

Vientos estelares y su interacción con el medio circundante

Por Dra. Cristina Cappa,

Instituto Argentino de Radioastronomía y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata; Investigadora Independiente del CONICET.

Las estrellas de alta masa, 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 a Charles Wolf y Georges Rayet, quienes las descubrieron en 1867. Las teorías evolutivas 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 ionizado, resultado de los procesos de nucleosíntesis estelar. Muchas de sus líneas espectrales muestran también el perfil *P Cygni*, característico de estrellas con vientos estelares. Debido a su alta temperatura, gran parte de su radiación es emitida en el rango ultravioleta del espectro electromagnético. Tanto los fotones energéticos que emiten como su intenso viento estelar, modifican el medio interestelar (MIE) circundante. Veamos brevemente la acción de estos dos mecanismos sobre el MIE.

El material en la vecindad de estas estrellas 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) ubicados en los alrededores de la estrella, arrancándoles su único electrón. Se forma así una región de gas ionizado (región HII), constituida 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 interfases entre el gas ionizado y el gas molecular.

El viento estelar está compuesto por átomos

Los fotones energéticos y el intenso viento estelar que emiten las estrellas *Wolf-Rayet* modifican el Medio Interestelar circundante. El viento empuja el material presente en los alrededores de la estrella y forma una cavidad central de muy baja densidad y alta temperatura, rodeada por una envoltura ionizada en expansión. Estas estructuras se denominan *burbujas interestelares*.

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 alta 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. 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 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 $E_k = (M v^2 t) / 2$ entregada al MIE por una estrella WR a través de su fuerte 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 WR de la estrella. Para $t = 5 \times 10^5$ años, $v = 2000$ km/seg y $M = 2 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{año}$, la energía cinética entregada al MIE es $E_k = 1.4 \times 10^{50}$ erg, comparable a la energía entregada instantáneamente durante una explosión de supernova. A diferencia de la explosión de supernova, la estrella entregará esta energía a lo largo de un periodo de unos 500.000 años. Este fuerte viento estelar empuja el material interestelar presente en los alrededores de la estrella, formando una cavidad central 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**.

Nebulosas anillo ópticas

En el rango óptico, estas nebulosas ionizadas se identifican por su aspecto de anillo. El panel izquierdo de la **Figura 1** muestra una imagen de la emisión en la línea H de la nebulosa NGC 2359, asociada a la estrella WR HD 56925. Esta nebulosa anillo está ubicada a una distancia de 5 kpc (16.300 años luz) del Sol, en el brazo espiral de Perseo de nuestra Vía Láctea. 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. Hacia el este y el oeste se ve emisión proveniente de regiones ionizadas de más baja densidad.

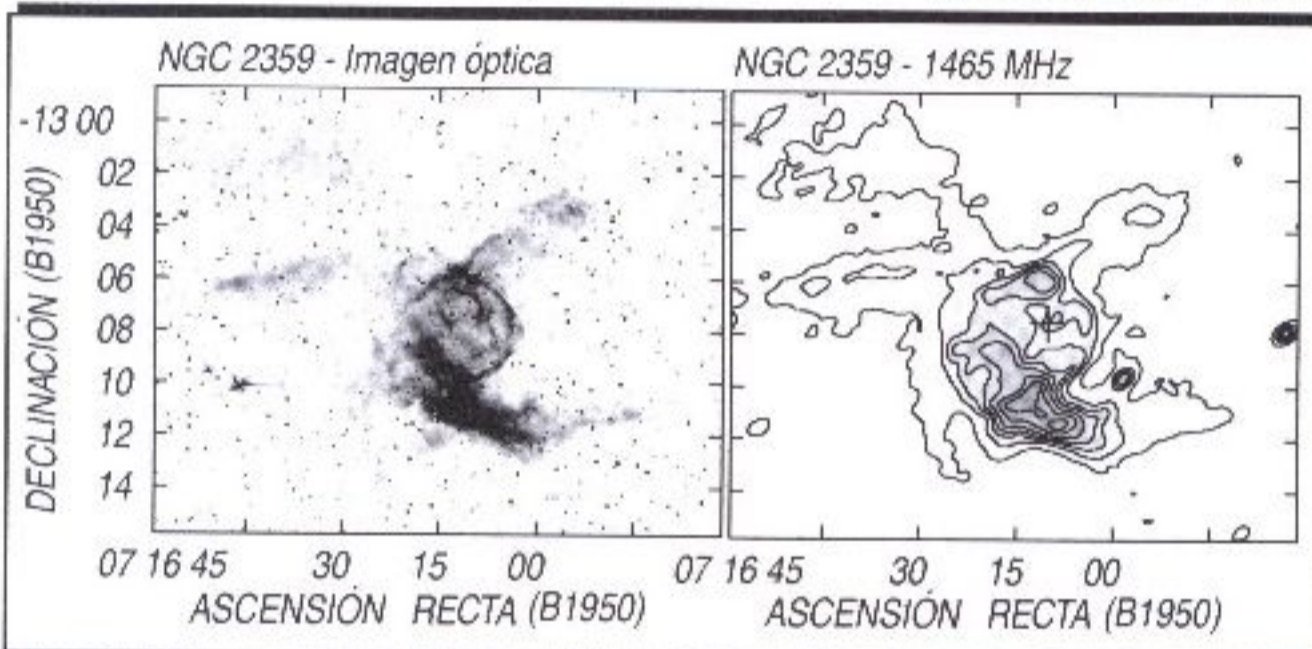


Figura 1: Panel izquierdo: Imagen en H de la nebulosa anillo NGC 2359 tomada con el telescopio del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, Chile. Panel derecho: Emisión en el continuo de radio en 1465 MHz obtenida con el VLA. La resolución angular de la imagen es de 45 segundos de arco. La cruz indica la posición de la estrella WR.

El panel izquierdo de la **Figura 2** muestra la nebulosa anillo alrededor de la estrella WR HD 92809, ubicada en la región de Carina, a 2.5 kpc (8150 años luz) 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 y ionizado por los fotones ultravioletas. El aspecto filamentario denota la presencia

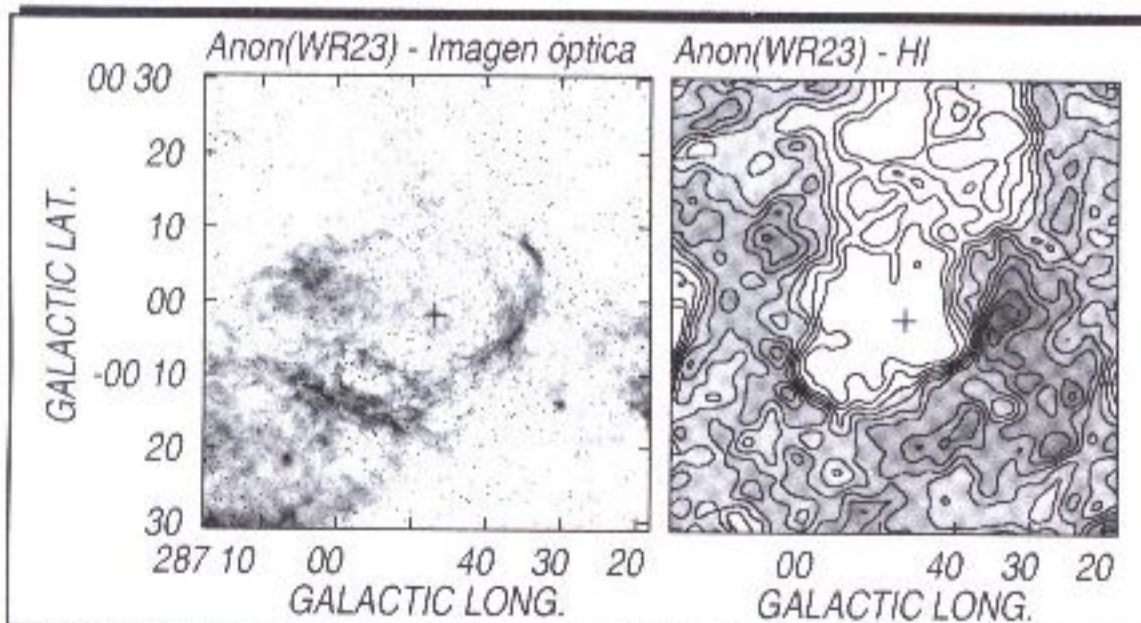


Figura 2: Panel izquierdo: Imagen óptica de la nebulosa anillo alrededor de HD 92809 (WR23). Panel derecho: Distribución de la emisión de HI en el rango de velocidades entre -25 y -12 km/s. La cruz indica la posición de la estrella WR.

de frentes de choque originados en la interacción entre el viento estelar y el gas circundante. Diversos estudios de espectroscopía nebulosa mostraron que el gas ionizado en NGC 2359 se expande en el medio que la rodea con una velocidad de 15 km/seg.

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.

Alrededor de un 25-30% de las 220 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 producen 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 este tipo de estrellas 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.

Emisión en el continuo de radio

Las nebulosas anillo pueden identificarse también por su emisión en otros rangos del espectro electromagnético. Los electrones libres radian 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, Estados Unidos. Este instrumento permite llevar a cabo observaciones con resoluciones angulares del orden del minuto de arco o menores a longitudes de onda $\lambda = 21$ cm.

El panel derecho de la **Figura 1** muestra la emisión en el continuo de radio en 1465 MHz ($\lambda = 21$ cm) de NGC 2359, obtenida con el VLA. 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.

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 a través de 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.

Emisión 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 de hidrógeno neutro

Los átomos de hidrógeno neutro (HI) originan la emisión en la línea espectral de 21 cm (1420 MHz). A diferencia de los datos del 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. Así 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. La primera de estas burbujas interestelares de hidrógeno neutro fue detectada utilizando observaciones obtenidas con el radiotelescopio del Instituto Argentino de Radioastronomía (**foto página 15**), en dirección de la estrella WR Mus (*theta muscae*) y de su nebulosa anillo óptica.

El panel derecho de la **Figura 2** muestra la burbuja interestelar de HI encontrada alrededor de HD 92809 en el rango de velocidades entre -22 y -12 km/s. Se identifica la región de baja emisión de HI donde está ubicada la estrella WR y la nebulosa óptica, rodeada por una cáscara de mayor emisión de HI. La **Figura 3** muestra la distribución de HI alrededor de NGC 2359 a una velocidad de $+63$ km/s. La emisión de HI bordea la emisión óptica. Es notable la correspondencia morfológica entre el HI y el

gas ionizado a $+63$ km/s. El análisis de la distribución de HI en la vecindad de nebulosas anillo ópticas muestra que éstas aparecen rodeadas por gas atómico neutro. La presencia de estas cáscaras de HI alrededor de las nebulosas ópticas indica que el frente de ionización ha quedado atrapado en la envoltura neutra.

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 WR, 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 dinámica de la burbuja interestelar.

Al presente, se han encontrado burbujas interes-

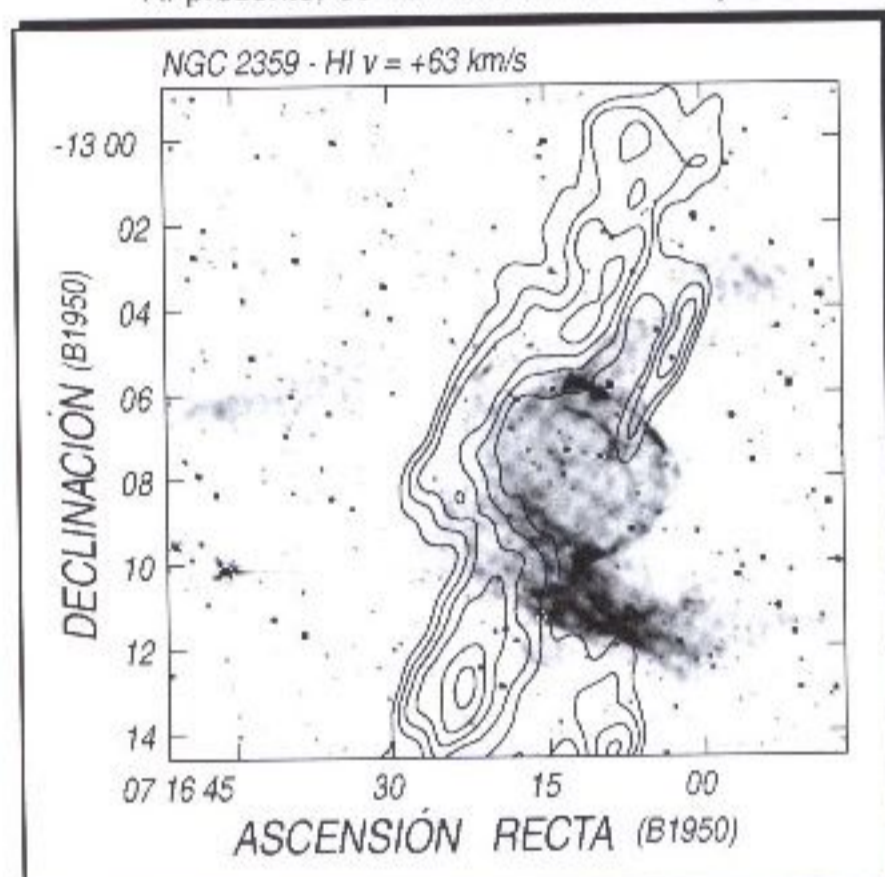


Figura 3: Distribución de la emisión de HI alrededor de NGC 2359 a una velocidad de $+63$ km/s obtenida con el VLA.

telares de HI alrededor de unas 35 estrellas WR galácticas. Las principales características de estas estructuras son:

- La mayoría de estas burbujas de HI tienen radios en el rango 3-40 parsecs y velocidades de expansión bajas, entre 5 y 15 km/s.
- 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.
- Las edades dinámicas 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.
- Se han encontrado burbujas interestelares de HI alrededor de estrellas WR 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 de relativamente alta densidad.
- Las estrellas WR se localizan en una posición

excéntrica dentro de las burbujas de HI.

Se han encontrado también burbujas interestelares de HI con 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.

Emisión 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. Esta radiación puede detectarse, por ejemplo, en las imágenes del satélite IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) en 60 y 100 μm , a partir de las que puede estimarse la masa de polvo interestelar presente y su temperatura de color.

La radiación emitida en estas longitudes de onda coincide tanto con la emisión del gas ionizado en las nebulosas anillo ópticas como con las burbujas interestelares de HI. Los granitos de polvo interestelar mezclados con el gas ionizado tienen temperatura de color más alta que los mezclados con el gas neutro.

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



Los radiotelescopios del Instituto Argentino de Radioastronomía, gracias a los cuales fue detectada por primera vez una burbuja interestelar de hidrógeno neutro.

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 4** muestra la distribución del gas ionizado (en escala de grises), atómico neutro (HI, en líneas de contorno negras) y molecular (en líneas de contorno blancas). 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 las tres distribuciones 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 PDRs (regiones de fotodisociación) como los frentes de choque están presentes.

Quedan muchos interrogantes aún 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. Por otro lado, casi no se ha analizado la presencia de regiones de formación estelar en las cáscaras neutras, donde la compresión del gas favorecería estos procesos.

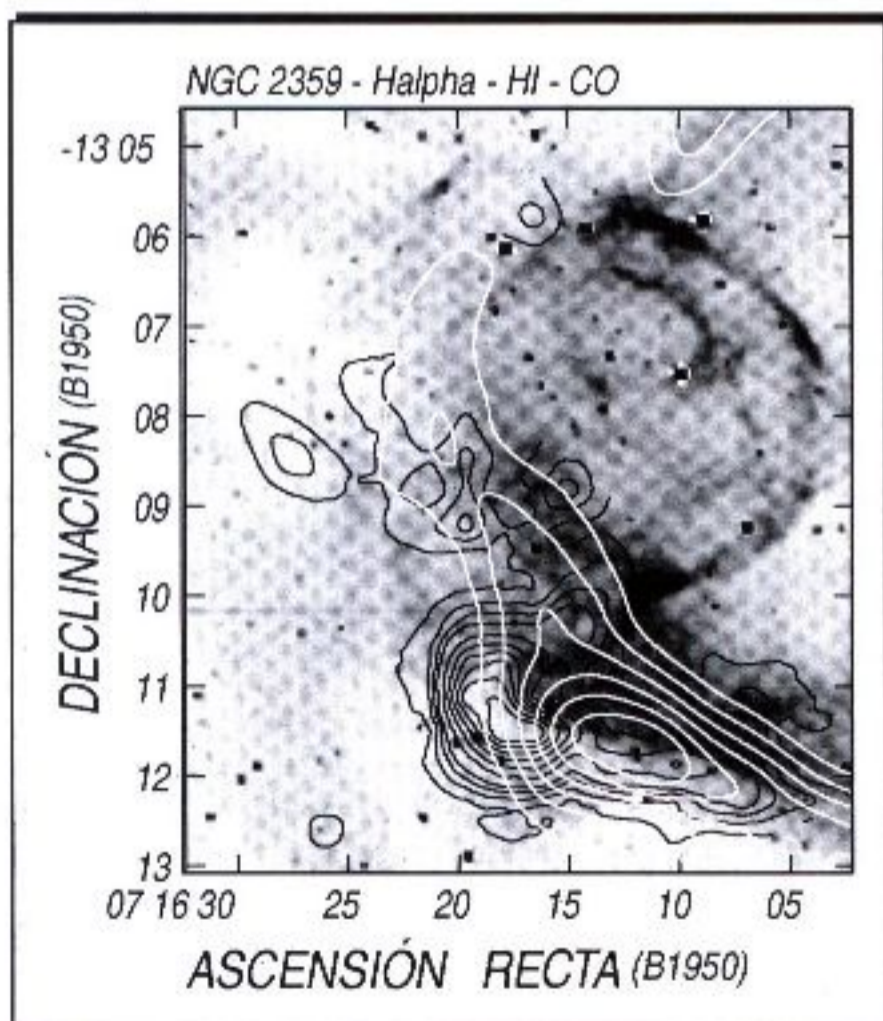


Figura 4: Superposición de la emisión óptica de NGC 2359 (en escala de grises) con la emisión del HI a +54 km/s (en contornos negros) y la emisión de la molécula de CO a la misma velocidad (en contornos blancos).