

# Interacción entre el RSN G359.1-0.5 y el medio interestelar

L.K. Eppens<sup>1,3</sup>, E.M. Reynoso<sup>1</sup>, J.A. Combi<sup>2,3</sup> & J. Lazendic-Galloway<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA, Argentina

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>4</sup> School of Physics and Astronomy, Monash University, Melbourne, Australia

Contacto / laukar23@gmail.com

**Resumen** / G359.1-0.5 es un remanente de supernova detectado en dirección al centro de la Galaxia que presenta una morfología del tipo cáscara en el continuo de radio y emisión de rayos X extendida de naturaleza térmica en su interior, por lo cual se lo clasifica como perteneciente al tipo de morfología mixta. Los valores de la densidad columnar de H obtenidos sugieren que este remanente está ubicado a una distancia muy cercana al centro de la Galaxia. Los primeros estudios moleculares alrededor de G359.1-0.5 muestran que existe una estructura anular de CO en el rango de velocidades entre  $-190$  y  $-60$   $\text{km s}^{-1}$ , coincidente con una nube de HI a velocidades similares, concéntrica con el remanente. Sobre el borde de la cáscara de continuo de radio se detectaron seis máseres de OH a 1720 MHz a velocidades cercanas a  $-5$   $\text{km s}^{-1}$ , muy distintas de las encontradas en estudios moleculares anteriores. En este trabajo se identificó una estructura molecular en las líneas de  $^{12}\text{CO}$  y  $^{13}\text{CO}$  J=1-0 a velocidades entre  $-12.48$  y  $+1.83$   $\text{km s}^{-1}$  con grumos en su interior que aparentemente se encuentran asociados a los máseres de OH. Además, el análisis de los datos de archivo del observatorio XMM-Newton arrojó evidencias de que el gas situado en el interior de G359.1-0.5 no se encontraría en equilibrio de ionización. Finalmente, con los resultados obtenidos se introduce un posible escenario astrofísico para el remanente de supernova G359.1-0.5.

**Abstract** / G359.1-0.5 is a supernova remnant near the Galactic center region that belongs to the mixed morphology type, showing a radio continuum shell and diffuse thermal X-ray emission inside. Earlier molecular studies around the location of G359.1-0.5 revealed an annular CO structure in the velocity range from  $-190$  to  $-60$   $\text{km s}^{-1}$  with an HI counterpart, both concentric with the remnant. Six OH masers at 1720 MHz along the edge of the radio-continuum shell were detected at velocities around  $-5$   $\text{km s}^{-1}$ , largely different from those found in previous molecular studies. In this work, we identify a molecular structure in the  $^{12}\text{CO}$  and  $^{13}\text{CO}$  J=1-0 lines between the velocities  $-12.48$  and  $+1.83$   $\text{km s}^{-1}$  which contains CO clumps apparently related to the OH masers. In addition, analyzing XMM-Newton archival data, we found evidence that part of the interior gas is not in ionization equilibrium. Finally, based on the collected data, we suggest a likely astrophysical scenario for G359.1-0.5.

**Keywords** / ISM: clouds — ISM: individual objects (G359.1-0.5) — ISM: molecules — ISM: supernova remnants — X-rays: ISM — radiation mechanisms: thermal

## 1. Introducción

El remanente de supernova (RSN) G359.1-0.5 es clasificado como perteneciente al tipo de morfología mixta (MM; Rho & Petre, 1998) por presentar emisión no térmica ( $\alpha = -0.37$ ; Reich & Fuerst, 1984) con forma de cáscara en la banda de radio y emisión térmica de rayos X en su interior (Egger & Sun, 1998). Está situado en dirección al centro de la Galaxia (Altenhoff et al., 1979), donde se observan otras fuentes peculiares. Entre ellas se pueden encontrar el radio púlsar conocido como *Mouse* hacia el este de la cáscara, cuya posible vinculación al RSN fue descartada (Hales et al., 2009), y el filamento de emisión no térmica conocido como *Snake* (Gray et al., 1991) hacia el noroeste, cuyo nombre se debe a su morfología curvada y con quiebres. Este filamento cruza el borde del remanente pero su posible interacción todavía permanece en duda (Uchida et al., 1992a) ya que podrían coincidir en proyección pero encontrarse a distintas distancias.

La primera detección de CO hacia el centro de la Ga-

laxia reveló un gran estructura molecular entre las velocidades de  $-190$  y  $-60$   $\text{km s}^{-1}$  que en proyección posee una forma anular concéntrica con G359.1-0.5 (Uchida et al., 1992a), por lo que se pensó que podrían estar asociadas. Posteriormente, Uchida et al. (1992b) encontraron una contrapartida en la línea del HI al anillo de CO a velocidades similares.

Este RSN fue detectado por primera vez en rayos X con el telescopio ROSAT (Egger & Sun, 1998). Subsiguientes observaciones obtenidas con el instrumento ASCA (Bamba et al., 2000) permitieron realizar el primer estudio espectral sugiriendo que la emisión X se encuentra en equilibrio de ionización. Contrariamente, el análisis de las observaciones del satélite Suzaku (Uchida et al., 1992a) parece indicar que se trata de un gas en equilibrio altamente sobre-ionizado.

Los resultados del ajuste espectral en X indican que la densidad columnar de hidrógeno ( $2 \times 10^{22}$   $\text{cm}^{-2}$ ) se corresponde con los valores encontrados para otras fuentes situadas en el entorno del centro de la Galaxia (Sakano

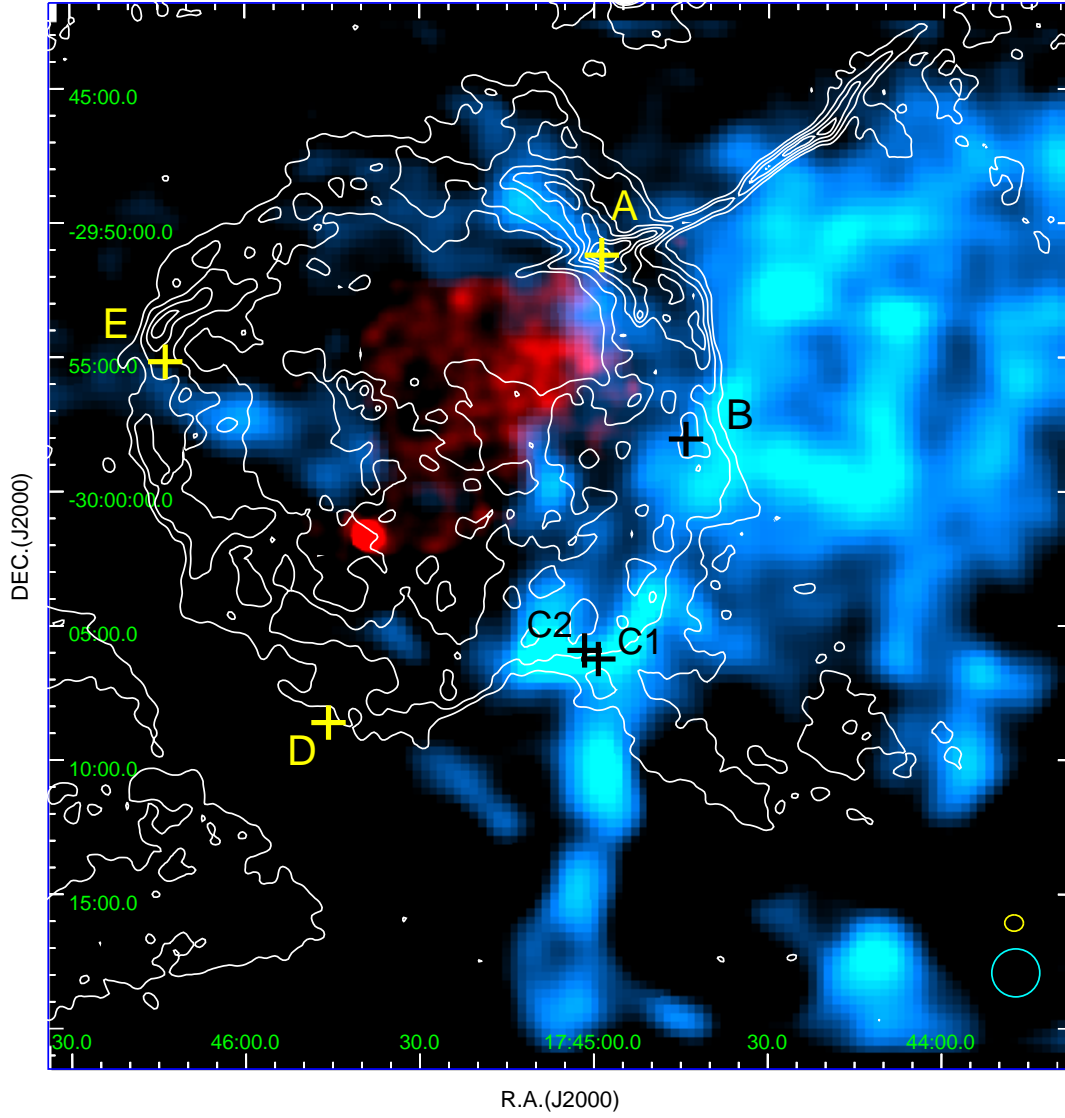


Figura 1: Mapa combinado de la distribución de  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  integrando entre  $-12.48$  y  $+1.83$   $\text{km s}^{-1}$  en color celeste en unidades de  $\text{mJy beam}^{-1}$  (el tamaño del haz de  $53''.6 \times 53''.6$  es indicado con un círculo celeste) y de la emisión en rayos X del gas interior en el remanente entre  $0.8 - 7.0$  keV en color rojo. Se encuentran superpuestas la emisión del continuo de radio de G359.1-0.5 a  $1.5$  GHz en contornos blancos a  $0.007, 0.0011, 0.002, 0.003, 0.005, 0.006, 0.009$   $\text{mJy beam}^{-1}$  (el tamaño del haz de  $20''.87 \times 18''.20$ , P.A. $=-180^\circ.5$  es indicado con una elipse amarilla) y las posiciones de los máseres A, D y E con cruces amarillas y B, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> con cruces negras.

et al., 1999). Además, el estudio de la absorción de HI en dirección a la fuente indica que su distancia estaría en el rango de  $8 - 10.5$  kpc (Uchida et al., 1992a). En este trabajo se adopta el valor de  $8.5$  kpc como la distancia al RSN.

Yusef-Zadeh et al. (1995) encontraron seis máseres de OH a  $1720$  MHz a lo largo de la cáscara del remanente a una velocidad promedio de  $-5$   $\text{km s}^{-1}$ , los cuales no concordaban con las velocidades reportadas previamente para el anillo de CO.

En este trabajo estudiamos la emisión de  $^{12}\text{CO}$  y  $^{13}\text{CO}$   $J=1-0$  en dirección a G359.1-0.5 con el propósito de identificar gas molecular que pudiera estar asociado a

los máseres de OH. Además, analizamos las observaciones del satélite *XMM-Newton* para estudiar las propiedades del plasma interior e intentar contribuir con una caracterización más detallada sobre el RSN G359.1-0.5 y el medio que lo rodea.

## 2. Observaciones y reducción de datos

Las observaciones de las líneas de  $^{12}\text{CO}(1-0)$  a  $115.271204$  GHz y  $^{13}\text{CO}(1-0)$  a  $110.201353$  GHz fueron realizadas con el telescopio de  $12$  Metros ubicado en Kitt Peak, Arizona, EE.UU. Se utilizó la técnica de observación *on the fly* cubriendo la emisión extendida en un

Tabla 1: Nubes cercanas a los máseres de OH. Se informan la velocidad media  $V_g$  de los grupos de CO y la velocidad media  $V_m$  de los máseres de OH, en el sistema LSR, así como la densidad volumétrica aproximada de cada nube  $n_{\text{H}_2}$ , tomando un distancia de 8.5 kpc.

Grupo	A	B	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
$V_g$ ( km s <sup>-1</sup> )	-5.0	-2.7	-3.1	-6.3
$V_m$ ( km s <sup>-1</sup> )	-4.5	-2.9	-3.2	-5.6
$n_{\text{H}_2}$ ( cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>

área de 38'×38'. En las observaciones se usaron dos espectrómetros centrados a  $-5.0$  km s<sup>-1</sup> con 256 canales. Para <sup>12</sup>CO y <sup>13</sup>CO se utilizaron resoluciones espectrales entre 250 y 500 kHz (0.65 y 1.3 km s<sup>-1</sup>) y entre 100 y 500 kHz (0.27 y 1.35 km s<sup>-1</sup>) respectivamente. Los datos fueron procesados con el paquete de tareas AIPS. El cubo de <sup>12</sup>CO se construyó con una resolución espacial de 53''6 × 53''6, mientras que en el cubo de <sup>13</sup>CO la resolución fue de 56''0 × 56''0.

Las observaciones de rayos X fueron extraídas de la base de datos del satélite *XMM-Newton*\* con el código de observación 0763140101. Se utilizaron las cámaras EPIC-MOS y EPIC-PN en modo *full window*, obteniendo imágenes de alta sensibilidad en el rango de energías comprendido entre 0.15 y 15 keV con resoluciones espectrales  $E/\Delta E \sim 20$ -50 y espaciales de 6''. Los datos fueron analizados con los programas HEASOFT 6.5 y *Science Analysis System* (SAS) versión 16.1.0, aplicando el algoritmo CIFBUILD para obtener los últimos archivos de calibración (*Current Calibration Files*, CCF). Los intervalos de tiempos buenos, que excluyen aquellos eventos provocados por la actividad solar, se obtuvieron extrayendo las curvas de luz por encima de los 10 keV en el campo total de cada cámara. En las observaciones encontramos emisión difusa en el interior del remanente de supernova entre 0.3 – 7.0 keV.

### 3. Resultados

#### 3.1. Emisión molecular

Con el propósito de estudiar la distribución del gas molecular con el que, de acuerdo a la presencia de los máseres de OH a 1720 MHz, se encuentra interactuando el RSN G359.1-0.5, inspeccionamos los cubos de <sup>12</sup>CO y <sup>13</sup>CO a distintas velocidades. Del análisis logramos identificar cuatro grupos próximos en velocidad y posición a los máseres A, B, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>. Se descubrió, además, que estos grupos forman parte de una extensa estructura de CO que se distribuye a lo largo del borde oeste de la cáscara del RSN y se extiende en velocidad en el rango  $-12.48 < v < +1.83$  km s<sup>-1</sup> (ver Fig. 1). No logramos encontrar estructuras moleculares que pudieran estar asociadas a los máseres D y E.

Encontramos que los grupos de CO aparecen centrados a la misma velocidad media que cada máser de OH (ver Tabla 1) y poseen densidades de H<sub>2</sub> entre 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Estos valores de densidad sugerieren que si

bien los grupos moleculares se encuentran interactuando con el frente de choque del remanente, el material molecular observado aún no ha sido chocado.

#### 3.2. Asociación entre la emisión molecular y en rayos X.

Analizando la emisión de rayos X en las bandas de 0.8 – 1.2 keV (rayos X blandos), 1.2 – 2.2 keV (rayos X medios) y 2.2 – 7.0 keV (rayos X duros), encontramos un plasma de emisión extendida. Del espectro de rayos X obtenido sobre la región interior al RSN G359.1-0.5 en el rango de 0.8-7 keV pudimos identificar tres líneas de emisión: Si XIII, Si XIV y S XV, lo cual confirma que el origen de emisión del plasma es térmico. Dejando las abundancias del S y Si como parámetros libres, el mejor ajuste fue obtenido utilizando el modelo combinado que propusieron Bamba et al. (2000), en el cual se suman un plasma frío en equilibrio (VMEKAL) y un plasma caliente fuera del equilibrio de ionización (VNEI). De los parámetros obtenidos en el ajuste, estimamos una densidad electrónica ( $n_e$ ) de 0.3 cm<sup>-3</sup>, la cual permite establecer que la edad del remanente es aproximadamente de 10 000 años.

En la Fig. 1 se puede observar que el mínimo de emisión de CO coincide con la zona de mayor emisión en la banda de rayos X. Una posible explicación a esta situación podría ser que una parte de la nube de CO se haya evaporado gradualmente en esa zona originando la emisión en rayos X del plasma caliente que se encuentra en el interior del remanente. Sin embargo, también es posible que la emisión central en rayos X se origine en el gas del RSN que ha logrado alcanzar a la nube de CO.

Estos son resultados preliminares de un trabajo en proceso. Una versión extensa de este estudio será publicada a la brevedad.

*Agradecimientos:* LKE es financiada por la beca doctoral CONICET. EMR y JAC son miembros de la Carrera de Investigador Científico de CONICET, Argentina. JAC es financiado por el PIP 0102 (CONICET), el subsidio PICT-2017-2865 (ANPCyT), la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Economía y Competitividad (AYA2016-76012-C3-3-P-MINECO) y la Consejería de Economía e Innovación. Este estudio fue parcialmente financiado por los subsidios PIP 112-201207-00226, 112-201701-00604 (CONICET) y PICT-2017-2865 (ANPCyT).

### Referencias

- Altenhoff W.J., et al., 1979, A&AS, 35, 23  
 Bamba A., et al., 2000, PASJ, 52, 259  
 Egger R., Sun X., 1998, D. Breitschwerdt, M.J. Freyberg, J. Truemper (Eds.), *IAU Colloq. 166: The Local Bubble and Beyond, Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, vol. 506, 417–420  
 Gray A.D., et al., 1991, Nature, 353, 237  
 Hales C.A., et al., 2009, ApJ, 706, 1316  
 Reich W., Fuerst E., 1984, A&AS, 57, 165  
 Rho J., Petre R., 1998, ApJL, 503, L167  
 Sakano M., et al., 1999, Adv. Space Res., 23, 969  
 Uchida K., Morris M., Yusef-Zadeh F., 1992a, AJ, 104, 1533  
 Uchida K.I., et al., 1992b, ApJ, 398, 128  
 Yusef-Zadeh F., Uchida K.I., Roberts D., 1995, Science, 270, 1801

\*<http://nxsa.esac.esa.int/nxsa-web/#search>