

Burbujas interestelares alrededor de estrellas O y Wolf-Rayet

Dra. Cristina Cappa

Las estrellas de gran masa...

Las estrellas de tipo O se forman en las regiones más densas de las nubes moleculares. Estas estrellas atraviesan por varias etapas evolutivas hasta alcanzar la fase de estrellas Wolf-Rayet (WR), llamadas así en honor de C. Wolf y G. Rayet, quienes las descubrieron en 1867. Las teorías evolutivas actuales indican que luego de esta fase sobreviene la etapa final de supernova. Las estrellas WR están caracterizadas por líneas de emisión anchas e intensas en el rango de longitudes de onda ópticas. Además de las líneas correspondientes al hidrógeno y al helio, aparecen líneas de carbono, nitrógeno y oxígeno varias veces ionizados, resultado de los procesos de nucleosíntesis estelar. Al igual que las estrellas O, muchas de sus líneas espectrales muestran el perfil P Cygni, signo característico de la presencia de vientos estelares intensos. Debido a su alta temperatura, gran parte de la radiación de estas estrellas es emitida en el rango ultravioleta del espectro electromagnético.

...y su interacción con el medio interestelar circundante

Tanto los fotones energéticos que emiten como su fuerte viento estelar modifican el medio interestelar (MIE) circundante. El material interestelar está constituido por gas y polvo. El principal constituyente del gas es el hidrógeno, tanto en estado atómico como molecular. Los fotones ultravioletas con energías mayores que 13.6 eV, valor correspondiente al potencial de ionización del hidrógeno, ionizan los átomos de hidrógeno neutro (HI) en los alrededores de la estrella, arrancándoles su único electrón. Se forma así una región de gas ionizado, llamada *región HII*, formada por protones y electrones libres. La extensión de esta región depende tanto de la cantidad de fotones energéticos radiados por la estrella como de la densidad del MIE circundante. Los fotones con energías algo menores, entre 4 y 13.6 eV, ionizan átomos mucho menos abundantes del MIE y disocian las moléculas, originando las *regiones de fotodisociación* (PDRs) en las interfaces entre el gas ionizado y el gas molecular.

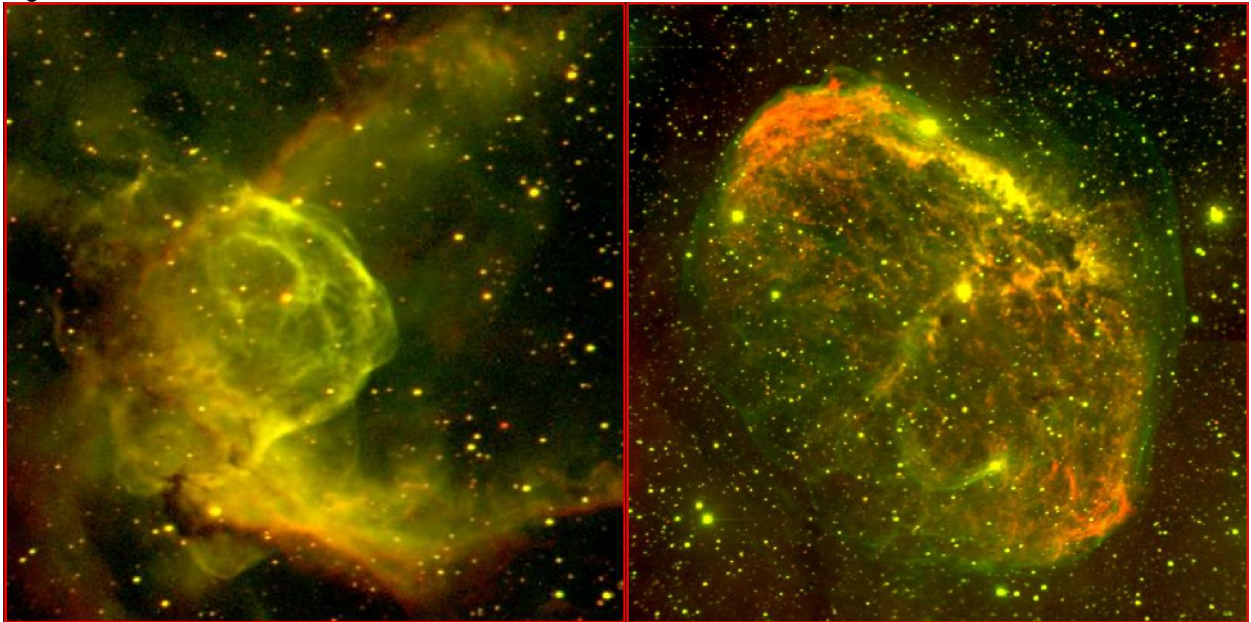
El viento estelar está compuesto por átomos excitados, iones y electrones que fluyen de la estrella a velocidades mayores que la velocidad de escape. Las estrellas O pierden masa a razón de $10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{año}$, mientras que la tasa de pérdida de masa de sus descendientes WR es de $(1-3) \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{año}$. Dado que la duración de la fase WR de una estrella de gran masa es de unos 5×10^5 años, estas estrellas pueden perder unas $10 M_{\odot}$ a través de su viento estelar, cantidad nada despreciable por cierto. La masa perdida por la estrella a lo largo de su vida es probablemente mucho mayor, dado que las estrellas pierden masa durante todas sus etapas evolutivas. El flujo de masa de una estrella O o WR alcanza velocidades máximas entre 1000 y 3000 km/seg, constituyendo entonces un viento estelar denso y a alta velocidad. Podemos calcular la energía cinética $E = (M v^2 t) / 2$ entregada al MIE por una estrella O a través de su viento estelar. En esta expresión, M es la tasa de pérdida de masa; v, la velocidad máxima del flujo de masa, y t, la duración de la fase en secuencia principal de la estrella. Considerando que la vida en secuencia principal de una estrella O es $t = 3 \times 10^6$ años, $v = 2000$ km/seg y $M = 2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{año}$, la energía cinética entregada al MIE es $E = 2.4 \times 10^{50}$ erg, obteniéndose un valor comparable si tenemos en cuenta el caso de una estrella WR. Esta energía es comparable a la entregada instantáneamente durante una explosión de supernova. Este fuerte viento estelar empuja el material interestelar presente en la vecindad de la estrella, formando una cavidad de muy baja densidad y alta temperatura rodeada por una envoltura ionizada (por los fotones ultravioletas emitidos por la estrella) en expansión. Estas estructuras se denominan **burbujas interestelares**.

Burbujas interestelares en el rango óptico

En el rango óptico, estas nebulosas ionizadas se identifican por su aspecto anular. El panel izquierdo de la Figura 1 muestra una imagen de la emisión en líneas ópticas de la nebulosa NGC 2359, asociada a la estrella WR HD 56925. El panel derecho muestra la imagen de NGC 6888, asociada también a una estrella WR. En el caso de NGC 2359 se observa una estructura aproximadamente circular de 3.5 minutos de arco de diámetro (5.0 pc a 5 kpc de distancia) surcada por filamentos ionizados y limitada al sur por una "barra" de gas ionizado denso. Se detecta también emisión proveniente de regiones ionizadas de más baja densidad. El panel derecho de la figura muestra la nebulosa NGC 6888 a una distancia de 1.8 kpc del Sol. En ambas imágenes ópticas se identifica la cavidad de baja densidad alrededor de la estrella y los filamentos ionizados de la cáscara, que forman la burbuja interestelar. Estas envolturas están constituidas tanto por material del viento estelar como por material interestelar empujado por el viento estelar e ionizado

por los fotones ultravioletas. El aspecto filamentario denota la presencia de frentes de choque originados en la interacción entre el viento estelar y el gas circundante. Diversos estudios de espectroscopía nebular mostraron que el gas ionizado de ambas nebulosas se expande en el medio interestelar con velocidades de 15 y 80 km/seg, respectivamente.

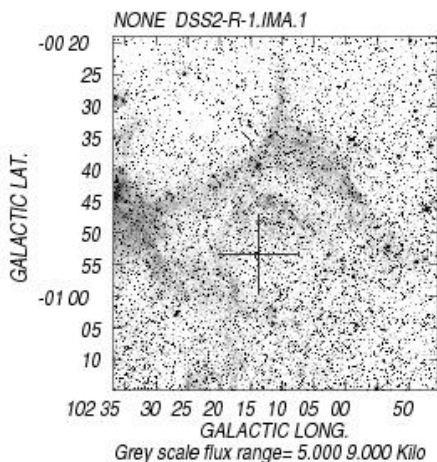
Fig. 1.



Las estrellas no siempre están ubicadas en el centro de las nebulosas anillo, sino proyectadas cerca de las regiones donde la emisión óptica es más intensa. Este hecho puede explicarse considerando que el MIE en el que se expanden las nebulosas está lejos de ser homogéneo. La nebulosa se expandirá con mayor dificultad hacia regiones de alta densidad, que corresponden a las zonas de mayor emisión óptica, dando como resultado una nebulosa donde la estrella está en una posición excéntrica, más cerca de las regiones de alta densidad que de densidad menor. La ubicación excéntrica de las estrellas puede explicarse también considerando su movimiento espacial.

Unas pocas nebulosas anillo asociadas a estrellas WR presentan una estructura de doble anillo. Estas estructuras concéntricas se han originado probablemente en diferentes etapas en la vida de la estrella: la nebulosa externa durante su fase en secuencia principal y la nebulosa interna, durante su actual fase evolutiva WR. Un ejemplo de este tipo de estructuras se muestra en la Figura 2, donde se ve la nebulosa anillo asociada a la estrella WR152.

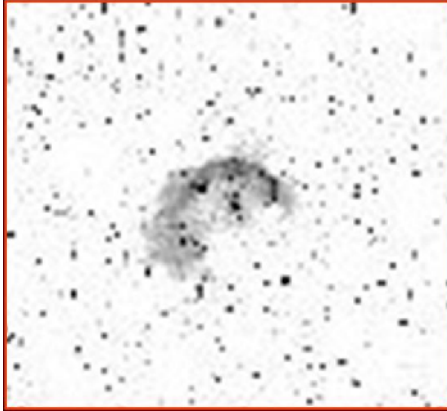
Fig. 2. La cruz indica la posición de la estrella Wolf-Rayet WR 152.



Alrededor de un 25-30% de las 240 estrellas WR galácticas conocidas están asociadas a nebulosas anillo, aunque no todas las nebulosas son tan espectaculares como las de las Figuras 1 y 2. Sus dimensiones son en todos los casos menores que 30 minutos de arco.

Al igual que las estrellas WR, las estrellas O tienen fuertes vientos estelares y un alto flujo de fotones energéticos. Podría esperarse que las estrellas O estén rodeadas de nebulosas anillo ópticas. Sin embargo, el porcentaje de nebulosas anillo identificadas alrededor de estrellas O es mucho menor que el correspondiente a estrellas WR, y las primeras no están tan bien definidas morfológicamente como las asociadas a estrellas WR. Estas características pueden vincularse al hecho de que las estrellas WR son más evolucionadas, y sus vientos estelares son más intensos que los de las estrellas O. La Fig. 3 muestra la nebulosa óptica asociada a la estrella O LSS 1887, en la región de Carina a una distancia de 3 kpc.

Fig. 3.

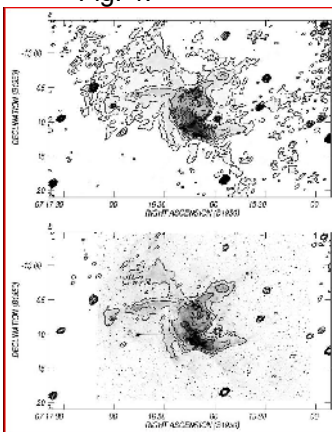


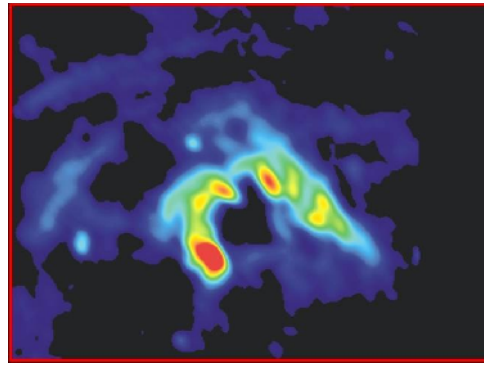
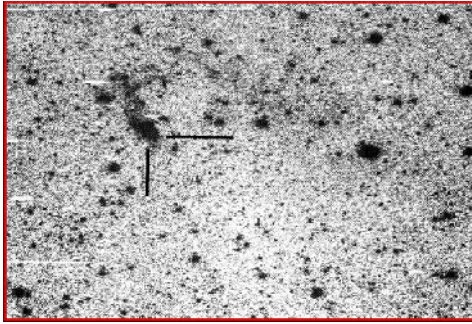
Burbujas interestelares en el continuo de radio

Las nebulosas anillo pueden identificarse también por su emisión en otros rangos del espectro electromagnético. Los electrones libres radían al ser acelerados en el campo coulombiano de los iones (radiación térmica) y esta emisión de baja energía se detecta en el continuo de radio. Para detectar y analizar la distribución de esta emisión deben utilizarse radiotelescopios que provean observaciones con muy buena resolución angular y buena sensibilidad, como el interferómetro de síntesis de apertura Very Large Array (VLA), ubicado en Nuevo México, USA. Este instrumento permite llevar a cabo observaciones con resoluciones angulares menores o del orden del minuto de arco a longitudes de onda $\lambda = 21$ cm.

El panel izquierdo de la Figura 4 muestra la emisión en el continuo de radio en 1465 MHz ($\lambda = 21$ cm) de NGC2359, obtenida con el VLA por miembros del Grupo de Estrellas masivas y Medio Interestelar del IAR. La emisión en el continuo de radio coincide en posición con la emisión en el óptico, mostrando la misma estructura de cáscara central y las extensiones hacia el sur, este y oeste. Hay una clara correspondencia morfológica entre las emisiones en el óptico y en el continuo de radio. El panel derecho de la figura muestra el caso de la nebulosa alrededor de la estrella WR 101, tanto en el óptico como en el continuo de radio. En esta segunda nebulosa la correspondencia entre emisión en el óptico y en radio es también muy buena.

Fig. 4.





Las observaciones en el continuo de radio permiten determinar la densidad electrónica y la masa de gas ionizado en las nebulosas, siempre que se conozca la distancia por algún otro método. A diferencia del caso de la emisión en el rango óptico, la emisión en ondas de radio a estas frecuencias no se ve afectada por problemas de absorción interestelar, permitiendo ver a través del polvo interestelar.

Burbujas interestelares en rayos X

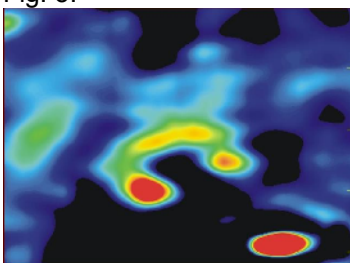
La temperatura del interior de la burbuja interestelar es de $10^6 - 10^7$ K. El gas a estas temperaturas emite radiación X blanda, por lo que el interior de las nebulosas anillo debería detectarse en rayos X. Sin embargo, de las cuatro nebulosas anillo típicas observadas por el satélite de rayos X ROSAT, sólo dos fueron detectadas.

La luminosidad en la banda X de estas dos nebulosas es un orden de magnitud menor que la predicha por los modelos teóricos. La distribución de brillo superficial tampoco coincide con las predicciones teóricas, dado que la emisión en rayos X es mayor en el borde de la nebulosa cuando debería ser mayor en el centro.

Burbujas interestelares en el infrarrojo lejano

Los fotones ultravioletas son absorbidos por los granos de polvo interestelar mezclado con el gas ionizado y con el gas neutro, y reemiten la radiación en longitudes de onda correspondientes al infrarrojo lejano, que corresponde a longitudes de onda mayores que $30\mu\text{m}$. Esta radiación puede detectarse, por ejemplo, en las imágenes del satélite IRAS en 60 y $100\mu\text{m}$, a partir de las que puede estimarse la masa de polvo interestelar presente y su temperatura de color. La Fig. 5 muestra la emisión en el infrarrojo en $60\mu\text{m}$ correspondiente a la nebulosa asociada con WR 101.

Fig. 5.



La radiación emitida en estas longitudes de onda coincide en el caso mostrado con la emisión del gas ionizado. Los granitos de polvo interestelar mezclados con el gas ionizado que pueden sobrevivir en el inhóspito medio ionizado tienen medidas relativamente grandes. Los granos más pequeños, como veremos en la segunda parte de este artículo (a publicarse en el próximo número), sólo sobreviven en las densas envolturas de gas neutro que rodean a las burbujas ionizadas.

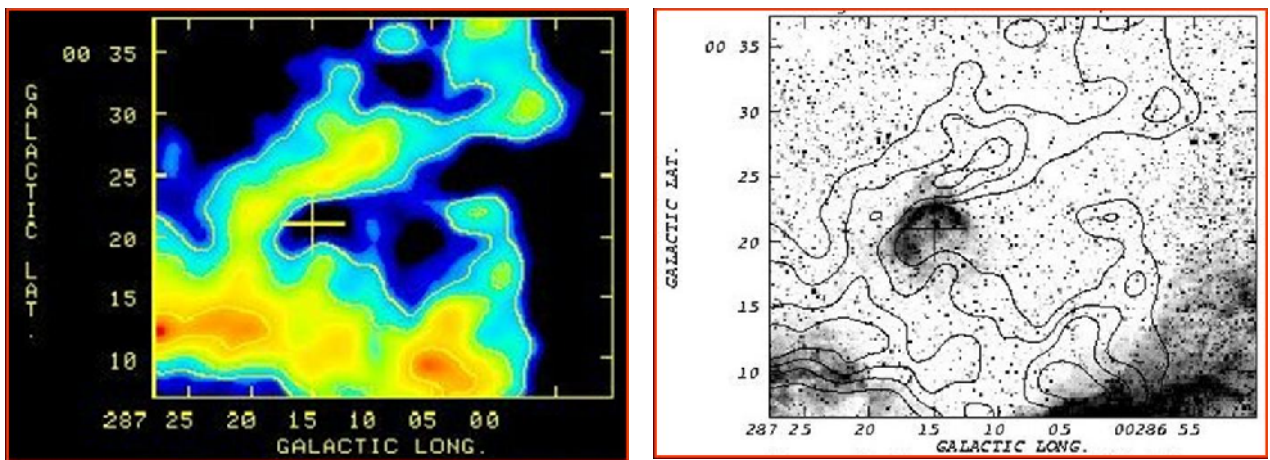
¿Cómo se ven las burbujas interestelares en hidrogeno neutro?

Los fotones ultravioletas emitidos por las estrellas ionizan el hidrogeno neutro presente en la nube hasta una cierta distancia de la estrella central, llamado radio de Stromgren. Más allá de esta distancia, el gas

atómico permanece neutro, dado que se han consumido los fotones ionizantes disponibles. Los átomos de hidrógeno neutro (HI) originan emisión en la línea espectral de $\lambda = 21$ cm (1420 MHz). Esta emisión puede detectarse desde tierra por medio de radiotelescopios, al igual que la emisión en el continuo de radio. A diferencia de los datos en el continuo de radio, las observaciones de la línea del HI, al igual que las de cualquier línea espectral, permiten analizar tanto la distribución como la cinemática del gas, es decir podemos saber dónde está ubicado el HI y cómo se mueve en relación al observador. Entonces, se pueden utilizar observaciones de esta línea espectral para conocer la distribución espacial y en velocidad del HI asociado a las nebulosas anillo.

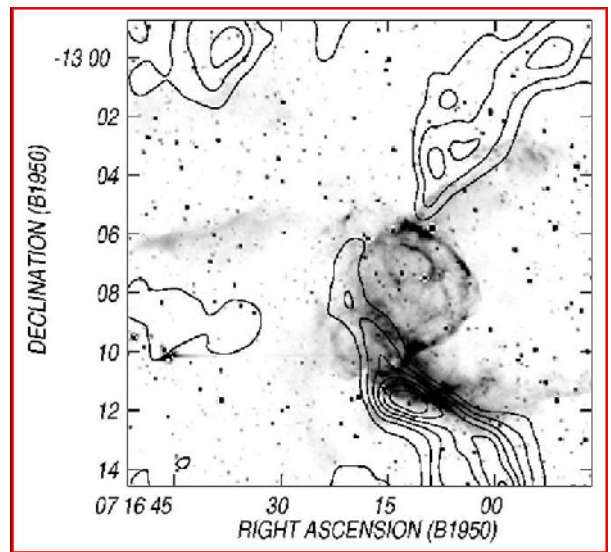
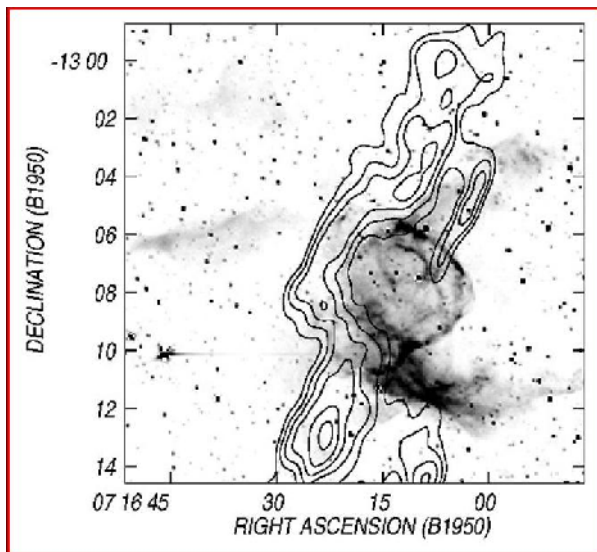
El análisis de la distribución de la emisión de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro ha permitido identificar las contrapartes neutras de las nebulosas anillo ópticas. En la región central, más cercana a la estrella, el hidrógeno está ionizado, y no hay hidrogeno neutro, mientras que a distancias mayores que el radio de Stromgren, el hidrógeno está en estado neutro. La distribución de la emisión de la línea de 21 cm debería mostrar, entonces, una región central sin emisión rodeada por una región externa de emisión. Estas regiones se identifican como cavidades centrales y envolturas externas en la distribución de la emisión de la línea de 21 cm del HI.

La primera de estas burbujas interestelares de hidrógeno neutro fue detectada utilizando observaciones obtenidas con el radiotelescopio del Instituto Argentino de Radioastronomía, en dirección de la estrella WR θ Mus y de su nebulosa anillo óptica, y dio origen a una línea de investigación que se desarrolló posteriormente en nuestro instituto. Una de estas estructuras, que podemos llamar burbujas interestelares de hidrogeno neutro, se identifica en la Figura 1.



El panel izquierdo de la figura muestra la distribución del hidrógeno neutro alrededor de la estrella O LSS 1887, indicada por la cruz. Las regiones negras y azules en la figura indican áreas de baja emisión, mientras que las áreas en celeste, verde, amarillo y rojo, regiones de mayor emisión, siendo las regiones en rojo las de mayor emisión. En la imagen se puede identificar la cavidad central y la envoltura de HI que la rodea, con la estrella dentro de la cavidad central. El panel derecho muestra la superposición de la nebulosa anillo óptica (que se mostró en la Parte 1 de este artículo) con la distribución del HI, indicada por los mismos contornos del panel izquierdo. La nebulosa ionizada se ve proyectada dentro de la cavidad, tal como se esperaba.

La Figura 2 corresponde a otro ejemplo de burbuja interestelar de HI. El panel izquierdo muestra la nebulosa NGC 2359 en tonos de grises. Los contornos superpuestos corresponden al HI a +67 km/s. La imagen de la derecha muestra contornos que corresponden a la distribución del HI con velocidad de +54 km/s. En ambas imágenes, el HI rodea a la nebulosa óptica. Es notable la correspondencia morfológica entre el HI y el gas ionizado. Ambas imágenes muestran el HI asociado a la nebulosa.



El análisis de la distribución de HI en la vecindad de numerosas nebulosas anillo ópticas muestra que éstas aparecen rodeadas por gas atómico neutro.

Considerando la velocidad central a la que se detecta la envoltura de HI y utilizando el modelo de rotación circular galáctica, puede determinarse su distancia cinemática. La coincidencia (dentro de los errores) entre la distancia cinemática de la estructura de HI y la distancia espectrofotométrica de la estrella central indica que la envoltura de HI está asociada a la nebulosa ionizada y a la estrella.

El comportamiento de la distribución del HI con la velocidad muestra que las burbujas interestelares de HI se expanden en el medio que las circunda. A partir de estos estudios puede determinarse también la masa de HI asociada y su densidad en la cáscara. Conociendo el radio y la velocidad de expansión puede estimarse la edad de la burbuja interestelar.

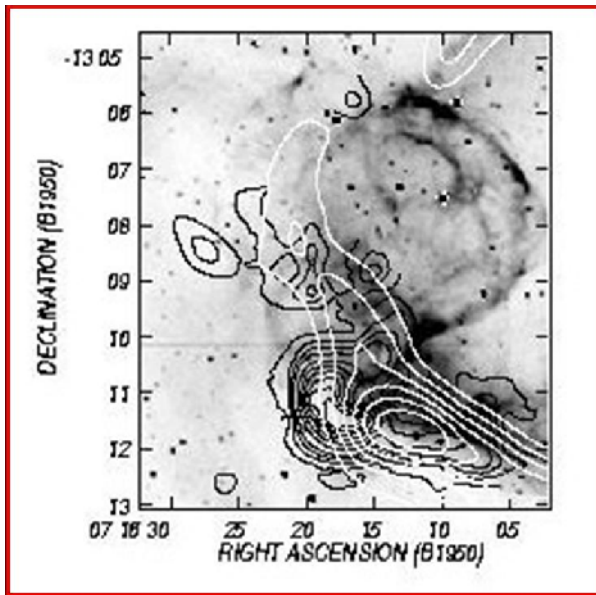
Al presente se han encontrado burbujas interestelares de HI alrededor de unas 35 estrellas WR galácticas y de unas 15 estrellas O. Las principales características de estas estructuras son:

- a) La mayoría de estas burbujas de HI tienen radios en el rango 3-40 pc y velocidades de expansión bajas, entre 5 y 15 km/s.
- b) En todos los casos, las nebulosas ópticas, y por tanto la emisión en el continuo de radio, aparecen confinadas dentro de las burbujas de HI.
- c) Las edades derivadas para las burbujas interestelares de HI son mayores que la duración de la fase WR de una estrella de alta masa. Esto indica que el viento estelar de la estrella O progenitora de la que hoy vemos como estrella WR, también ha contribuido en la formación de las burbujas interestelares.
- d) Se han encontrado burbujas interestelares de HI alrededor de estrellas que no tienen una nebulosa anillo óptica asociada. Es probable que las nebulosas ópticas, y sus contrapartes en el continuo de radio, se detecten únicamente en regiones en las que la densidad ambiental es relativamente alta.
- e) Las estrellas de alta masa asociadas se ubican en una posición excéntrica dentro de las burbujas de HI.

Numerosas burbujas interestelares de HI tienen características que difieren de las predicciones de los modelos evolutivos, como la presencia de cavidades de HI dobles y burbujas que se alejan mucho de la esfericidad. Las primeras podrían explicarse considerando un viento estelar asimétrico, mientras que las segundas pueden deberse a la presencia de un MIE no homogéneo en densidad, a una estrella con alta velocidad, o a la acción del campo magnético interestelar.

Observaciones en líneas moleculares

La distribución del gas molecular en la vecindad de las nebulosas anillo puede conocerse a partir de la emisión de moléculas *trazadoras* del hidrógeno molecular (H_2), principal componente de las nubes moleculares. El monóxido de carbono (CO) es un muy buen trazador del H_2 . A partir del análisis de la emisión de las líneas del CO puede conocerse la cantidad de gas molecular asociado y su cinemática.



Sólo unas pocas nebulosas anillo tienen estudios detallados en líneas moleculares. Una de estas nebulosas es NGC 2359. La Figura 3 muestra la distribución del gas ionizado (en escala de grises), atómico neutro (HI, en líneas de contorno blancas) y molecular (en líneas de contorno negras). La distribución del HI muestra la componente a +54 km/s, que rodea la burbuja interestelar óptica por el sur y el oeste. La emisión de CO coincide espacialmente y en velocidad con la emisión de HI. La comparación entre la distribución del gas ionizado, atómico neutro y molecular es consistente con la existencia de una región de fotodisociación en la interfase entre el gas ionizado y la nube molecular adyacente.

Observaciones de moléculas más complejas en dirección a esta nebulosa han puesto en evidencia también la presencia de frentes de choque originados en el viento estelar. Está claro que tanto las regiones de fotodisociación como los frentes de choque están presentes.

Quedan muchos interrogantes sin responder sobre estas burbujas interestelares. Son necesarios más estudios de líneas moleculares para investigar el origen del gas molecular y los procesos que originan la emisión, así como las características de las regiones de fotodisociación. Estos análisis, junto con estudios de alta resolución en el continuo de radio y en la línea de 21 cm, son necesarios también para conocer las condiciones energéticas en estas nebulosas.

Un punto importante es la presencia de regiones de formación estelar en las cáscaras neutras, donde la compresión del gas producida por la expansión de la burbuja interestelar favorecería la formación estelar a través del proceso de recolección y colapso.

El grupo de Estrellas Masivas y Medio Interestelar de nuestro instituto (GEMMI) trabaja activamente en todos estos campos.