

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

POLVO EN EL ENTORNO DE LAS ESTRELLAS WN
TARDIAS COMO FIRMA DE LA EVOLUCION ESTELAR

P R O Y E C T O
D O C T O R A L

PRESENTA

PALMIRA JIMÉNEZ HERNÁNDEZ

DIRECTORES DE TESIS

DRA. SARAH JANE ARTHUR,
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
&

DR. JESÚS ALBERTO TOALÁ SANZ,
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO. NOVIEMBRE 2018

Índice

1. Hipótesis	2
2. Antecedentes	2
3. Objetivos y metas	5
4. Metodología	6
4.1. Revisión de la literatura	6
4.2. Observaciones infrarrojas	6
4.3. Modelos de fotoionización	6
5. Cronograma	8

1. Hipótesis

Las nebulosas asociadas a estrellas Wolf-Rayet (WR) de tipo WNL están conformadas por material arrojado por la estrella en etapas evolutivas previas. Observaciones ópticas e infrarrojas permiten determinar las propiedades del gas y polvo de las nebulosas y así establecer la evolución tardía de las estrellas masivas.

2. Antecedentes

Las estrellas WR son muy calientes ($30 - 100$ kK) y luminosas ($3 \times 10^4 - 10^6 L_{\odot}$). Sus espectros están caracterizados por líneas de emisión en el óptico de He, N, C y O (?). El cociente de estas líneas es clásicamente usado para definir subclasificaciones. Las estrellas WN ricas en Nitrógeno se subdividen de acuerdo con su proporción con hidrógeno, son tempranas (WNE) o tardías (WNL) con fracciones de Hidrógeno $X_H < 10\%$ y $X_H < 40 \pm 10\%$ respectivamente. Las estrellas WC son ricas en Carbono; y las WO, abundantes en Oxígeno. Las estrellas WN que presentan líneas de emisión de hidrógeno son renombrados como WNh y se distinguen por ser luminosas. Si el espectro de la estrella también muestra líneas de absorción de H, se etiqueta como WNha.

Una característica importante de las estrellas WR es que presentan líneas de emisión intensas y presentan perfiles P Cygni ocasionados por los rápidos vientos estelares. La velocidad terminal (v_{∞}) del viento se estima usando estos perfiles P Cygni de líneas de resonancia en UV. En particular, el perfil de las líneas de O VI, N V y C IV indican valores de v_{∞} en el rango de $1000 - 2000$ km s^{-1} y tasas de pérdida de masa $\dot{M} \approx 10^{-5} M_{\odot}/\text{año}$ (?).

Actualmente es aceptado que las estrellas WR son las descendientes de las estrellas masivas tipo O ($M_i \gtrsim 25 M_{\odot}$) en un etapa evolutiva avanzada. Estas estrellas han perdido la mayor parte de su envoltura rica en H dejando expuesto a su núcleo. El proceso de la pérdida de la envoltura se da a través del viento estelar y/o episodios extremos de pérdida de masa durante una fase evolutiva previa: Supergigante Roja (RSG), Supergigante Amarilla (YSG) o Variable Luminosa Azul (LBV). Por otro lado, si la WR está en un sistema binario la envoltura rica en H podría perderse a través de un flujo del Lóbulo de Roche.

Las estrellas masivas viven alrededor de algunos millones de años en Secuencia Principal (SP). Estas estrellas presentan viento estelar impulsado por la presión de radiación sobre las líneas UV, así mismo, el gas del medio interestelar (ISM) alrededor de la estrella es fotoionizado, produciendo una región H II que rodea una burbuja de viento estelar. Posteriormente evoluciona a una estrella Supergigante (RSG o YSG) o una Variable Luminosa Azul (LBV) dependiendo de su masa inicial. Las estrellas RSGs tienen una vida corta de $t \sim 2 - 3 \times 10^5$ años y las LBVs aún más cortas ($t \sim 10^4$ años). En estas estrellas el viento estelar se vuelve denso y lento dado que en estos casos el viento es impulsado por la presión de radiación sobre el polvo. Y hasta decenas de masas solares pueden ser eyectadas al medio circunestelar. Sucediendo a la etapa anterior, la fase Wolf-Rayet (WR) toma lugar durante $t \sim 2 - 6 \times 10^5$ años. Dado que la estrella es caliente y posee vientos rápidos, fotoioniza sus alrededores y barre el material eyectado en las fases evolutivas anteriores. Esta combinación de procesos físicos crean las llamadas nebulosas de anillo o nebulosas WR (?). Finalmente, la estrella WR terminará su vida como una supernova de tipo Ib o Ic (?).

A partir de lo anterior se sugiere el escenario evolutivo general:

$$O \rightarrow \text{LBV} / \text{RSG} / \text{YSG} \rightarrow \text{WR} (\text{WN} \rightarrow \text{WC}) \rightarrow \text{SN Ib/c}.$$

Este escenario contempla que una vez en la fase WR, la estrella es de tipo WNL ($X_{\text{H}} \sim 10\%$) y evoluciona a WNE ($X_{\text{H}} \sim 40\%$), y luego WC. Sin embargo, no se tiene claro si la secuencia evolutiva mencionada tiene el orden correcto, y si existe una secuencia evolutiva entre las subclases espectrales, es decir, WN9 hasta WN2. Existen algunas fases transitorias entre estrellas tipo O y LBV, como las estrellas Of y las WNLh ($X_{\text{H}} > 50\%$) y no se sabe cual sería su lugar en la secuencia evolutiva. Además, diferentes modelos evolutivos que incluyen diferentes procesos físicos (rotación, campo magnético y diferentes metalicidades) predicen una variedad de caminos evolutivos (e.g. ???, ver Figura 1.). Por lo tanto, los caminos evolutivos de estrellas WR no están bien determinados. Mas aún, en el caso de un sistema binario, la evolución de las estrellas puede dar a lugar a que la estrella más masiva llegue a ser una WR (?).

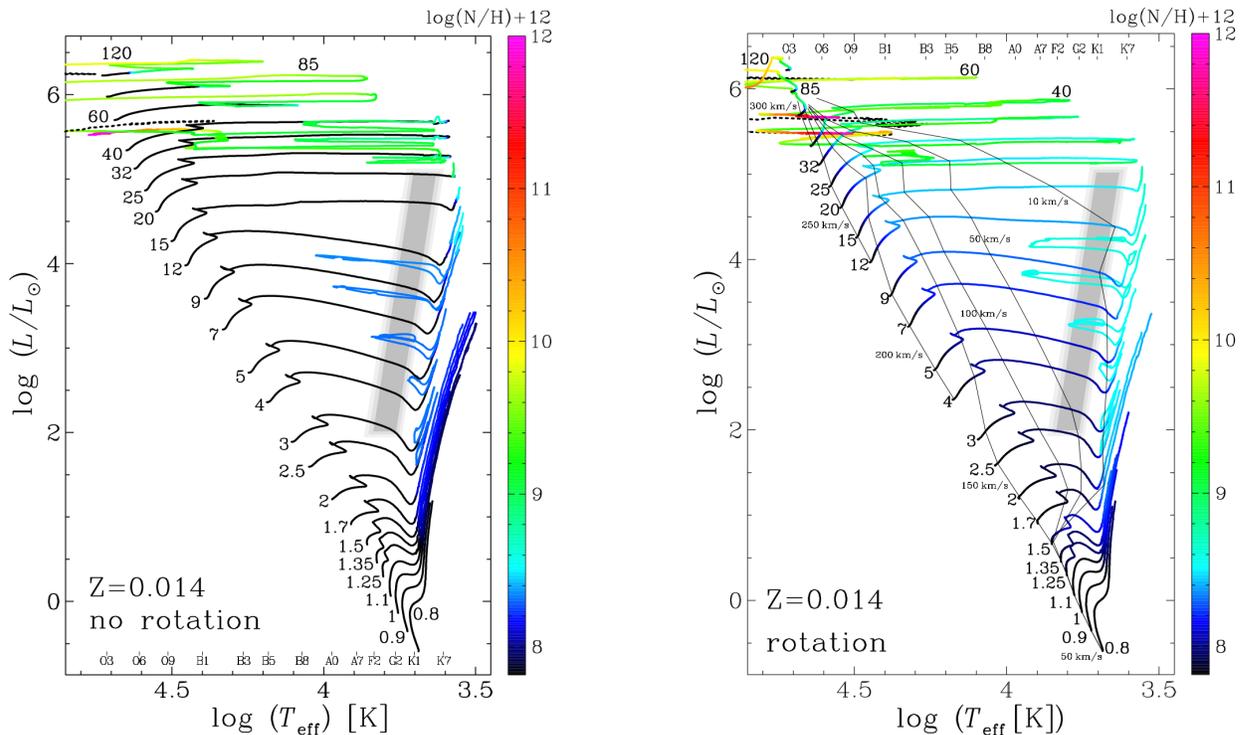


Figura 1: Diagramas HR calculadas por ?. El panel izquierdo muestra modelos de evolución estelar sin rotación y el panel derecho muestra resultados similares pero para el caso con rotación.

La secuencia evolutiva no es el único punto incierto en las estrellas WR, otro punto incierto es la formación de polvo alrededor de estrellas masivas. Dado que observaciones en el infrarrojo han permitido constatar la presencia de polvo en las nebulosas WR (e.g., ?). El escenario actual considera el hecho de que las etapas RSG, YSG y LBV corresponden a las tasas de pérdida de masa más grandes y temperaturas efectivas más bajas. Entonces, a cierta distancia desde la estrella la temperatura en el gas eyectado cae debajo de la temperatura de condensación de ciertos minerales, dando lugar a la formación de polvo y de moléculas alrededor de RSGs, YSGs y LBVs. Las capas externas de las estrellas masivas que se exponen por la pérdida de masa presentan un



Figura 2: Izquierda: Imagen de la nebulosa M1-67 obtenida del *Telescopio Espacial Hubble*. La imagen fue tomada con la cámara WFPC2 y el filtro H α con un campo de visión de $2.18' \times 2.20'$. Los p anes central y derecho muestran las imágenes de las nebulosas alrededor de las estrellas WR 16 y WR 40, respectivamente. Imágenes obtenidas por el astrónomo amateur Don Goldmam (Astrodon).

equilibrio parcial de los núcleos de C, N y O por el quemado de H mediante el ciclo CNO, lo cual resulta en un decremento de las abundancias de C y O, y un incremento de N. Ya que la composición del polvo depende de las razones de abundancias de C y O, y los refractores Mg, Fe y Si, los cálculos de ? muestran que los granos a formarse en el material eyectado alrededor de una estrella evolucionada son principalmente silicatos. Entonces, cuando la estrella evoluciona a la fase WR, calienta el material de la nebulosa WR que ha creado, debido a su fuerte flujo UV. Como resultado, el polvo de la nebulosa reemite la radiación en el infrarrojo (?).

Por otro lado, tenemos el escenario expuesto por ? el cual dice que el polvo alrededor de estrellas calientes masivas sólo puede formarse durante erupciones de material. Entonces, para la creación de granos de polvo grandes ($a_{\max} \gtrsim 1\mu\text{m}$) se necesitan altas tasa de pérdida de masa ($\dot{M} \gtrsim 10^{-2.5} M_{\odot}/\text{a} o$), como es el caso de estrellas LBV. Por lo tanto, las características del polvo en las nebulosas pueden proveernos de información acerca de la historia del proceso de pérdida de masa de la estrella progenitora.

Se estima que en nuestra Galaxia hay alrededor de 1000 estrellas WR (?). Sin embargo, sólo alrededor de una veintena de estas estrellas presentan nebulosas asociadas (?). Actualmente existen en la literatura numerosos estudios sobre las propiedades ópticas (p. ej. ??). En particular, ? modelaron de manera autoconsistente la nebulosa NGC6888 y su estrella central. Por otro lado, no existe ningún trabajo que modele de manera detallada la estrella, la nebulosa, y el polvo en conjunto. En este proyecto hemos seleccionado la icónica y peculiar M1-67 (ver Figura 2 - panel izquierdo) para comenzar un estudio detallado de las características del polvo y las propiedades nebulares.

M1-67 rodea a la estrella WR 124, la cual tiene un tipo espectral WN8h. ? descubrió a M1-67 y sugirió que podría ser una nebulosa planetaria (PN). Más tarde ? basados en observaciones infrarrojas sugirieron que M1-67 es una nebulosa WR, la cual ha sido ampliamente estudiada. Con estudios basados en análisis de espectros de alta resolución (??) se confirmó que el material nebuloso de M1-67 se origina en la estrella WR central. Y de datos caronogr ficos ópticos se observó una expansión axisimétrica en M1-67 (??). Además, mediciones de la velocidad radial revelaron la ex-

pansión de una cáscara esférica y un flujo bipolar, ambos formados durante la etapa post-SP de la estrella central. Por otro lado, imágenes profundas del *Telescopio Espacial Hubble* revela fragmentación en la nebulosa, por lo que se ha propuesto que M 1-67 podría ser el resultado de un viento grueso durante la fase evolutiva LBV de la estrella central (?). Con datos de espectroscopía de campo integrado y modelos evolutivos teóricos, ? proponen que la estrella central recientemente entró a la fase WR.

Una peculiaridad del sistema M 1-67/WR 124 es su estrella central. WR 124 es la estrella WR fugaz (*runaway*) más rápida de toda la Galaxia. Se aleja de nosotros a una velocidad de ~ 200 km s⁻¹ (?). El movimiento de la estrella dió lugar a la formación de un arco de choque, el cual se observa en el análisis de la velocidad radial del material de las observaciones Fabry-Perot en H α presentado por ?.

La distancia a WR 124 ha sido discutida por diferentes autores. ? estimaron una distancia de 3.35 kpc usando el método de expansión angular comparando imágenes de H α en dos épocas separadas 11.3 años. ? calcularon una distancia de 4.33 kpc, con base al tipo espectral de la estrella (WN8) y usando la magnitud absoluta de calibración de ?. Recientemente, *Gaia* reportó una distancia de 8.7 kpc obtenido del paralaje de WR 124 de 1.15×10^{-4} arcsec. Sin embargo, ? usan los datos obtenidos por *Gaia* y estiman que WR 124 se encuentra entre 5.1 y 7.8 kpc, siendo 6.2 kpc la distancia más probable.

Otras nebulosas detectadas en el óptico, que albergan estrellas tipo WN8h y que actualmente no existen estudios detallados son las nebulosas alrededor de WR 16 y WR 40 (RCW 58). Estas se muestran en la Figura 2 junto con M 1-67.

3. Objetivos y metas

Los objetivos de esta tesis incluyen aspectos teóricos del modelado del polvo entorno a estrellas masivas evolucionadas, así como, el análisis de observaciones obtenidas de diferentes telescopios terrestres y espaciales infrarrojos y ópticos. En general, se buscará una evolución de las propiedades del gas y polvo en nebulosas WR alrededor de estrellas tipo WNLh, para entender los procesos de formación y evolución de polvo alrededor de estrellas masivas.

Las metas específicas son:

1. Familiarización de observaciones espectroscópicas y fotométricas disponibles en archivos públicos de telescopios ópticos e infrarrojos.
2. Familiarización del código de transferencia radiativa Cloudy.
3. Modelar las propiedades nebulares y del polvo de la nebulosa M 1-67 alrededor de la estrella WR 124. Para ello se necesita obtener un modelo autoconsistente de las propiedades de la estrella WR 124.
4. Identificar y seleccionar nebulosas alrededor de estrellas del tipo WNLh.
5. Modelar las nebulosas identificadas para comparar las propiedades del polvo con las obtenidas para M 1-67.

6. Comparar las diferentes propiedades entre las nebulosas analizadas (abundancias, tamaños de granos de polvo, mezcla con el ISM) para establecer diferencias y similitudes.
7. Investigar la importancia de factores como el medio ambiente, binariedad en la formación de polvo en estos objetos.

4. Metodología

4.1. Revisión de la literatura

Para poder modelar en detalle las propiedades nebulares y del polvo alrededor de estrellas WR, necesitamos conocer las características espectrales de las estrellas progenitoras. En particular, el grupo de la Universidad de Potsdam (Alemania) han producido un análisis de las características espectrales de las estrellas WR galácticas utilizando el código de atmósferas estelares PoWR (?). Los modelos estelares de las estrellas WR se obtendrán de la página web pública del código PoWR¹

Además, se buscará trabajos publicados que reporten estimaciones de abundancias en M 1-67 y de las otras nebulosas que serán estudiadas (p.e., las nebulosas alrededor de WR 16 y WR 40). La información espectral y nebular permitirá restringir los parámetros de nuestros modelos.

4.2. Observaciones infrarrojas

Se obtendrán observaciones infrarrojas de los satélites *Spitzer* (IRAC y MIPS), *WISE* y *Herschel* (PACS y SPIRE). Esto nos permitirá estudiar las nebulosas WR en el rango de 3–500 μ m, nunca antes hecho para una nebulosa WR. Las observaciones se obtendrán del NASA/IPAC Infrared Science Archive². Se extraerá la fotometría de cada imagen de cada filtro de cada telescopio corrigiendo por el fondo. Para esto se toman varias regiones de fondo alrededor de la nebulosa y se estima el valor promedio de la emisión para corregir el flujo de la nebulosa. Este proceso nos dará como resultado una distribución espectral de energía (SED por sus siglas en inglés) IR para cada nebulosa.

En particular también se complementará las observaciones fotométricas de M 1-67 con espectros obtenidos con el instrumento IRS de *Spitzer*. Desafortunadamente, no existen observaciones similares para las nebulosas alrededor de WR 16 y WR 40.

4.3. Modelos de fotoionización

Utilizaremos el código de transferencia radiativa *Cloudy* para modelar las propiedades nebulares y del polvo en comparación con observaciones ópticas e infrarrojas. *Cloudy* toma como parámetros de entrada i) las propiedades estelares (luminosidad, distancia, forma espectral), ii) nebulares (abundancias, geometría, perfil de densidad) y iii) del polvo (especies, distribución de tamaños, razón gas a polvo). Las primeras dos son obtenidas o estimadas de las observaciones y la tercera representa el trabajo del modelado. Por ejemplo, la SED de WR 124 ha sido recientemente calculada por Toala et al. (en preparación) y las propiedades nebulares han sido obtenidas de ?, ?

¹<http://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~wrh/PoWR/powrgrid1.php>

²<https://irsa.ipac.caltech.edu>

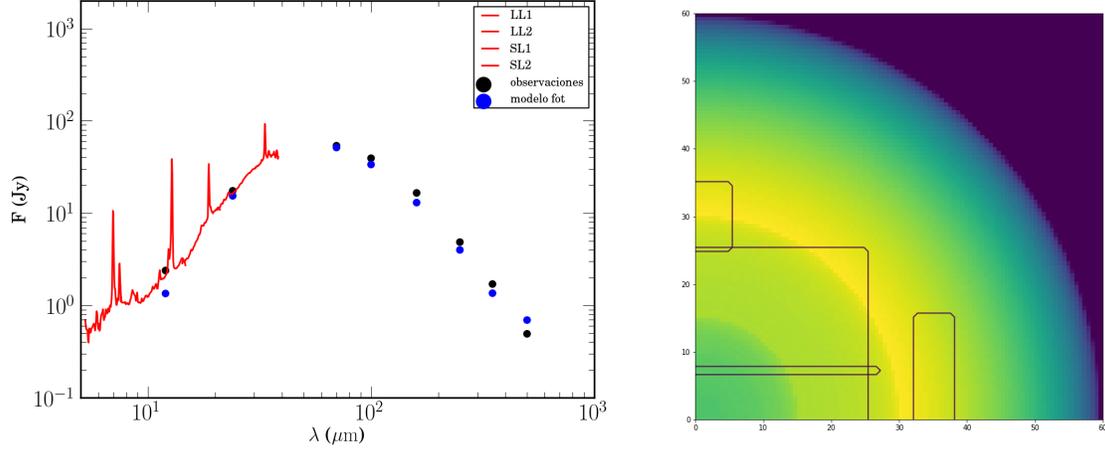


Figura 3: Izquierda: comparación entre la fotometría extraída de diferentes instrumentos para M 1-67 (puntos negros), espectros IRS de *Spitzer* (línea roja) y fotometría sintética obtenida con *Cloudy* (puntos azules). Derecha: Mapa sintético de la emisividad de $H\beta$ obtenida con *pyCloudy*. Los ejes están en unidades de segundos de arco. La imagen también muestra diferentes aperturas que corresponden a rendijas de las cuales se midió el flujo de la nebulosa para comparar con las observaciones. Para este modelo se asumió una distancia de 5 kpc.

y de ? (ver Tabla 1).

Para modelar las propiedades de M 1-67 hemos utilizado el algoritmo *pyCloudy* desarrollado por el Dr. Christophe Morisset, quien nos ha facilitado el código fuente. *pyCloudy* reporta la emisividad de diferentes líneas ópticas e infrarrojas así como fotometría sintética que pueden ser comparadas directamente con las obtenidas de las observaciones. Además, *pyCloudy* es capaz de producir mapas sintéticos de emisividad proyectado en el cielo. En la Figura 3 mostramos una comparación entre un modelo preliminar de M 1-67 con las observaciones. En el panel izquierdo mostramos la comparación entre la fotometría sintética, la fotometría obtenida de las observaciones de *Spitzer*, *WISE* y *Herschel* y los espectros IRS de *Spitzer*. Así mismo, el panel derecho muestra un mapa sintético de la emisividad de $H\beta$.

Cabe destacar que no todas las observaciones del sistema M 1-67/WR 124 fueron obtenidos con el mismo instrumento, por lo tanto se toman las precauciones necesarias para poder hacer la comparación entre los valores observacionales con los obtenidos con modelos. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestran rendijas con diferentes aperturas correspondientes a diferentes observaciones. Además, para la extracción de la fotometría se toma en cuenta la curva de transmisión de cada instrumento.

Nuestros estudios preliminares de la fotometría de M 1-67 sugieren dos poblaciones de polvo, una con tamaños de $0.01\text{--}0.25\mu\text{m}$ y una segunda de $1\mu\text{m}$. Por lo tanto, con el objetivo de crear la imagen de dos distribuciones de material dentro de la nebulosa, se definió un modelo doble, el cual consiste en la suma pesada de dos modelos con los cuales se puede hacer la suposición de que tienen diferentes *covering factor*. En cada uno de estos modelos pueden especificarse diferentes valores en los parámetros de entrada, sin embargo, es claro que tanto la distancia, como las propiedades de la estrella central se mantendrán iguales para ambos y de esta forma tener coherencia en los

Instrumento	Línea	λ	Intensidad [erg/s/cm ²]	Instrumento	Línea	λ [μm]	Intensidad [W/m ²]
PMAS ⁽¹⁾	H β [†]	486133Å	100	PACS ⁽²⁾	N II	121.7	13.1
	H α	656281Å	331.8		N II	205.4	1.89
	He I	501568Å	1.2		N III	57.21	0.29
	He I	587564Å	2.5		O III	88.33	0.1
	[N II] ^{††}	575500Å	3.2		O I	63.2	1.34
	[N II]	658345Å	425.7		O I	145.53	0.05
	[N II]	654805Å	139.2		C II	157.6	2.13
	[O II] ^{††}	372700Å	47.5				
	[O III]	500684Å	1.8				
	[S II]	671644Å	18.9				
IRS ⁽¹⁾	[S II]	673082Å	19.7				
	H I [†]	12.3837 μm	5				
	[Ne II]	12.81 μm	113.5				
	[Ne III]	15.50 μm	3.0				
	[S III]	18.67 μm	116.6				
	[S III]	33.47 μm	145.9				

Tabla 1: Intensidades de líneas por ajustar en el modelo. ⁽¹⁾ Fernández-Martín et al. (2013). ⁽²⁾ Vamvatira-Nakou et al. (2016).[†] Líneas usadas para calibrar la intensidad de las líneas en cada banda.^{††} Suma de dos líneas.

resultados.

Finalmente, como parte de este proyecto se buscará analizar diferentes especies de polvo. Esto implica que generaremos nuestras propias tablas de características ópticas del polvo para incluirlas en `Cloudy` y producir modelos más realistas que los que actualmente permite este código de fotoionización.

5. Cronograma

Semestre 1:

- Revisión de literatura.
- Obtener y analizar los datos espectroscópicos y fotométricos de M 1-67.
- Visita al IA-UNAM sede Ensenada para trabajar con el código `pyCloudy` escrito por el Dr. Christophe Morisset.

Semestre 2:

- Revisión de literatura.
- Concluir el modelado de M 1-67.
- Redacción de artículo sobre M 1-67.

Semestre 3:

- Revisar la literatura para identificar y seleccionar otros candidatos a ser analizados, por ejemplo, las nebulosas alrededor de las estrellas WR 16 y WR 40 (RCW 58).
- Obtener las observaciones públicas de los nuevos candidatos.
- Presentar examen de candidatura.

Semestre 4:

- Comenzar el modelado de los nuevos candidatos.
- Comparar los resultados con los obtenidos para M 1-67.
- Asistir al congreso de estrellas masivas organizado por el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín en Irlanda (Junio 2020).

Semestre 5:

- Redacción del artículo para presentar los resultados las nebulosas WR seleccionadas.

Semestre 6:

- Redacción de Tesis

Semestre 7:

- Redacción de Tesis
- Asistir a congreso internacional para presentar resultados.

Semestre 8:

- Redacción de Tesis

Junto con la actividades programadas en el cronograma, se realizará en conjunto actividades de divulgación programadas por la UNAM, así como talleres especializados impartidos en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (Morelia), y en el Instituto de Astronomía (CU). También se plantea la posibilidad de visitar a colaboradores.

Referencias

- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., and Andrae, R. (2018). Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2. *AJ*, 156:58.
- Cohen, M. and Barlow, M. J. (1975). Infrared observations of three unusual nebulae. *Astrophys. Lett.*, 16:165–171.
- Crowther, P. A. (2007). Physical Properties of Wolf-Rayet Stars. *ARA&A*, 45:177–219.
- Crowther, P. A. (2015). Wolf-Rayet content of the Milky Way. pages 21–26.

- Eggenberger, P., Maeder, A., and Meynet, G. (2005). Stellar evolution with rotation and magnetic fields. IV. The solar rotation profile. *A&A* , 440:L9–L12.
- Ekström, S., Georgy, C., Eggenberger, P., Meynet, G., Mowlavi, N., Wyttenbach, A., Granada, A., Decressin, T., Hirschi, R., Frischknecht, U., Charbonnel, C., and Maeder, A. (2012). Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 M_{\odot} at solar metallicity ($Z = 0.014$). *A&A* , 537:A146.
- Esteban, C., Vilchez, J. M., Smith, L. J., and Manchado, A. (1991). Spatially resolved spectroscopy of WR ring nebulae. II - M1-67. *A&A* , 244:205–216.
- Fernández-Martín, A., Vilchez, J. M., Pérez-Montero, E., Candian, A., Sánchez, S. F., Martín-Gordón, D., and Riera, A. (2013). Integral field spectroscopy of M1-67. A Wolf-Rayet nebula with luminous blue variable nebula appearance. *A&A* , 554:A104.
- Gail, H.-P., Duschl, W. J., Ferrarotti, A. S., and Weis, K. (2005). Dust formation in LBV envelopes. 332:323.
- Garcia-Segura, G. and Mac Low, M.-M. (1995). Wolf-Rayet Bubbles. I. Analytic Solutions. *ApJ* , 455:145.
- Grosdidier, Y., Moffat, A. F. J., and Acker, A. (1998). Hubble Space Telescope-WFPC2/ $H\alpha$ Observations of the Ejected Nebula M1-67. *Ap&SS* , 260:181–184.
- Hamann, W.-R., Gräfener, G., and Liermann, A. (2006). The Galactic WN stars. Spectral analyses with line-blanketed model atmospheres versus stellar evolution models with and without rotation. *A&A* , 457:1015–1031.
- Kochanek, C. S. (2011). The Astrophysical Implications of Dust Formation during the Eruptions of Hot, Massive Stars. *ApJ* , 743:73.
- Marchenko, S. V., Moffat, A. F. J., and Crowther, P. A. (2010). Population I Wolf-Rayet Runaway Stars: The Case of WR124 and its Expanding Nebula M1-67. *ApJL* , 724:L90–L94.
- Meynet, G., Georgy, C., Maeder, A., Ekström, S., Groh, J. H., Barblan, F., Song, H. F., and Eggenberger, P. (2015). Physics of massive stars relevant for the modeling of Wolf-Rayet populations. pages 183–188.
- Meynet, G. and Maeder, A. (2003). Stellar evolution with rotation. X. Wolf-Rayet star populations at solar metallicity. *A&A* , 404:975–990.
- Minkowski, R. (1946). New Emission Nebulae. *PASP* , 58:305.
- Moffat, A. F. J., Lamontagne, R., and Seggewiss, W. (1982). The fastest runaway Wolf-Rayet star of Population I in the Galaxy, 209 BAC - Evidence for a low mass companion. *A&A* , 114:135–146.
- Nota, A., Clampin, M., Sirianni, M., Greenfield, P., and Golimowski, D. A. (1995). The inner M1-67 nebula: coronagraphic imaging and echelle observations. In van der Hucht, K. A. and Williams, P. M., editors, *Wolf-Rayet Stars: Binaries; Colliding Winds; Evolution*, volume 163 of *IAU Symposium*, page 78.

- Reyes-Pérez, J., Morisset, C., Peña, M., and Mesa-Delgado, A. (2015). A consistent spectral model of WR 136 and its associated bubble NGC 6888. *MNRAS* , 452:1764–1778.
- Sirianni, M., Nota, A., Pasquali, A., and Clampin, M. (1998). A bipolar outflow in the M 1-67 nebula around the Wolf-Rayet star WR 124. *A&A* , 335:1029–1039.
- Smith, L. F. (1973). Classification and Distribution of WR Stars and an Interpretation of the WN Sequence. In Bappu, M. K. V. and Sahade, J., editors, *Wolf-Rayet and High-Temperature Stars*, volume 49 of *IAU Symposium*, page 15.
- Solf, J. and Carsenty, U. (1982). M1-67 - A wind-blown bubble carried along by the high-velocity WR star 209 BAC. *A&A* , 116:54–59.
- Stock, D. J. and Barlow, M. J. (2010). A search for ejecta nebulae around Wolf-Rayet stars using the SHS H α survey. *MNRAS* , 409:1429–1440.
- Toalá, J. A., Guerrero, M. A., Ramos-Larios, G., and Guzmán, V. (2015). WISE morphological study of Wolf-Rayet nebulae. *A&A* , 578:A66.
- Vamvatira-Nakou, C., Hutsemékers, D., Royer, P., Waelkens, C., Groenewegen, M. A. T., and Barlow, M. J. (2016). Herschel observations of the nebula M1-67 around the Wolf-Rayet star WR 124. *app*, 588:A92.
- van Buren, D. and McCray, R. (1988). Bow shocks and bubbles are seen around hot stars by IRAS. *ApJL* , 329:L93–L96.
- van der Hucht, K. A. (2001). The VIIth catalogue of galactic Wolf-Rayet stars. , 45:135–232.
- van der Sluys, M. V. and Lamers, H. J. G. L. M. (2003). The dynamics of the nebula M1-67 around the run-away Wolf-Rayet star WR 124. *A&A* , 398:181–194.