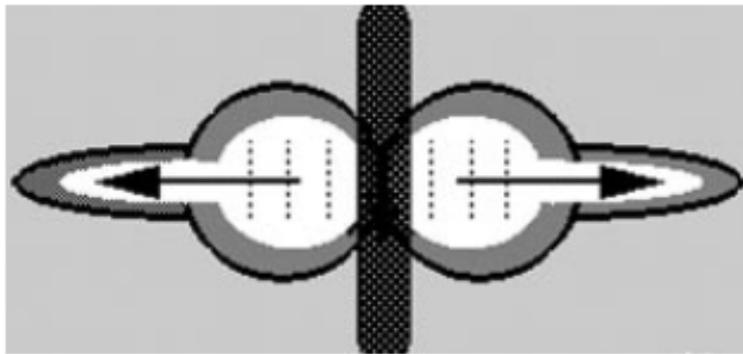


Figura 8: Modelo de Chevalier y Luo modificado por García Segura et al (Tomado de Balick y Frank, 2002)

### 1.4.4. Modelo de Cliffe (1996)

Este modelo se realizó con simulaciones numéricas de hidrodinámica tridimensional mostrando salidas de jets elípticos (estructura en forma de S) provocando que estos se lleven consigo el material causando dos estructuras globulares como se muestra en la figura 9, (Cliffe et al. 1996, Steffen y López 1998, Soker y Rapport 2001). Este es el caso de una NP bipolar con microestructuras con simetría puntual.

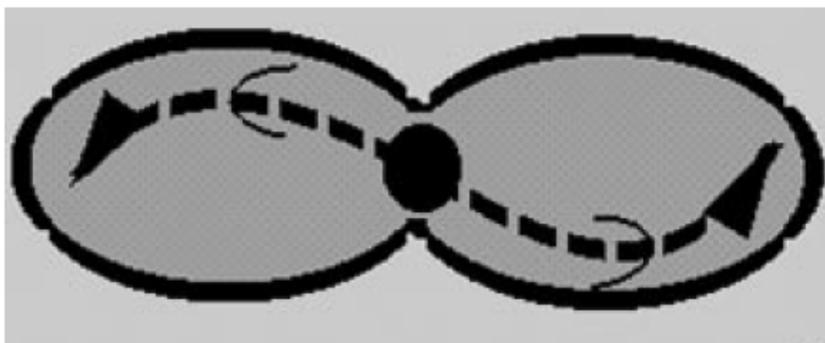


Figura 9: Modelo de Cliffe et al (Tomado de Balick y Frank, 2002)

---

### 1.4.5. Modelo de formación de NP a partir de una estrella binaria

La mayoría de las estrellas en el universo no están aisladas, muchas de ellas tienen una compañera formando sistemas binarios. Una de las teorías de formación de NP parte de un sistema binario en donde una de las estrellas se convierte en gigante roja y absorbe a su compañera. Ésta cae, poco a poco, en espiral expulsando material enriquecido. Así cuando la estrella masiva lanza sus capas al espacio la enana blanca empuja el gas y genera dos lóbulos creando la NP bipolar (Soker, 1998; Jones & Boffin, 2017).

En 1976 se encontró la primera NP con una binaria en el núcleo, Abell 63, pero no es sino hasta 30 años después que Mitchell et al. (2007) proponen que la producción de los lóbulos se debía a una binaria en su centro.

## 2. Marco teórico

Para estudiar la estructura morfocinemática de la NP utilizaremos algunos conceptos que se presentan a continuación.

### 2.1. Espectroscopía

Se define a la espectroscopía como el conjunto de métodos y conocimientos empleados para el estudio de los espectros provenientes de la radiación de los objetos. El espectro de un objeto no es más que la energía que emite mediante radiación electromagnética en diversas longitudes de onda, energía que es cuantificada mediante la ecuación:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Con  $h$  como la constante de Planck,  $\nu$  la frecuencia de la luz,  $c$  la velocidad de la luz y  $\lambda$  la longitud de onda.

La ecuación anterior nos permite identificar a cuál energía se emite radiación. Es decir, imaginemos que tenemos un átomo de hidrógeno. Al hacerle incidir energía electromagnética (un fotón) es posible ionizarlo, cuando este átomo recaptura un electrón libera energía electromagnética que puede tener cualquier valor. Cuando esto sucede, se emite radiación electromagnética que puede tener cualquier valor. Sin embargo, una vez atrapado en algún nivel  $E_2$ , existe la probabilidad de que decaiga espontáneamente a un nivel inferior  $E_1$ , al pasar dicho proceso se emite en una radiación electromagnética característica. En otras palabras cada átomo o molécula captura y libera energía que ayuda a caracterizar el material del cual estamos hablando, esto matemáticamente puede expresarse como:

$$E = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Con  $E_1$  y  $E_2$  como la energía que tiene el electrón en cada estado.

Si hacemos incidir radiación electromagnética con una  $E > \Delta E$ , los átomos pasan de su estado base a un estado excitado. Cuando sus electrones caen espontáneamente o de forma inducida, liberan energía que para átomos sencillos corresponde principalmente a energía del espectro visible mientras que para moléculas corresponde generalmente a infrarrojo o frecuencias aún más bajas.

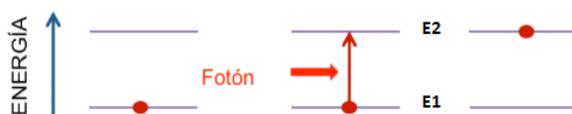


Figura 10: Proceso de absorción, en el cual el electrón sube a un nivel superior al ser excitado por un fotón

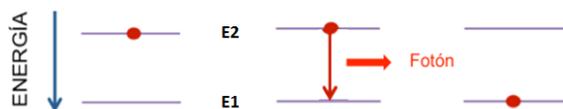


Figura 11: Proceso de emisión, en el cual el electrón decae a un nivel de energía más bajo y libera un fotón

Para este estudio restringiremos el espectro electromagnético a la parte visible que corresponde a las longitudes de onda que van desde  $380 \text{ \AA} < \lambda < 780 \text{ \AA}$ .

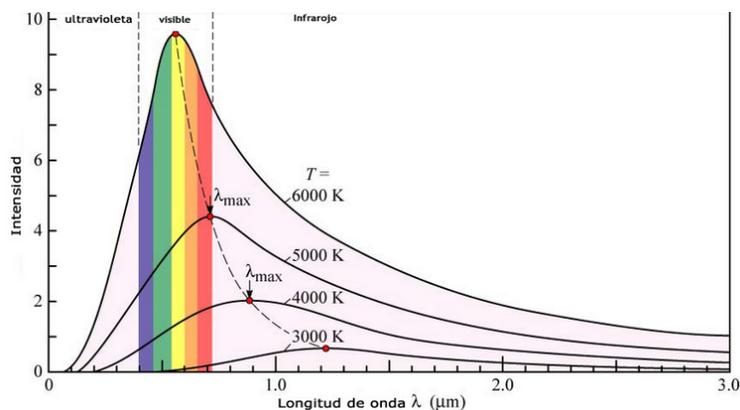


Figura 12: Espectro visible en diferentes cuerpos negros. Imagen tomada de [www.quimicafisica.com/radiacion-cuerpo-negro-hipotesis-planck.html](http://www.quimicafisica.com/radiacion-cuerpo-negro-hipotesis-planck.html)

---

Para el estudio de la luz en este intervalo será necesario un dispositivo llamado espectrógrafo, el cuál a través de un prisma o una rejilla de difracción, dispersa la luz en sus diferentes longitudes de onda, permitiendo el análisis de éstas líneas.

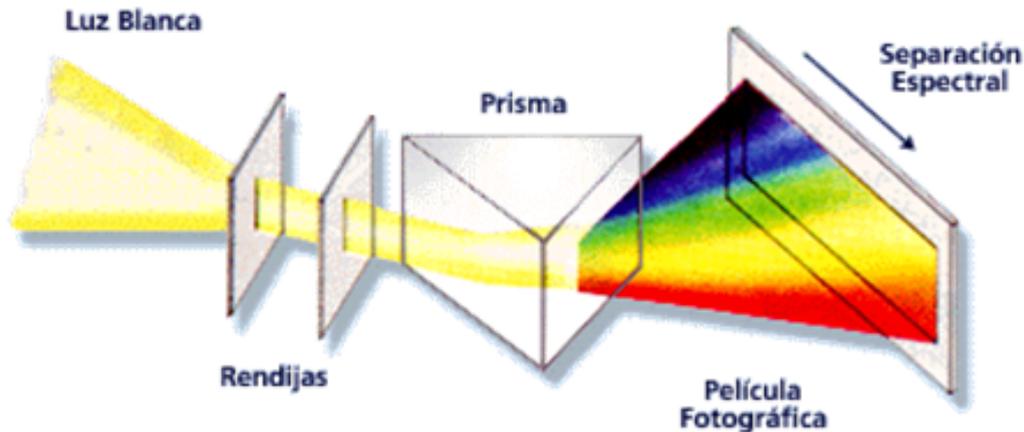


Figura 13: Obtención de espectros mediante rendijas y prismas. Imagen tomada de demostraciondeprincipiosfisicosfd.blogspot.mx

### 2.1.1. Resolución espectral

La pureza espectral se define como  $\delta\lambda$  y es la medida de la anchura de la luz monocromática (*FWHM*, del inglés *Full Width at Half Maximum*) que se obtiene en el espectrógrafo. Puesto que en una sola línea ancha puede haber dos líneas delgadas el criterio de Rayleigh se encarga de separar dichas líneas en dos o más. Tomando en cuenta que:

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{d} \quad (3)$$

Con  $\theta$  como el ángulo de resolución angular,  $d$  el diámetro de nuestro telescopio y  $\lambda$  la longitud de onda.

Si dos líneas espectrales están separadas con  $\Delta\lambda \geq \delta\lambda$  los podremos distinguir como dos características diferentes, mientras que si  $\Delta\lambda < \delta\lambda$ , veremos sólo una línea espectral (ver Figura 14).

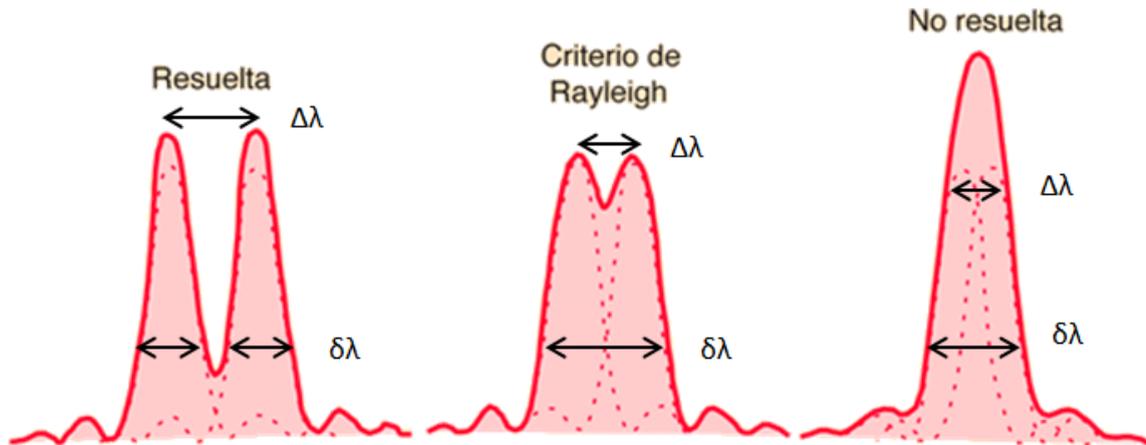


Figura 14: Resolución espectral y criterio de Rayleigh. Imagen adaptada de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/Raylei.html>

## 2.2. Cinemática

### 2.2.1. Velocidades supersónicas

La rapidez se define como la magnitud de la velocidad la cual es un vector que indica la tasa de cambio del vector de posición (desplazamiento) con el tiempo

$$v = d/t \quad (4)$$

en donde en el sistema internacional de unidades el desplazamiento ( $d$ ) se mide en metros y el tiempo ( $t$ ) en segundos.

En las NP's las velocidades a las que se expande el gas son supersónicas, es decir velocidades superiores a las del sonido en ese medio. Esta velocidad se refiere a la de las ondas sonoras en un medio dado, por ejemplo, en la atmósfera terrestre a 15 °C con una humedad del 50% y una atmósfera de presión, la velocidad del sonido es  $343 \text{ m s}^{-1}$ . Mientras que a la misma temperatura en el agua, la velocidad aumenta a  $1600 \text{ m s}^{-1}$ , es decir mientras el medio es más denso la velocidad también aumenta así también aumenta mientras el medio tiene mayor temperatura, aproximadamente  $0.6 \text{ m s}^{-1}$  por cada grado centígrado. Para el caso del medio interestelar, la velocidad del sonido es del orden de  $10 \text{ km s}^{-1}$ .

La velocidad del sonido se usa como referencia para compararla con otras velocidades, a esta referencia se le conoce como número Mach ( $M$ ), dicho valor se define como:

---


$$M = v/v_s \quad (5)$$

Donde  $M$  es el número Mach,  $v$  es la magnitud de velocidad de nuestro objeto y  $v_s$  es la magnitud de la velocidad del sonido en un medio dado.

Así  $M = 1$  equivale a que el objeto emisor se mueve a la velocidad del sonido y  $M = 2$  a dos veces la velocidad del sonido. Por ejemplo se define como subsónico si  $M < 0.7$ , transónico si  $0.7 < M < 1.2$ , supersónico cuando  $1.2 < M < 5$  e hipersónico para  $M > 5$ . (Becker, J. 1980)

### 2.2.2. Efecto del viento estelar sobre el gas interestelar

Dos conceptos importantes son la densidad y el momento lineal. La densidad representada por la letra griega  $\rho$  es la cantidad de materia que ocupa un volumen dado y, viene dado por la expresión:

$$\rho = m/V \quad (6)$$

en donde  $m$  es la masa y  $V$  el volumen.

Mientras que la magnitud del momento lineal se expresa por la masa multiplicada por la velocidad de nuestra partícula:

$$p = mv \quad (7)$$

Al flujo de partículas como protones, electrones, neutrones, iones, etc., que es expulsado por una estrella se le conoce como viento estelar; el mecanismo que lo produce involucra la conversión de momento del gas por algún proceso de absorción. La velocidad de dichas partículas es aproximadamente  $V_* \approx 2000 \text{ km s}^{-1}$  y la masa que se pierde por dicho proceso  $\dot{M}_* \approx 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$  por lo que su energía mecánica es  $\dot{E}_* = \frac{1}{2} \dot{M}_* V_*^2$ . Por otro lado, la tasa de fotones UV es  $10^{49} \text{ s}^{-1}$  y su energía radiativa suele salir a una tasa de  $10^{31} \text{ J/s}$ .

Si suponemos que la estrella está rodeada por una nube de gas ionizado, se produce un patrón de flujo. El viento empuja al gas interestelar cuya velocidad es inicialmente supersónica, con  $c_i \approx 10 \text{ km s}^{-1}$ , lo cual forma una onda de choque en el material pues el viento se frena convirtiendo su energía cinética en térmica por lo que desacelera y a su vez se forma una segunda onda de choque generando un patrón de flujo.

Existen diversos tipos de choques que pueden obtenerse debido al viento estelar, estos pueden ser adiabáticos o radiativos. En el primero se sabe que no se intercambia calor con su entorno, es decir la velocidad del gas genera una onda de choque cuyas velocidades

son aproximadas a los 200 km/s por lo que el tiempo de enfriamiento es mayor que el dinámico. Por otro lado, en el choque radiativo, el gas comienza a enfriarse radiando en las zonas de relajamiento, se dice que en un choque radiativo es isotérmico si la temperatura final es igual a la temperatura inicial.

Cuando un viento lento choca con uno rápido, se crea un patrón de flujo como el de la Fig. 15. En dicho patrón distinguimos 4 regiones: (a) viento rápido no chocado, (b) viento rápido chocado, (c) viento lento chocado y (d) viento lento no chocado.

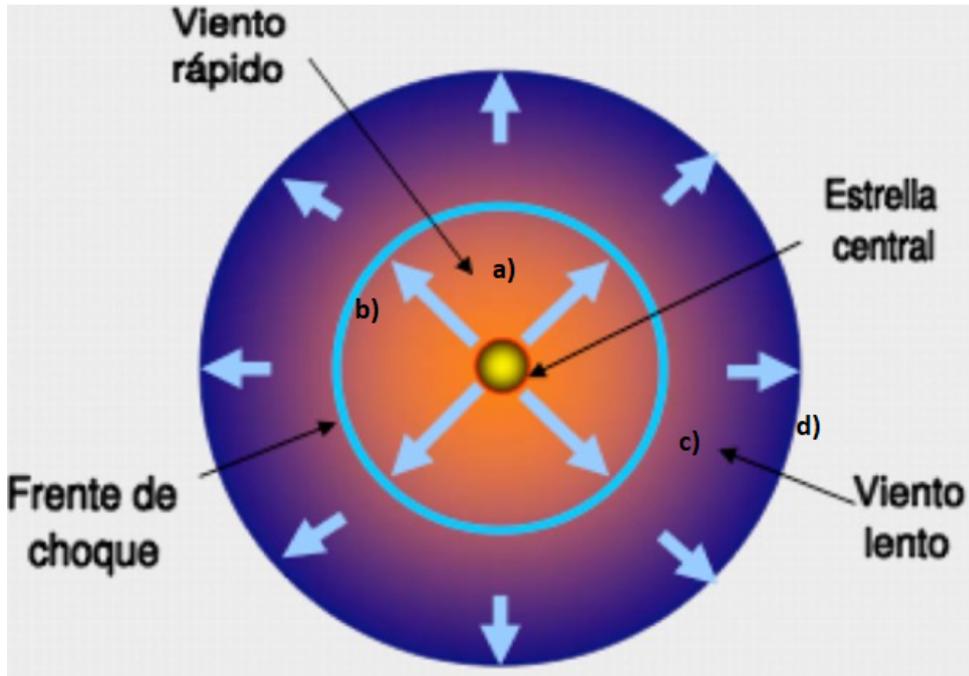


Figura 15: Patrón que genera el choque de los vientos (Tomado de Blanco, 2006)

Para analizar un frente de choque en una NP, supongamos que a los lados del mismo tenemos dos zonas donde la primera zona si contiene el gas no chocado y la segunda el gas chocado. Uno será frenado y el otro acelerado, de tal manera que se cumplan las siguientes leyes de conservación:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (8)$$

$$p_2 - p_1 = \rho_2 v_2^2 - \rho_1 v_1^2 \quad (9)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 \quad (10)$$

---

Con  $\rho$  como la densidad,  $v$  la velocidad,  $p$  el momento lineal y  $h$  la entalpía la cual se define como:

$$h = C_p T = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho R} = \frac{\gamma p}{(\gamma - 1)\rho} \quad (11)$$

Que no es otra cosa más que la energía que el sistema intercambia con su entorno.

Con  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Donde  $C_p$  es la constante de calor específico del gas a presión constante y  $C_v$  a volumen constante.

Las ecuaciones 8, 9, 10 y 11 son conocidas como ecuaciones de conservación la masa, momento y energía respectivamente (Kundu,1990).

Si se manipulan las ecuaciones de conservación se obtiene las condiciones de salto que contienen las propiedades del gas antes y después del choque, dichas ecuaciones son conocidas como condiciones de Rankine-Hugoniot:

Para la presión

$$\frac{p_1}{p_2} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1) \quad (12)$$

Para la densidad

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2} \quad (13)$$

Para la velocidad

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}{(\gamma + 1)M_1^2} \quad (14)$$

Para la temperatura

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{2(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2} \frac{\gamma M_1^2 + 1}{M_1^2} (M_1^2 - 1) \quad (15)$$

Donde  $M$  es el número Mach.

### 2.2.3. Efecto Doppler

Para obtener la cinemática de la NP será necesario trabajar con la longitud de onda de una línea espectral obtenida a lo largo de nuestra rendija. La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia que separa, por ejemplo, dos crestas seguidas de nuestra onda de luz.

---

Conociendo con precisión las diversas posiciones en longitud de onda de la línea espectral en diversas zonas de la rendija, es posible obtener la dispersión de la luz proveniente del movimiento del objeto. Dicha dispersión está relacionada con la velocidad observada de nuestro objeto mediante el efecto Doppler. Así, para un objeto emisor de ondas, la frecuencia de las mismas se ve alterada de tal forma que:

$$f = f_0 \frac{v \pm v_r}{v \pm v_s} \quad (16)$$

En donde  $f$  es la frecuencia medida,  $f_0$  es la frecuencia emitida,  $v$  la velocidad de la onda,  $v_r$  la velocidad del receptor y  $v_s$  la velocidad de la fuente.

Para nuestro caso  $v = c$ ,  $v_r = 0$   $v_s = v$ , por lo que, finalmente

$$f = f_0 \frac{c}{c \pm v_s} \quad (17)$$

Y como sabemos,  $c = \lambda_0 f_0$ , entonces:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \frac{c}{c \pm v_s} \quad (18)$$

Si agrupamos términos, tendremos:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \pm \frac{v_0}{c} \quad (19)$$

Para finalmente expresar el resultado como:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \pm \frac{v_0}{c} \quad (20)$$

Así, si  $\Delta\lambda$  es positivo implica que el espectro de la nebulosa tiene un corrimiento al rojo, es decir se aleja de nosotros. Por el contrario si el signo es negativo las regiones se acercan y sus líneas espectrales se corren al azul.

Hay que tener en cuenta que nuestro planeta está en movimiento, la Tierra rota sobre su eje y también sobre el centro de masas Tierra-Luna, además de movernos mientras orbitamos al Sol. Al mismo tiempo nuestra estrella se mueve por la galaxia. Por otro lado el Sistema Solar se mueve junto con su vecindario solar a través de la galaxia. Por lo que si suponemos que nuestro sistema solar se encuentra en reposo el objeto observado tiene una velocidad respecto a nosotros además de su cinemática interna, restando nuestra velocidad a la del objeto se obtiene la velocidad que tiene el objeto celeste respecto a nuestro Sol

---

( $v_{\text{HEL}}$ ). Mientras que el mismo movimiento pero respecto a nuestro vecindario solar se le denomina velocidad del estándar local de reposo o en inglés Local Standard of Rest ( $v_{\text{LSR}}$ ).

#### 2.2.4. Velocidad sistémica

La velocidad observada puede calcularse fácilmente utilizando el efecto doppler, quedando finalmente:

$$v_o = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{lab}}} = c \frac{\lambda - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}} \quad (21)$$

Donde  $\lambda_{\text{lab}}$  es la longitud de onda de la transición observada obtenida en los laboratorios en Tierra.

La velocidad sistémica es la velocidad observada de nuestro objeto como si fuera un todo, se obtiene a partir de las rendijas que pasan justo por el centro de nuestra NP. Si la dispersión es suficiente para distinguir dos componentes<sup>1</sup> ( $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ ) se utiliza un promedio de las dos para obtener la longitud de onda equivalente de todo el objeto. Para ello es necesario obtener dos longitudes de onda con base a nuestra dispersión y con ello sacar un promedio es decir:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (22)$$

Dicha  $\lambda_0$  es la velocidad de nuestro sistema, obteniendo finalmente una velocidad sistémica observada:

$$v_o = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{lab}}} = c \frac{\lambda_0 - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}} \quad (23)$$

### 2.3. Tamaño y distancia a los objetos celestes

#### 2.3.1. Tamaño

El tamaño físico de un objeto celeste se obtiene cuando se conocen el tamaño angular que sustenta en el plano del cielo y la distancia a la Tierra el cual se calcula de la siguiente manera.

---

<sup>1</sup>Si no se distinguen las dos componentes se puede usar el pico máximo, pero es posible que este valor no sea del todo correcto si la emisión en ambas componentes no es similar (Vázquez et al. 2015).

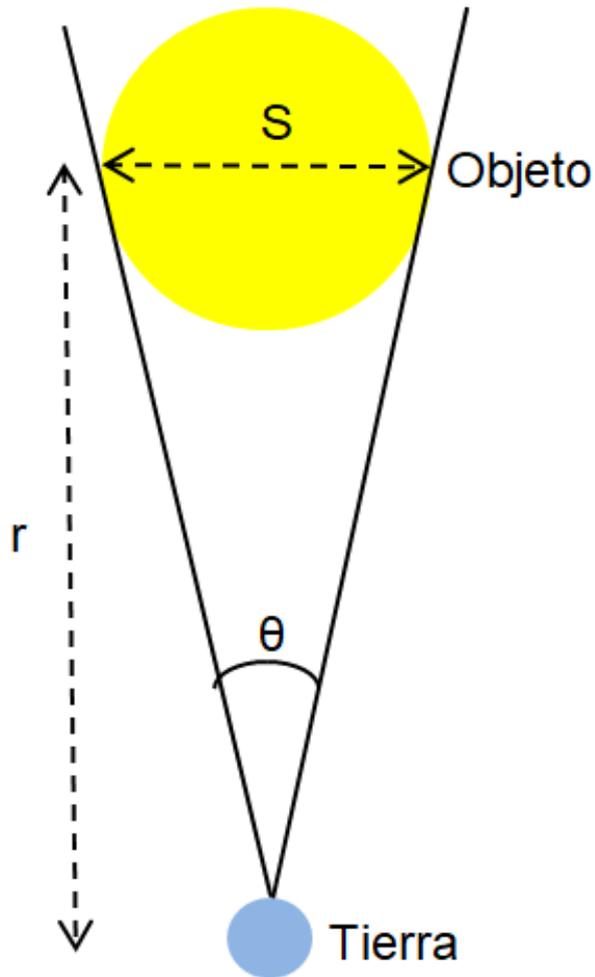


Figura 16: Tamaño angular

Donde

$$s = r\theta \tag{24}$$

El tamaño angular ( $\theta$ ) puede obtenerse de manera sencilla midiéndolo sobre mapas calibrados, ya sea obtenidos del telescopio o de las bases de datos y observatorios virtuales. También resultan útiles diversos programas especializados en astronomía para analizar imágenes astronómicas, en nuestro caso DS9.

### 2.3.2. Paralaje

Una de las técnicas más utilizadas para obtener distancias a estrellas cercanas es la paralaje, el desplazamiento angular del objeto respecto a las estrellas de fondo cuando la Tierra está en lados opuestos de su órbita, es decir cuando se hacen dos mediciones con 6 meses de diferencia.

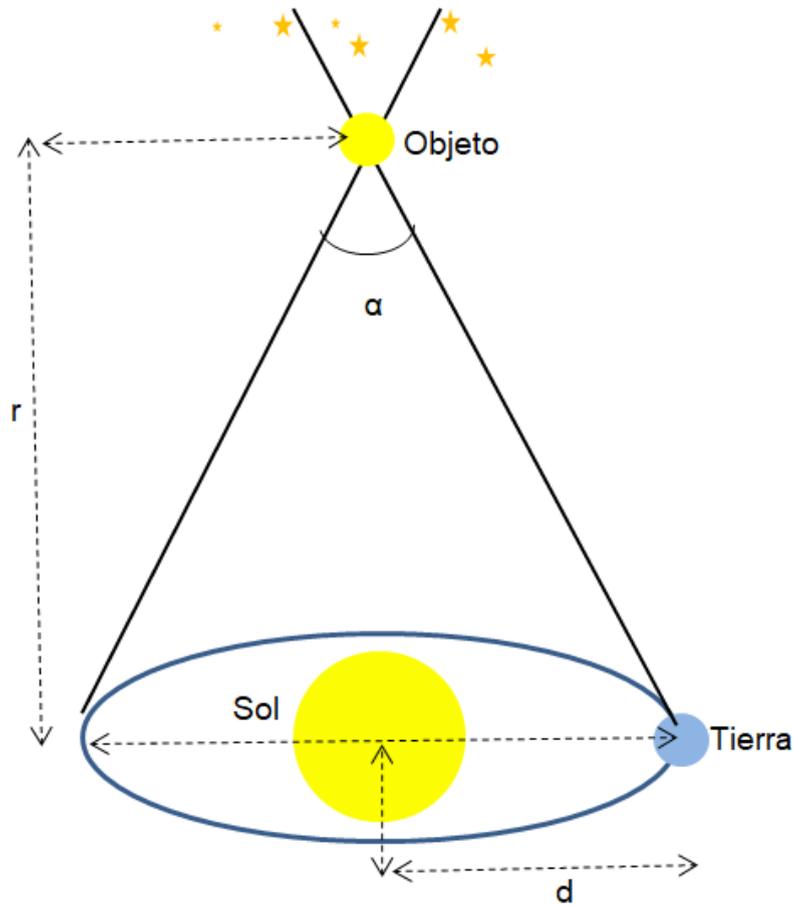


Figura 17: Paralaje

Sabemos que  $d$  es igual a una unidad astronómica por lo que cambiando variables de la ecuación 25 y despejando tenemos

$$r = \frac{s}{\theta} = \frac{2d}{\alpha} \quad (25)$$

En este caso  $\alpha$  se obtuvo mediante mediciones del satélite espacial GAIA.

---

## 2.4. Edad cinemática de una Nebulosa Planetaria

Al tiempo que ha pasado desde que comenzó la expansión de la NP hasta la fecha se le define como edad cinemática. Este valor puede estimarse conociendo la velocidad de expansión, el tamaño angular de nuestro objeto y la distancia del mismo, además de considerar a primera aproximación una velocidad constante (Guillén, et al. 2013).

$$\tau[yr s] = \beta \frac{\theta[\text{arcsec}]d[\text{kpc}]}{v[\text{km s}^{-1}]} \quad (26)$$

Donde  $\beta$  es un factor de conversión de unidades cuyo valor es 4744.

## 3. Metodología

### 3.1. Instrumentación

Las observaciones fueron realizadas en del Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir (OAN-SPM) utilizando el telescopio de 2.1 m y el espectrógrafo Manchester Echelle Spectrograph (MEZCAL).



Figura 18: Observatorio Astronómico Nacional (OAN).  
Fotografía tomada de [www.astrossp.unam.mx/indexspm2011.html](http://www.astrossp.unam.mx/indexspm2011.html)

---

### 3.1.1. Telescopio 2.1 m

El telescopio de 2.1 m del OAN-SPM fue construido por la UNAM en 1974 e inaugurado en 1979. Tiene un diseño tipo Ritchey-Chretien y una relación focal de  $f/7.5$ . El lugar es considerado el observatorio más importante en México debido a las condiciones meteorológicas de la zona, y se encuentra los cuatro mejores sitios para realizar observaciones astronómicas del mundo.



Figura 19: Telescopio de 2.1 m del OAN. Cortesía del M.C. Francisco Guillén

---

### 3.1.2. Manchester Echelle Spectrograph

El MEZCAL es uno de los espectrógrafos que utiliza el telescopio de 2.1 m, fue diseñado principalmente para estudiar fuentes extendidas en intervalos muy cortos en longitud de onda pero con alta resolución espectral (Meaburn et al, 2003). Cuenta con dos sistemas ópticos (dobletes) que enfocan la luz que viene del telescopio a la rejilla, para que después de ser dispersada llegue al detector CCD correspondiente. Cuenta con un diámetro del haz de 10 cm, longitud focal de 80 cm y un ángulo de separación entre los eje ópticos de entrada y salida =  $3.3^\circ$ . El rallado de su rejilla de difracción es de 31.6 líneas/mm, teniendo un ángulo de blaze (incidencia) de  $63.43^\circ$ , contando además con diversos filtros de interferencia. En el caso de este trabajo se utilizaron los filtros para  $\lambda 6575\text{\AA}$  con un ancho de banda de  $\Delta\lambda = 90\text{\AA}$  que incluye las líneas de emisión de  $H\alpha$   $\lambda 6563\text{\AA}$  + [N II] $\lambda\lambda 6548, 6585\text{\AA}$  y otro centrado en  $\lambda 5020\text{\AA}$  con un ancho de banda de  $\Delta\lambda = 60\text{\AA}$  que incluye la línea espectral del [O III]  $\lambda 5007\text{\AA}$



Figura 20: Espectrógrafo MEZCAL. Cortesía del Dr. Roberto Vázquez

### 3.1.3. CCD's

Los dispositivos de carga acoplada (CCD's por sus siglas en inglés), consisten en un circuito integrado con cierto número de condensadores enlazados. Los detectores son celdas fotovoltaicas que utilizan el efecto fotoeléctrico. Al detectar luz generan corriente de manera lineal, es decir, la cantidad de carga generada es proporcional a la cantidad de luz recibida, creando así una baja perdida de información. Cada condensador transfiere carga eléctrica a otros condensadores que están a su lado en el circuito, generando así ruido eléctrico. Dicha variación eléctrica puede estar presente a diversas temperaturas o se va

generando con el uso de los detectores, sin embargo al exponerlo a luz de un objeto celeste la variación de carga recibida es diferente creando así nuestra imagen. Los parámetros de los detectores usados en este trabajo se muestran en la Tabla 1.

Detector CCD	Tamaño	Escala (micras/pixel)	Ganancia (e/ADU)	Ruido
Thomson	2048 x 2048	13.5	2.07	6.67
Marconi 2	2048 x 2048	13.5	2.2	6.1

Tabla 1: Parámetros del detector Thomson y Marconi 2

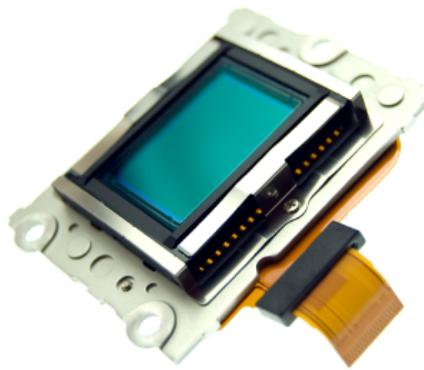


Figura 21: Detector CCD. Imagen tomada de [www.digitalfotored.com/imagendigital/sensor](http://www.digitalfotored.com/imagendigital/sensor)

### 3.2. Observaciones

Las observaciones corresponden a cuatro temporadas realizadas usando el telescopio de 2.1 m OAN-SPM. La primera del 10 al 13 de diciembre del 2010, cuyos datos fueron tomados por la Dra. Laurance Sabin y los M.C. Francisco Guillén y la M.C. Hortensia Riesgo, con el detector Thompson. (ver características en la Tabla 1)

Los datos de la segunda temporada fueron capturados por el Dr. Roberto Vázquez Meza durante el 15 al 17 de febrero del 2011. La temporada siguiente correspondió al 9 octubre del 2014, nuevamente por el Dr. Roberto Vázquez, el M.C. Marco Gómez, la M.C. Alba Aller y la Dra Mónica Blanco. Por último, los datos finales fueron capturados del 3 al 5 de febrero del 2015 por el Dr. Roberto Vázquez y el M.C. Marco Gómez. Todos los datos se tomaron con el espectrógrafo Manchester Echelle Spectrograph (MEZCAL). Las últimas tres temporadas fueron captadas con el detector Marconi.

---

### 3.2.1. BIAS

Una de los primeros archivos que debe de tomarse por cada noche de observación es el BIAS, el cual se define como el ruido interno que tienen los detectores, en este caso los CCD's. Esta imagen es un senso de; estado del ruido electrónico sin exponer el CCD a la luz. por lo que se le conoce como tiempo cero de integración. Dicha variación debería de permanecer constante con el tiempo, sin embargo es recomendable tomar imágenes como estas cada noche que se va a realizar una observación astronómica con la finalidad de quitar dicha señal de nuestros datos y minimizar los posibles errores en los resultados, motivo por el cual el detector se enfría con nitrógeno líquido para mantener el ruido bajo y constante.



Figura 22: Ejemplo de ruido de fondo tomado, BIAS

---

### 3.2.2. Espectros de comparación

Los espectros o arcos de comparación son los espectros tomados de las lámparas de referencia con gas de ThAr (torio y argón) que se utilizan en el observatorio, para identificar las líneas de emisión de una manera mucho más sencilla. La lámpara se enciende y el gas dentro de ella se ioniza produciendo luz que es pasada a través del espectrógrafo para que después el espectro de emisión sea captado por CCD. Los valores de las longitudes de onda de los espectros de comparación han sido previamente identificados en laboratorios. Para nuestro caso la más importante es  $\lambda_{\text{lab}} = 6583.5 \text{ \AA}$  correspondiente a una transición del nitrógeno ionizado [N II] medida en el laboratorio (Zhang y Liu, 2003).

A continuación se muestra un espectro calibrado es decir cuyas líneas de emisión están rectas y no tienen ninguna irregularidad

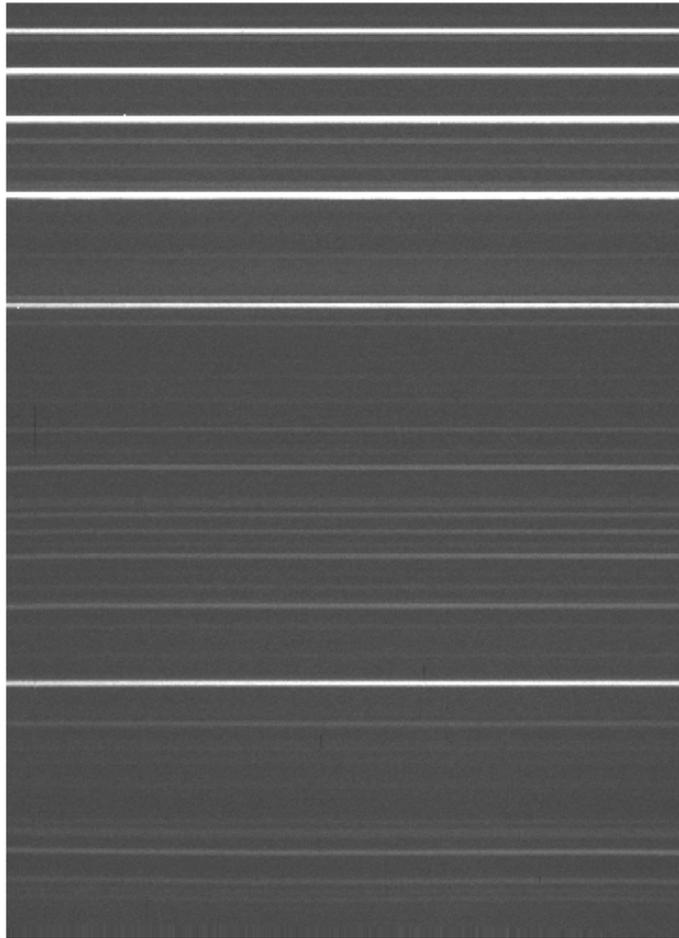


Figura 23: Espectros de comparación de  $H\alpha + [N II]$  calibrado

---

### 3.2.3. Imagen directa

Es importante identificar qué objeto se va a estudiar. Una vez decidido esto, es necesario capturar imágenes directas del mismo con la finalidad de identificar y posicionar completamente el objeto para proceder a captar los espectros. Por supuesto una imagen directa también puede ser útil al momento de reportar el trabajo realizado.

### 3.2.4. Imagen mas rendija

El espectrógrafo MEZCAL tiene un modo en el que se puede superponer la imagen del campo observado con la de la rendija. Esto se hace para identificar la posición de la rendija en donde se tomarán los espectros deseados, lo cual servirá también para el análisis morfocinemático.

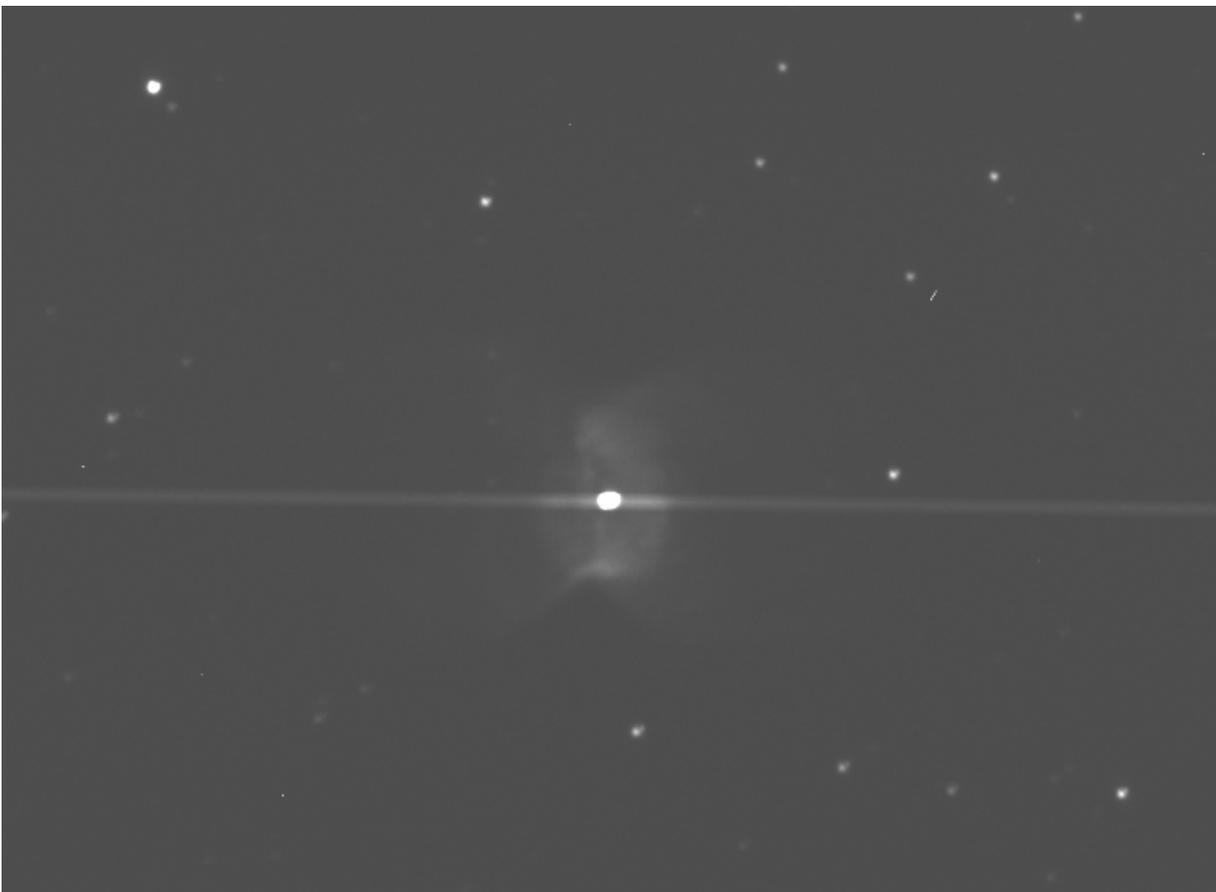


Figura 24: Imagen del NGC 2346 y rendija

---

### 3.2.5. Espectro

Es la imagen que dará lugar al espectro del objeto propiamente dicho, de la zona por la cual se hizo pasar la rendija, esta es la imagen más importante pues es con la cual se hará la interpretación de los datos. Los espectros necesarios para este estudio son de alta resolución.

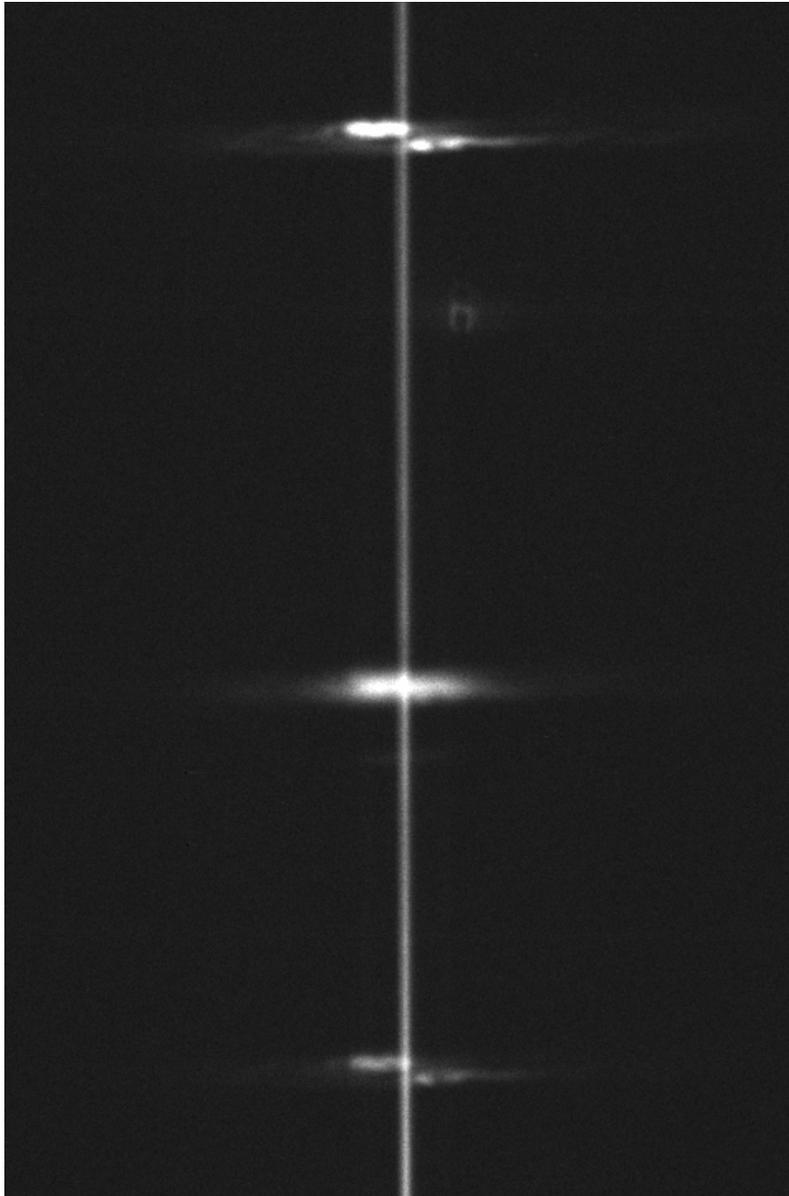


Figura 25: Espectro  $H\alpha$  + [NII] obtenido de NGC 2346

---

## 4. Resultados

### 4.1. El caso de NGC 2346

La nebulosa observada es NGC 2346 la cual se encuentra en la constelación de Monoceros (unicornio). Diversos estudios afirman que dentro de la nebulosa se encuentra una estrella binaria causante de la forma bipolar de la nebulosa (Walsh, 1983; Manchado et al. 2015). Se encuentra aproximadamente a 700 pc de distancia, su eje polar tiene una proyección respecto al plano del cielo de  $30^\circ$ , una longitud de 140 arcsec (Walsh, 1991).



Figura 26: NGC 2346 en espectro visible.  
Imagen tomada de [www.spacetelescope.org/images/opo9935d/](http://www.spacetelescope.org/images/opo9935d/)



Figura 27: NGC 2346 en infrarrojo. Tomado de [www.gemini.edu/node/12388](http://www.gemini.edu/node/12388)

## 4.2. Velocidad sistémica

La velocidad sistémica (ver sec. 2.2.4.) resultante de NGC 2346 respecto al Sol es  $v_{\text{HEL}} = 26 \text{ km s}^{-1}$  mientras que, la velocidad sistémica respecto a la vecindad solar (estándar local de reposo o Local Standar of Rest) es  $v_{\text{LSR}} = 9 \text{ km s}^{-1}$  con una incertidumbre de  $\pm 0.8 \text{ km s}^{-1}$ .

## 4.3. Diagramas Posición-Velocidad

Para cada espectro se obtuvo un diagrama P-V (Posición-Velocidad) con ayuda las rutinas de graficado Frame-Go-Tools Ver. 0.5 (Gómez et al. en preparación) basadas en Python.

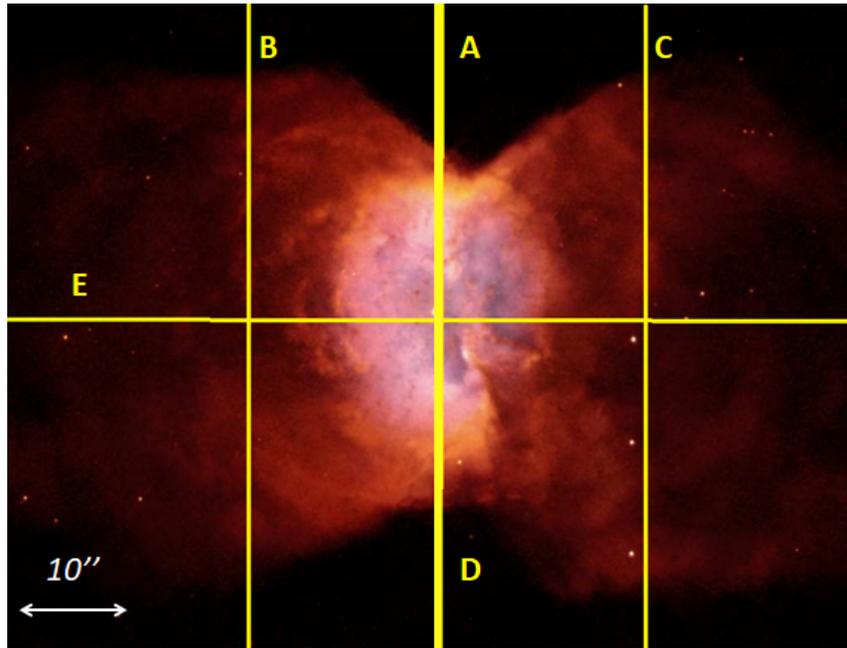


Figura 28: Posición de las rendijas correspondientes (con el norte hacia arriba) a la temporada de febrero del 2015

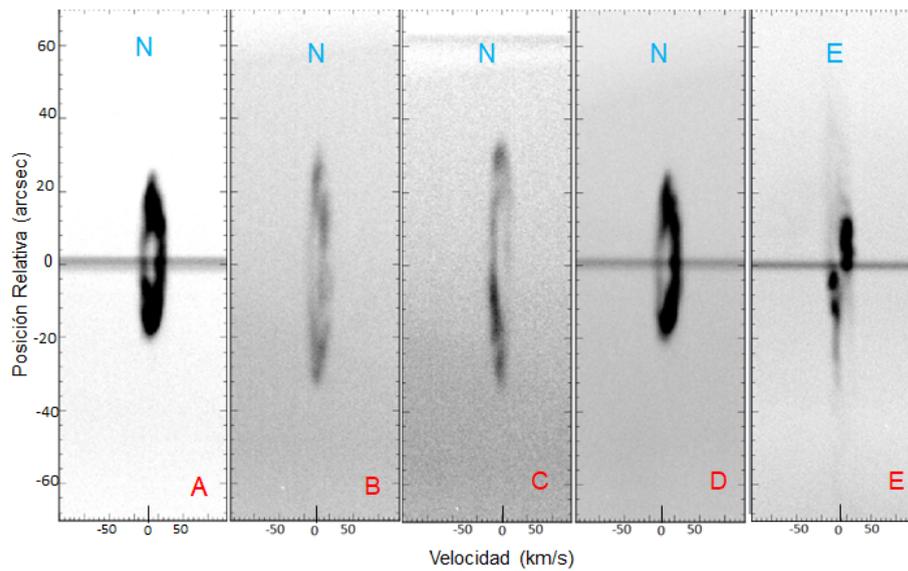


Figura 29: Diagramas P-V de las rendijas A,B,C y D

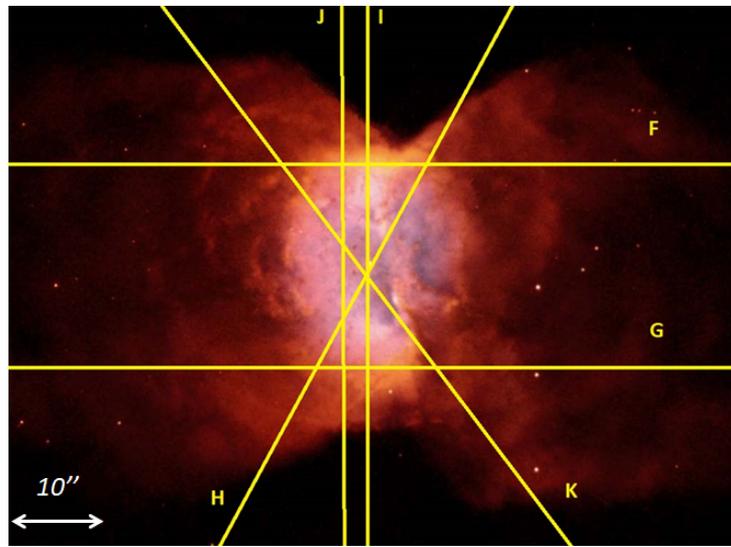


Figura 30: Posición de las rendijas (con el norte hacia arriba) correspondientes a la temporada de diciembre del 2010

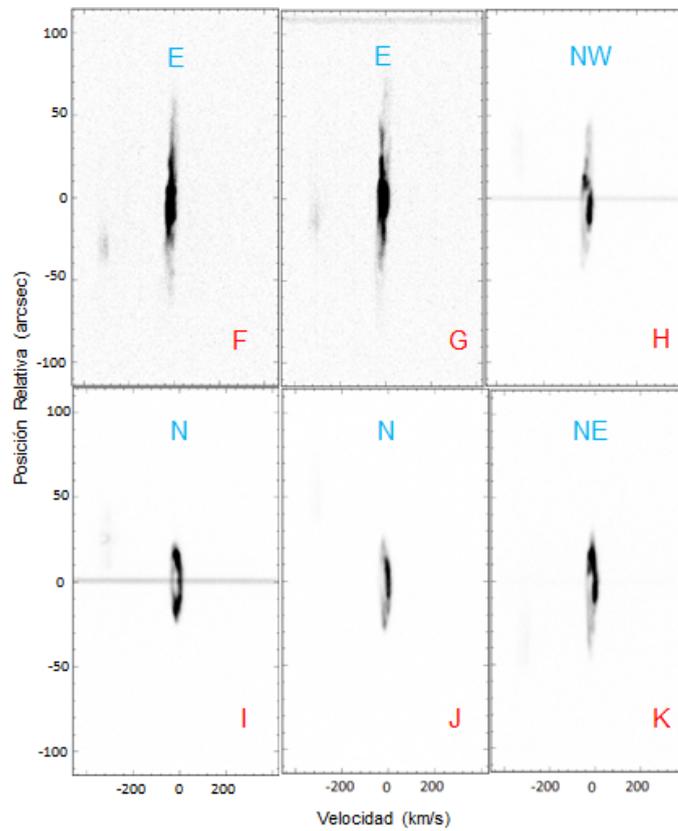


Figura 31: Diagramas P-V de las rendijas F,G,H,I,J y K

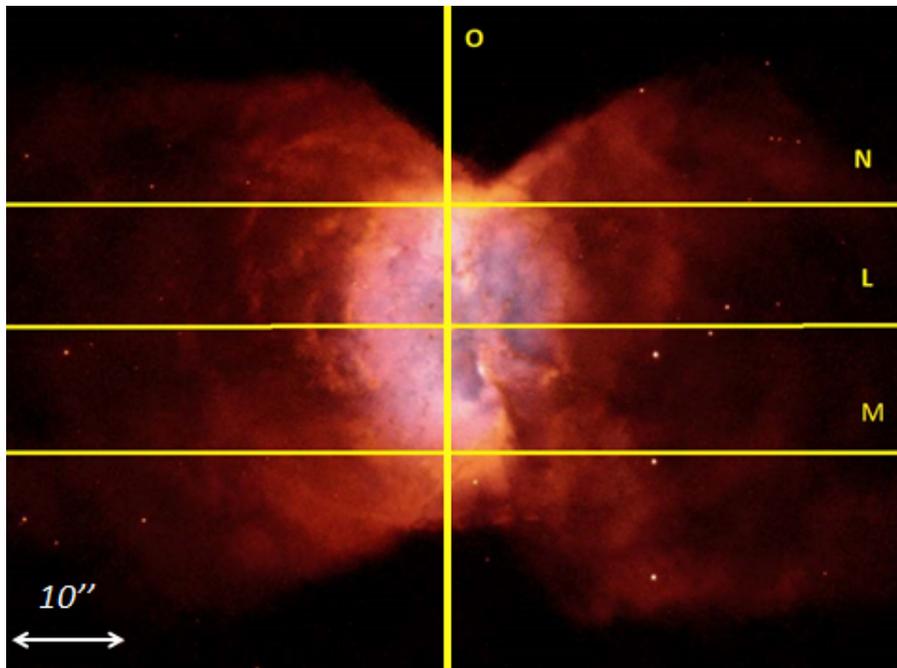


Figura 32: Las rendijas L, M y N corresponden a la temporada de febrero del 2011 y O a octubre del 2014, (imagen con el norte hacia arriba)

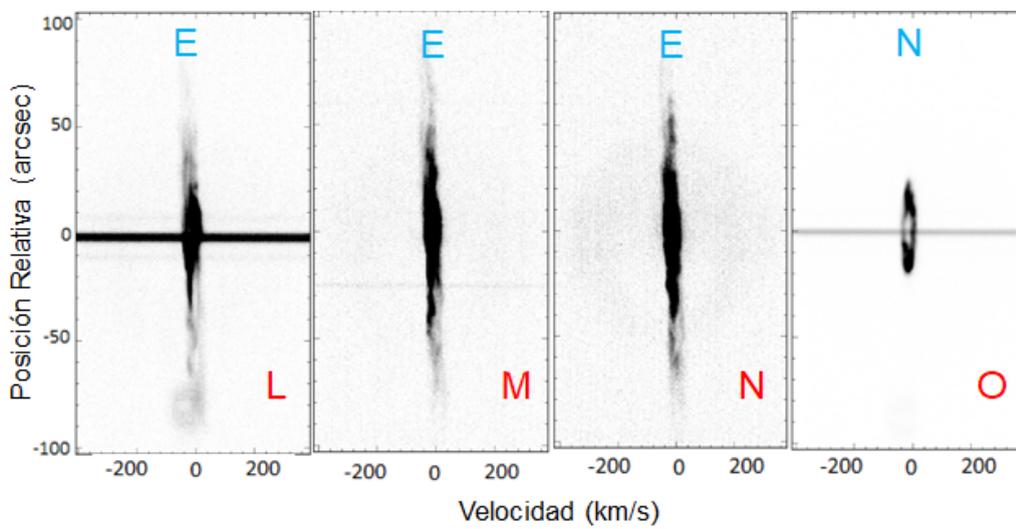


Figura 33: Diagramas P-V de las rendijas L, M, N, O

---

## 4.4. Estructura morfocinemática

Para obtener la morfología de NGC 2346 se utilizó el programa SHAPE en su versión 5, desarrollado por investigadores del Instituto de Astronomía y de la Universidad de Calgary (Steffen et al. 2011). Previamente a una imagen directa tomada por el telescopio espacial Hubble se le dibujaron rendijas con la finalidad de utilizarla como comparación en nuestro modelo. Dicha imagen sirve de guía para saber dónde colocar la rendija en el programa y así generar el modelo bipolar que se presenta a continuación.

El modelo propuesto está formado por una estructura bipolar (Fig 37, en naranja) con su eje casi perpendicular a la línea de visión además de un anillo (en amarillo) circunestelar.

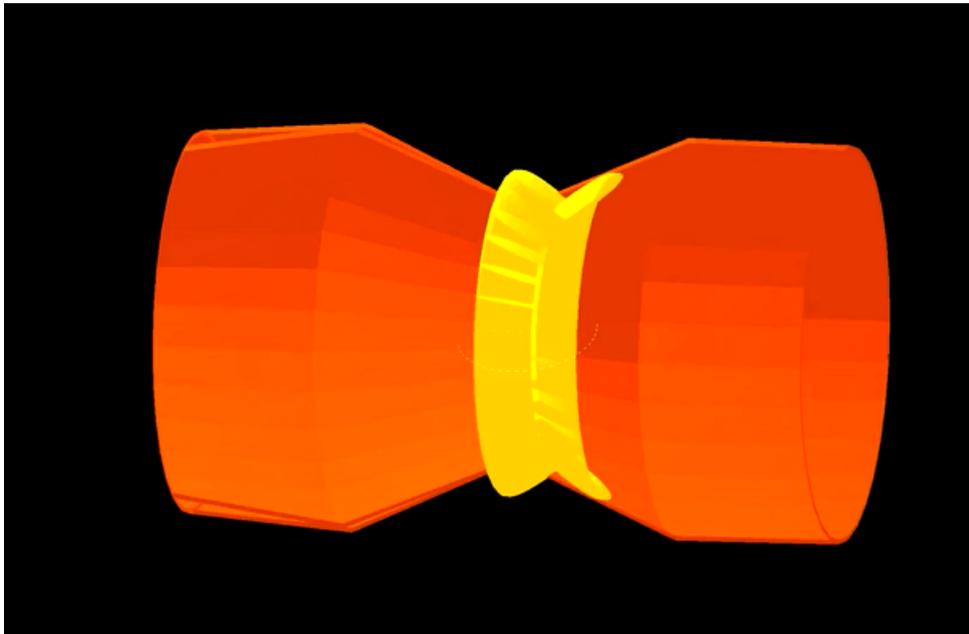


Figura 34: Modelo tridimensional creado con SHAPE

Tanto la estructura bipolar como el anillo se originan de cilindros a los que se les deformó la cintura con el modificador “*squeeze*”.

### 4.4.1. Modelado de los diagramas Posición-Velocidad

Los diagramas P-V obtenidos mediante el modelo tridimensional propuesto son los que se presentan en rojo y azul, dichos colores representan el corrimiento al rojo y al azul que sufre el gas que se expande, el color rojo implica que una zona dada se aleja de nuestra referencia mientras que el azul se acerca. El modelo se fue ajustando en velocidades,

inclinación y dimensión para hacerlo coincidir con las observaciones, tanto de imagen como de espectros.

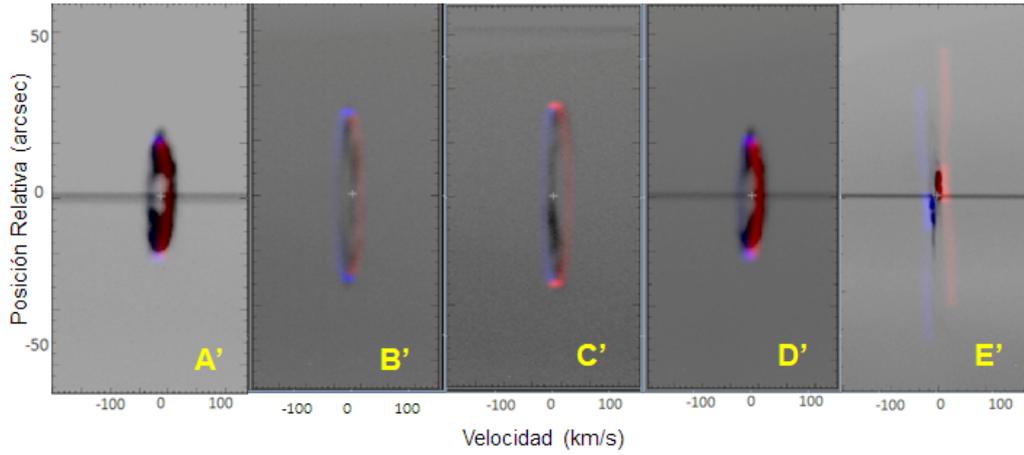


Figura 35: Diagramas P-V de las rendijas A, B, C, D y E

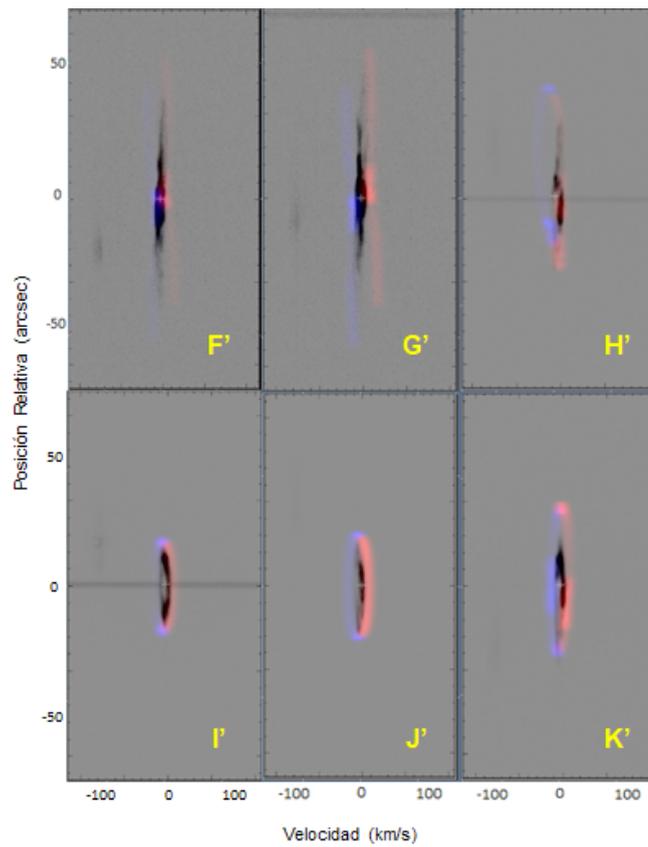


Figura 36: Diagramas P-V de las rendijas F, G, H, I, J y K

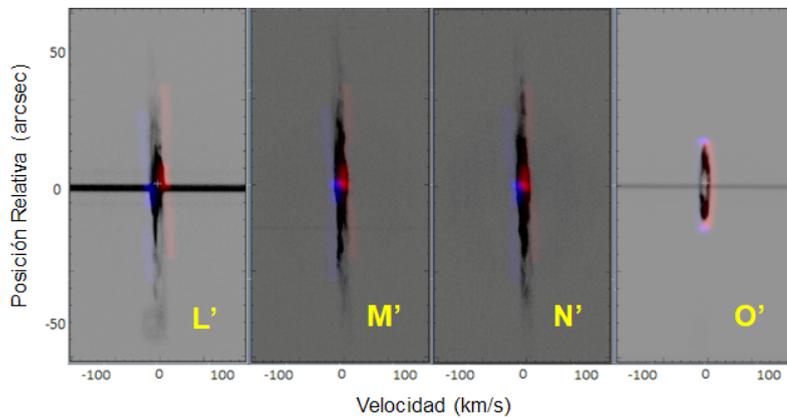


Figura 37: Diagramas P-V de las rendijas L, M, N, O

#### 4.5. Velocidad de expansión

Una vez que llegamos satisfactoriamente a un modelo que coincide en imagen y espectros con las observaciones, pasamos a determinar parámetros. Para obtener las velocidades de expansión de nuestra nebulosa se hizo pasar la rendija por varias partes de nuestro modelo para obtener diagramas nuevos diagramas P-V y obtener dichas velocidades ya deproyectadas.

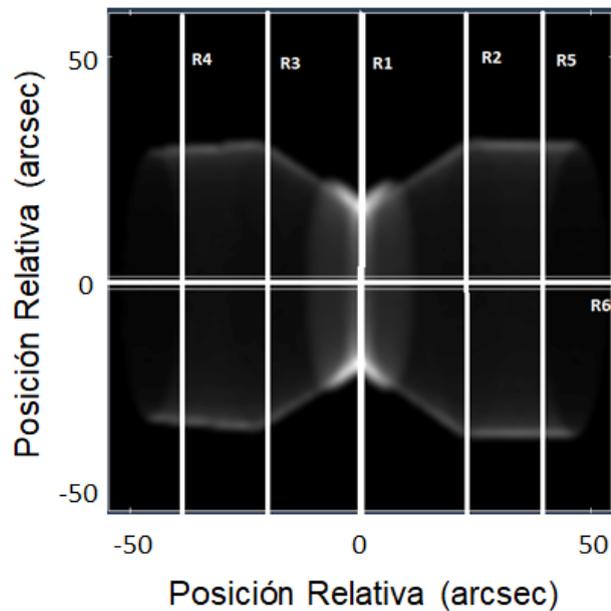


Figura 38: Modelo con el eje de la bipolar inclinado a  $90^\circ$  con respecto a la línea de visión en el cual se muestra la posición de las diversas rendijas

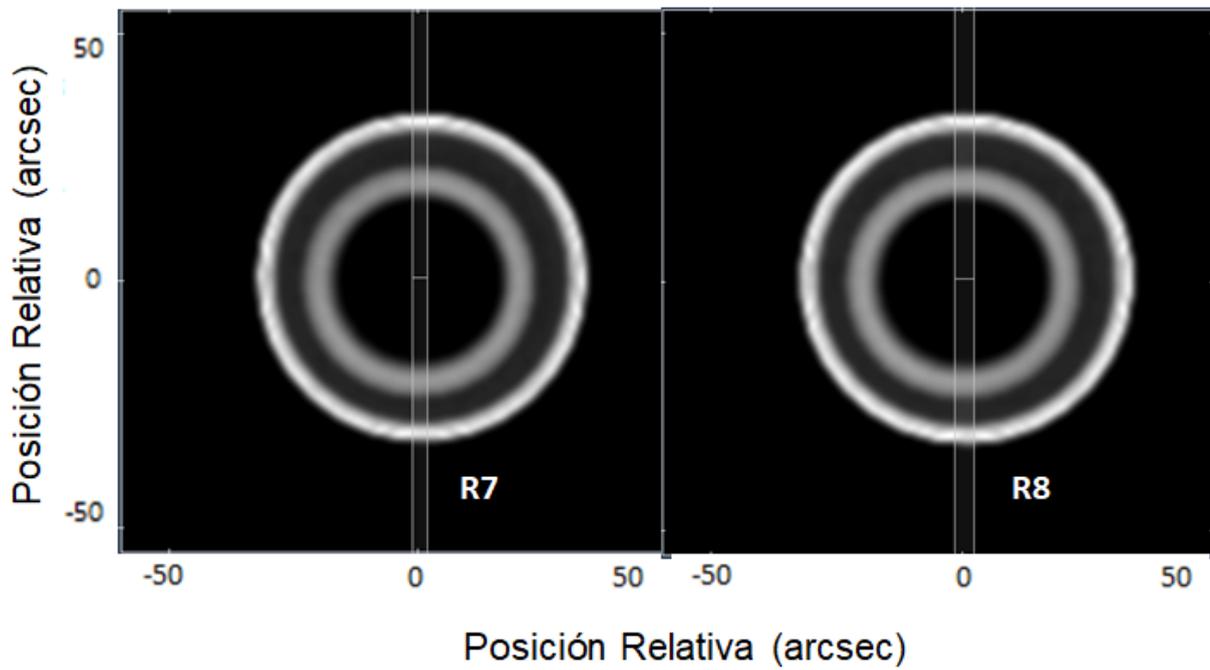


Figura 39: Rendijas transversales R7 corresponde al polo norte y R8 al sur

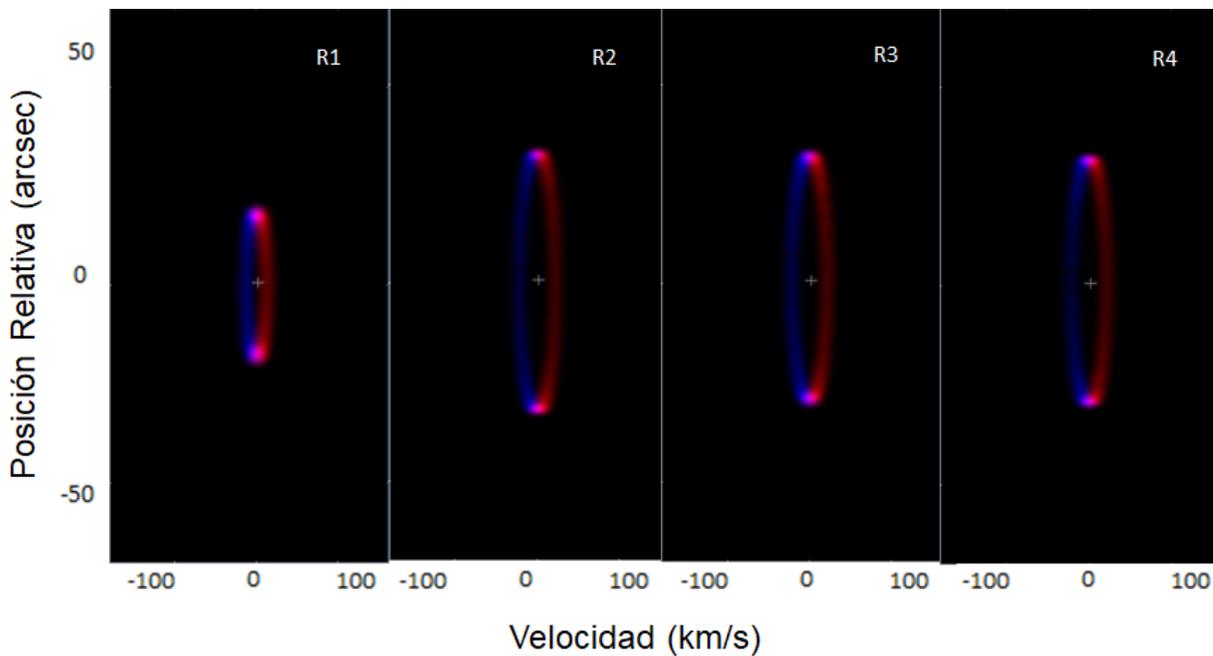


Figura 40: Diagramas P-V para R1, R2, R3 y R4

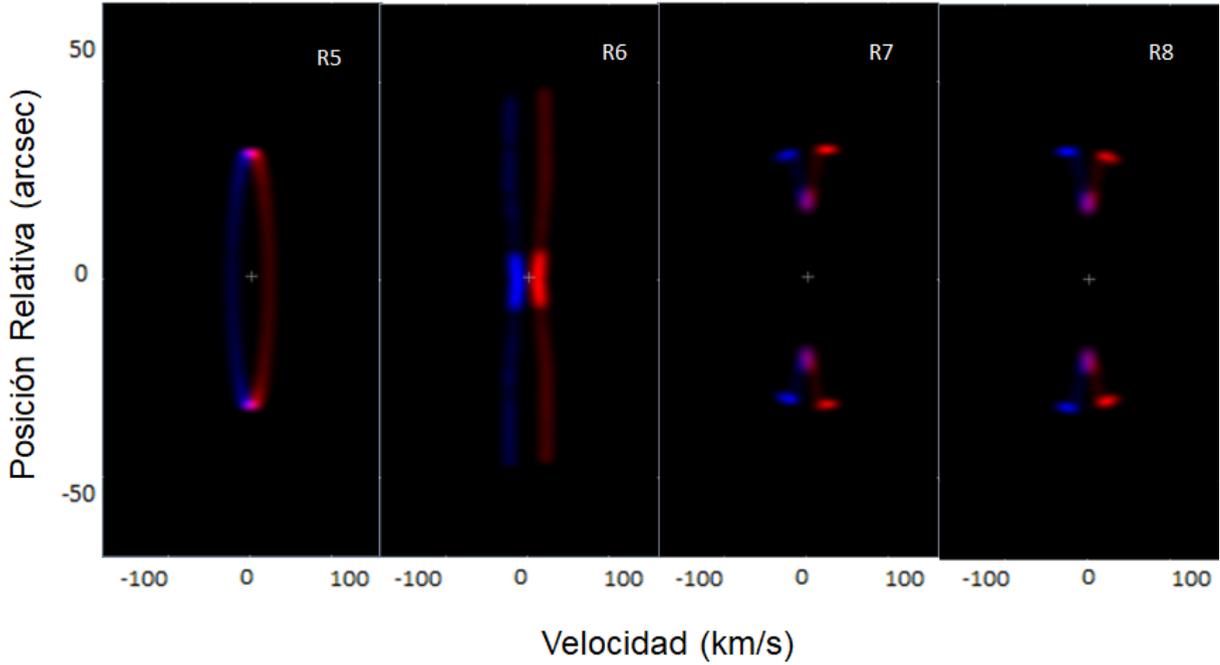


Figura 41: Diagramas P-V para R5, R6, R7 y R8

Para las diferentes rendijas se obtuvieron los siguientes valores de velocidades de expansión

Nombre	Rendija	Velocidad de expansión (km/s)
Rendija ecuatorial	R1	11
Primera rendija lobular sureste	R2	19.5
Primera rendija lobular noreste	R3	19.5
Segunda rendija lobular noreste	R4	23
Segunda rendija lobular sureste	R5	23
Rendija longitudinal	R6	22
Rendija transversal del lóbulo noreste	R7	23
Rendija transversal del lóbulo sureste	R8	23

Tabla 2: Velocidades de expansión obtenidas a partir del modelo propuesto

#### 4.6. Tamaño y distancia

La paralaje ( $\theta$ ) medida por el satélite espacial GAIA es de  $0.78 \pm 0.27$  en milisegundos de arco (mas), por lo que con lo visto en la sección 2.3 se pueden derivar las distancias de la Tabla 3.

Ángulo (mas)	Distancia (pc)	Distancia (años luz)
$0.78 + 0.27$	952	3100
0.78	1282	4200
$0.78 - 0.27$	1960	6400

Tabla 3: Distancias obtenidas con sus errores superiores e inferiores

Por otro lado el tamaño angular de la estructura bipolar final de NGC 2346 fue de 30 arcsec de diámetro ecuatorial y 120 arcsec de longitud polar.

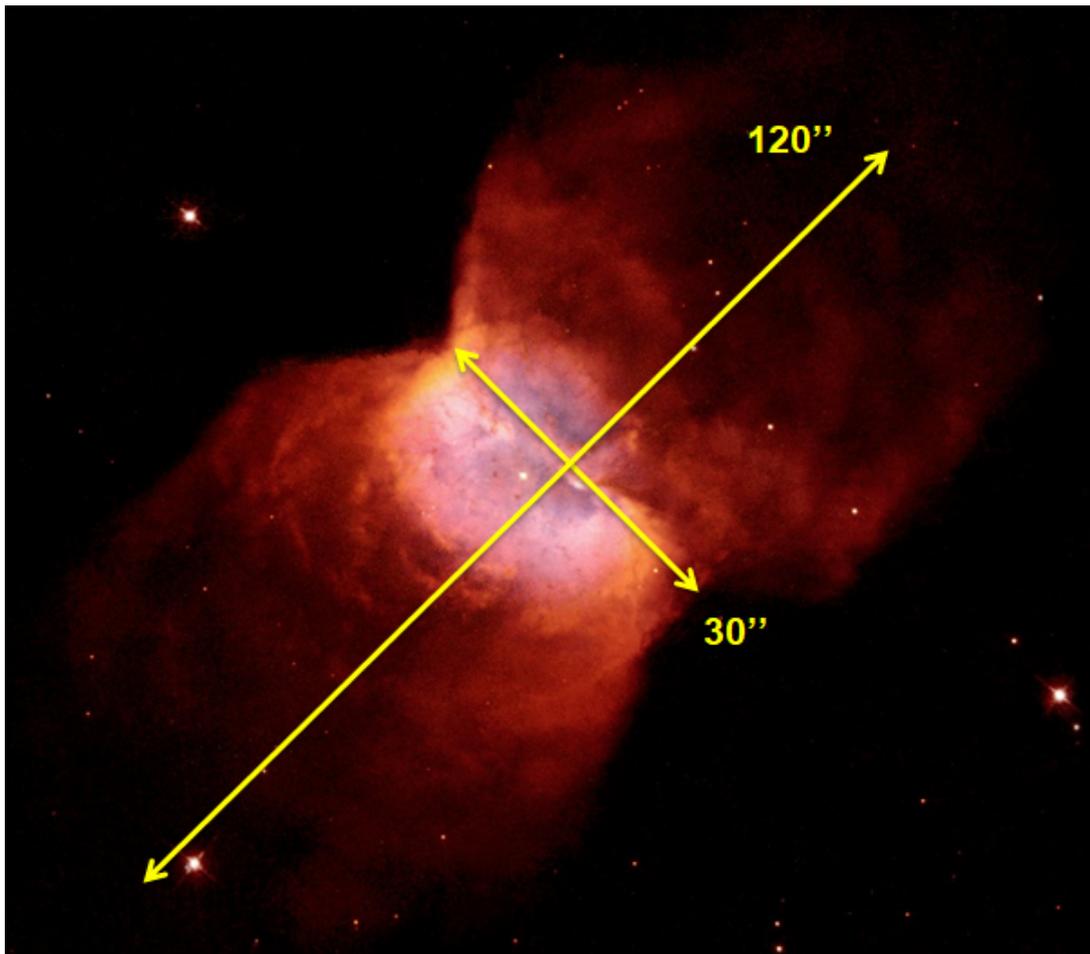


Figura 42: Tamaños angulares estimados con DS9

Esto se traduce en una diámetro de  $0.19 \pm \frac{0.11}{0.05} pc$  y  $0.76 \pm \frac{0.48}{0.19} pc$  respectivamente.

---

## 4.7. Edad cinemática

De acuerdo al valor de la distancia y sus errores se puede obtener el tamaño real utilizando la ecuación 24, (sección 2.4).

$$\tau = 4744 \frac{(30 \text{ arcsec})(1.282 \text{ kpc})}{(11 \text{ km s}^{-1})} = 16,711.06 \pm \frac{9956.75}{4266.08} \text{ yrs} \quad (27)$$

## 5. Discusión

Con las imágenes CCD obtenidas y las tomadas por el telescopio espacial Hubble, deducimos que la NP NGC 2346 tiene una estructura bipolar abierta. Por lo que para ello según estudios y modelos recientes en su centro debería haber una estrella binaria la cual le dio dicha geometría a la nebulosa.

El modelo propuesto reproduce consistentemente la morfología y la cinemática de los diagramas P-V por lo que podemos decir que al menos la estructura básica está bien fundamentada. A partir de eso se obtuvieron diversas velocidades de expansión, en cuanto a la rendija R1 el valor fue  $v_{\text{exp}} = 11 \text{ km/s}$  mientras que en los lóbulos va desde  $19.5 \text{ km/s}$  a  $23 \text{ km/s}$  esto dependiendo de la posición en la que tomemos el espectro. Dichas variaciones se deben a que en el centro de nuestro objeto se colocó un toroide que le da una forma de reloj de arena a la nebulosa funcionando como una especie de “faja” para el objeto, por lo que la velocidad de expansión en esa zona es menor que en los lóbulos.

Por otro lado el tamaño ecuatorial fue de  $0.19 \pm \frac{11}{5} \text{ pc}$  la edad cinemática obtenida fue de  $\approx 17$  mil años. En arcsec el tamaño a lo largo fue de  $120 \text{ arcsec}$  lo cual se acerca a lo estimado anteriormente de  $140 \text{ arcsec}$  (Walsh, 1983). La distancia que utilizamos fue de  $1282 \text{ pc}$  mientras que lo reportado por Walsh es de  $700 \text{ pc}$ , dichas diferencias pueden deberse a la calidad de los instrumentos utilizados pues, las mediciones para la distancia en este caso, se obtuvieron con GAIA cuyos datos fueron tomados en 2016 teniendo una mayor calidad en los mismos. Por último nuestro valor estimado de inclinación respecto al plano del cielo fue de  $20^\circ$  lo cual es similar lo que Walsh reportó de  $30^\circ$ .

Los datos obtenidos son de gran interés científico debido a que hoy en día se desconoce con precisión por qué ocurre la formación de un toroide circunestelar en las NP's. Además las clasificaciones de las NP's se solía ser, hasta hace unos años, por medio de estructuras en dos dimensiones. Con trabajos como este será posible realizar clasificaciones más adecuadas pues podemos asegurar de qué tipo de estructura se está observando debido a que se obtuvo un modelo tridimensional. Por último hay que destacar que la edad cinemática se asume suponiendo que la expansión ha sido constante lo cual podría no ser del todo cierto, si existieran aceleraciones, desaceleraciones, etc, por lo que un modelo que conozca a

---

ciencia cierta la evolución del viento de la estrella central podría ser más certero al obtener la edad cinemática de las NP's, así pues existen diversas teorías de formación de dichos objetos celestes sin embargo cada NP es al menos un poco diferente de las demás por lo que al adquirir mayor cantidad de información respecto a estos parámetros es posible generar nuevos modelos que expliquen el pasado, presente y futuro de las NP's.

## 6. Conclusión

NGC 2346 es una nebulosa bipolar con un toroide circunestelar en su centro cuya velocidad de expansión es de  $11 \text{ km/s}^{-1}$ . Ambos lóbulos se expanden a una velocidad aproximada de  $23 \text{ km/s}^{-1}$ . El modelo tridimensional propuesto sugiere que los lóbulos bipolares son completamente abiertos y probablemente huecos por dentro, lo cual se asemeja al modelo de Chavalier y Lou, sin embargo se sabe que en su interior hay una estrella binaria, lo que podría ser la causa de la morfología. El tiempo que ha transcurrido desde que NGC 2346 comenzó a ser una NP es de aproximadamente 17 mil años. Tiene una inclinación respecto al cielo de  $20^\circ$  y un tamaño ecuatorial de 0.19 pc y longitudinal de 0.76 pc. Finalmente se encuentra a una distancia de 1282 pc.

El tipo de técnicas utilizadas para la obtención de los resultados presentados demuestran tener un gran potencial para el estudio de cualquier nebulosa planetaria como se ha visto en el pasado (Riesgo y López, 2006; García, et al 2012; Vázquez 2012; Gómez, et al 2015; Rubio et al 2015; Sabin et al 2016; Miranda et al 2017). Dicho estudio y resultados obtenidos podrán ayudarnos a entender el proceso de evolución estelar y por ende el de formación de NP's de los cual aún hay muchos misterios por resolver.

---

## 7. Referencias

- [1] Arias, L., Rosado, M., Salas, L., and Cruz González, C. (2001). Kinematics of the molecular hydrogen from the planetary nebula NGC 2346. *The Astronomical Journal*, 122, p. 3293-3304.
- [2] Balick, B., Frank, A. (2002). Shapes and Shaping of the Planetary Nebulae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40, pp. 439-486.
- Barral, J., Cantó J. (1981) A Stellar Wind Model for Bipolar Nebulae. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*. 5, 101.
- [3] Becker, J. (1980) *The High Speed Frontier*. Washington D.C. NASA Scientific and Technical Information Branch.
- [4] Benitez, G. (2003) "Espectroscopía de baja dispersión de nebulosas planetarias con simetría puntual" Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California.
- [5] Blanco, M. (2006) "Estudio físico de nebulosas planetarias NGC 3242 t NGC 3587" Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California.
- [6] Bujarrabal, V., Castro-Carrizo, Alcolea A. J. and Sánchez C. (2001). Mass, linear momentum and kinetic energy of bipolar flows in protoplanetary nebulae. *Astronomy and Astrophysics*, 377, pp. 868-867.
- [7] Clark, D., López, J.A., Steffen, W., Richer, M. (2013). A detailed spatiokinematic model of the conical outflow of the multipolar planetary nebula NGC 7026. *The Astronomical Journal*, 145, pp. 1-6.
- [8] Cliffe JA, Frank A, Livio M, Jones J. 1995. A Mechanism for the Production of Jets and Ansaes in Planetary Nebulae. *The Astrophysical Journal Letters*. 44, 49
- [9] García, M., López, J. A. Steffen, W., G. Richer, M., Riesgo, H. (2012). A Cat's Eye view of the Eskimo from Saturn. *Proceedings of the International Astronomical Union*. 7. 366-367.
- [10] García, G., Langer N, Różyczka M, Franco J. (1999) Shaping Bipolar and Elliptical Planetary Nebulae: Effects of Stellar Rotation, Photoionization Heating, and Magnetic Fields. *The Astrophysical Journal*. 517, 767
- [11] Gruendl, R., Guerrero, M., Chu, Y., Williams, R. (2006). XMM-NEWTON Observations of the Bipolar Planetary Nebulae NGC 2346 and NGC 7026. *The Astrophysical Journal*, 653, pp. 339-344.
- [12] Gómez, A. (2017). Early Science with the Large Millimetre Telescope: Molecules in the Extreme Outflow of a proto-Planetary Nebula. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 000, pp.1-6.

- 
- [13] Gómez M.A., Cárdenas, M., Vázquez, R., et. al. (2015). Morpho-kinematics of the planetary nebula NGC 3242: an analysis beyond its multiple-shell structure. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, pp. 4175–4184
- [14] Guillén, F. Vázquez, R., et al. (2017). Multiple outflows in the planetary nebula NGC 6058. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432, 2676–2684.
- [15] Icke V. (1988). *Blowing bubbles Astronomy and Astrophysics*, 202, 177
- [16] Jones, D. et al. (2014). The Morpho-kinematics of Planetary Nebulae with Binary Central Stars. *Asymmetrical Planetary Nebulae*, 6, p. 2-7.
- [17] Jones, D., Boffin, H. (2 de mayo 2017). Binary stars as the key to understanding planetary nebulae. *nature astronomy*, 1, pp.1-6.
- [18] Kwok, S. (2007). *The Origin and Evolution Of Planetary Nebulae*. Edinburgh: Cambridge University Press.
- [19] Machado, A., Stanghellini, L., Villaver, E., García, G., Shaw, R., García, D. (2015). High resolution imaging of NGC 2346 with GSAOI/GeMS: disentangling the planetary nebula molecular structure to understand its origin and evolution.. *The Astrophysical Journal*, 808, pp.1-17.
- [20] Meaburn J., López J, Gutierrez L. Quiroz F., Murillo J., Valdéz J., Pedrayes M., 2003, The Manchester Echelle Spectrometer at the San Pedro Martir Obsevatory (MES–SPM) *Revista Mexicana de Astrofísica y Astronomía*, 39, pp. 185
- [21] Mellema, G., Frank, A. (1995) Radiation gasdynamics of planetary nebulae - V. Hot bubble and slow wind dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 273, pp. 401-410.
- [22] Miranda, L. F., Guillén, P. F., Olguín, L., Vázquez, R. (2017) History of the mass ejection in K 4-37: from the AGB to the evolved planetary nebula phase, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 2151-2160
- [23] Mitchell, D. L., Pollacco, D., O'Brien, T. J., Bryce, M., López, J. A., Meaburn, J., (2007) Proof of polar ejection from the close-binary core of the planetary nebula Abell 63. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374,4, pp. 1404-1412.
- [24] López, J. A., Richer, M. G., García-Díaz, Ma. T., Clark, D. M., Meaburn, J., Riesgo, H., Steffen, W., Lloyd, M., *The SPM Kinematic Catalogue of Planetary Nebulae 2012*, *RevMexAA*, 48, 3.
- [25] Richer, M. et al. (2010). The Evolution of the Kinematics of Nebular Shells in Planetary Nebulae in the Milky Way Bulge. *The Astrophysical Journal*, 718, p. 857-865.
- [26] Riesgo, H., López J. A., (2006) Revised diagnostic diagrams for planetary nebulae *Revista Mexicana de Astrofísica y Astronomía*, 42.

- 
- [27] Resnick, R., Halliday, D., Krane, K., "Física" Cuarta edición. Grupo patria cultural S.A. de C.V. 2002 México D.F.
- [28] Rubio G. et al. (2015). NGC 6309, a planetary nebula that shifted from round to multipolar. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, pp.1931-1938.
- [29] Sabin, L., Gómez-Muñoz, M. A., Guerrero, M. A., Zavala, S., Ramos-Larios, G., Vázquez, R., Corral, L., Blanco Cárdenas, M. W., Guillén, P. F., Olguín, L., Morisset, C., Navarro, S. (2017), Catching a Grown-Up Starfish Planetary Nebula: I. Morpho-Kinematical study of PC 22. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467, 3056-3065
- [30] Sahai, R. (2002). Bipolar and Multipolar Jets in Protoplanetary and Planetary Nebulae. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 13, PP. 133-138.
- [31] Schwarz, H., Romano, R. and Rodolfo Montez, Jr. (2010). Kinematic and Morphological Modeling of the Bipolar Nebula Sa 2-237. *The Astrophysical Journal*, 565, p. 1084-1088.
- [32] Steffen W, López J. (1998) Jets and the Shaping of the Giant Bipolar Envelope of the Planetary Nebula KJPN 8. *The Astrophysical Journal*. 508, 696
- [33] Steffen, W. (s.f.) "SHAPE V 5.0" Recuperado el 15 de junio del 2017 desde: <http://www.astrosen.unam>.
- [34] Steffen, W., Koning, N., Wenger and Stephan M. (2011). Shape: A 3D Modeling Tool for Astrophysics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17, 454 - 465.
- [35] Soker, N. (1998). Binary Progenitor Models for a Bipolar Planetary Nebulae. *The Astrophysical Journal*, 496, pp. 833-841.
- [36] Soker N, Rappaport S. (2001). Departure from Axisymmetry in Planetary Nebulae. *The Astrophysical Journal*. 557, 256
- [37] Teodorescu, A. (2010). Planetary Nebulae in the Elliptical Galaxy NGC 821: Kinematics and Distance Determination. *The Astrophysical Journal*, 721, 369-382.
- [38] Thornton, S., Marion, J. "Classical Dynamics of Particles and System" 5ta edición Thompson Lernaing 2004 Estados Unidos de América.
- [39] Vázquez R. 1999 , Tesis Doctoral, Universidad de granada, Granada pp. 113-116.
- [40] Vázquez. R. (2012) Bubbles and Knots in the Kinematical Structure of the Bipolar Planetary Nebula NGC 2818. *The Astrophysical Journal*, 751, 116 (8pp)
- [41] Vázquez, R., Ayala, S. A., Blanco Cárdenas, M. W., Contreras, M. E., Gómez-Muñoz, M. A., Guillén, P. F., Olguín, L., Ramos-Larios, G., Sabin, L., Zavala, S. A. (2015) Planetary Nebulae as Probes of Galactic Structure and Evolution, *Focus Meeting 4, XXIX*

---

International Astronomical Union General Assembly, 2257920

[42] Vicino, B., Natta A., Marconi, A., Testi, L.,Hollenbach, D.and Draine, B.T. (1998). A Near-Infrared Study of the Planetary Nebula NCG 2346. *Astronomy and astrophysics*, 352, p.823-830.

[43] Walsh, J., Meaburn, J. and Whitehead, M. J.(1991). The velocity structure of the bipolar planetary nebula NGC 2346. *Astronomy and Astrophysics*, 248, pp. 613-623.

[44] Walsh, J. (1983). NGC 2346: a bipolar nebula produced by mass-loss from a binary system. *onthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 202, p. 303-315.

[45] Zhang, Y., Liu, X.. (2003). Optical spectrum of the planetary nebula M2-24. *Astronomy and Astrophysics*, 404, p. 545-556.