

Observaciones del remanente de supernova G296.5+10.0 con el satélite XMM-Newton

L.K. Eppens^{1,2}, J.A. Combi^{2,3} & E.M. Reynoso¹

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

² Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

³ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA, Argentina

Contacto / leppens@iafe.uba.ar

Resumen / G296.5+10.0 es un remanente de supernova (RSN) que presenta una morfología bilateral de $90' \times 65'$ en torno a un eje de simetría perpendicular al plano de la Galaxia en la banda de radio. El remanente muestra dos máximos de emisión en los extremos sureste y suroeste de la cáscara de radio. Además, el instrumento de rayos X EXOSAT detectó una emisión extendida entre 0.1-1.2 keV con una distribución axisimétrica similar a la encontrada en radio, cuyos máximos coinciden en posición. Además, se detectó una estrella de neutrones en el centro del RSN que no es visible en la banda de radio. En este trabajo presentamos un mosaico de cinco apuntamientos en dirección a G296.5+10.0 usando el instrumento XMM-Newton en el modo *full window*, mejorando la resolución espacial en un factor 5 con respecto a la mejor imagen obtenida hasta el momento por el instrumento EXOSAT en esta banda de energía. Estos datos muestran en detalle la emisión de rayos X asociada al remanente, donde se observa que la distribución del plasma está contenida entre los bordes de radio del RSN. Además, se observa una débil emisión de rayos X entre 0.4-2 keV que puede ser bien ajustada con un modelo de una sola temperatura en equilibrio de ionización. El estudio espectral de este gas de rayos X permitió encontrar variaciones en las abundancias de algunos metales. Finalmente, con una estimación de N_H y el exceso de color $E(B-V)$ del RSN, calculamos la distancia a la fuente utilizando un modelo de enrojecimiento vs distancia para la Galaxia.

Abstract / G296.5+10.0 is a $90' \times 65'$ -size supernova remnant (SNR) that displays a bilateral distribution in the radio band with the symmetry axis perpendicular to the Galactic Plane. The remnant shows two emission peaks at the South-East and South-West of the radio shell. In addition, the EXOSAT instrument detected an extended X-ray plasma with an axisymmetric distribution between 0.1-1.2 keV, being both the radio and X-ray emission peaks coincident in position. A neutron star was detected at the center of the SNR in the X-ray band but with no radio counterpart. In this work we present an X-ray mosaic of five pointings towards G296.5+10.0 performed with the satellite XMM-Newton in the full window mode, improving the spatial resolution by a factor of 5 as compared to the best image obtained so far by the EXOSAT instrument in this energy band. The XMM-Newton observations show in detail the X-ray emission associated with the remnant, where the distribution of the plasma is observed to be within the outermost radio continuum contours of the remnant. We also noted a weak X-ray emission between 0.4-2 keV that was well fitted using a ionization equilibrium model with a single temperature. Through a spectral X-ray study we found variations in the abundances of some metals. Finally, we calculated the distance to the SNR using N_H from our spectral study and a Galactic reddening-distance model.

Keywords / ISM: individual objects (G296.5+10.0) — ISM: supernova remnants — X-rays: ISM

1. Introducción

El RSN G296.5+10.0 presenta una morfología de tipo cáscara bilateral de $90' \times 65'$ en la banda de radio. Esta emisión se caracteriza por ser filamentaria y delgada, con un eje de simetría orientado perpendicularmente al plano de la Galaxia (Whiteoak & Gardner, 1968). Distintos autores han discutido sobre el origen de la morfología filamentaria en este remanente. Roger et al. (1988) propone que se debe a nubes chocadas del medio interestelar (MIE) vistas de canto, siguiendo el modelo de Blandford & Cowie (1982), a pesar de que no se han encontrado evidencias de que la expansión del RSN se produzca dentro de una cavidad alargada y perpendicular al plano galáctico. Por el contrario, a esas latitudes galácticas se esperaría encontrar un MIE homogéneo y de baja densidad. En estudios posteriores, se encontraron algu-

nas estructuras de H I ($-17.5 < v < -15.5 \text{ km s}^{-1}$) que podrían estar aparentemente vinculadas a G296.5+10.0 (Giacani et al., 2000).

La cáscara de radio coincide con una fuente de emisión extendida de rayos X observada con el instrumento EXOSAT entre 0.1-1.2 keV, cuyo origen es térmico con una temperatura media de $1.7 \times 10^6 \text{ K}$ y una densidad columnar de $N_H \sim 1.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$. También se observa que los máximos entre la emisión de radio/rayos X coinciden en posición al sureste y suroeste de G296.5+10.0 (Kellett et al., 1987). Por otro lado, las observaciones en la banda X revelaron la presencia de la estrella de neutrones 1E 1207.4-5209 que no es visible en radio (Zavlin et al., 1998). Este objeto estelar se encuentra ubicado cerca del centro del RSN, algo desviado hacia el este del eje principal de simetría (ver panel izquierdo en Figura 1). Además, Giacani et al. (2000) reporta una depre-

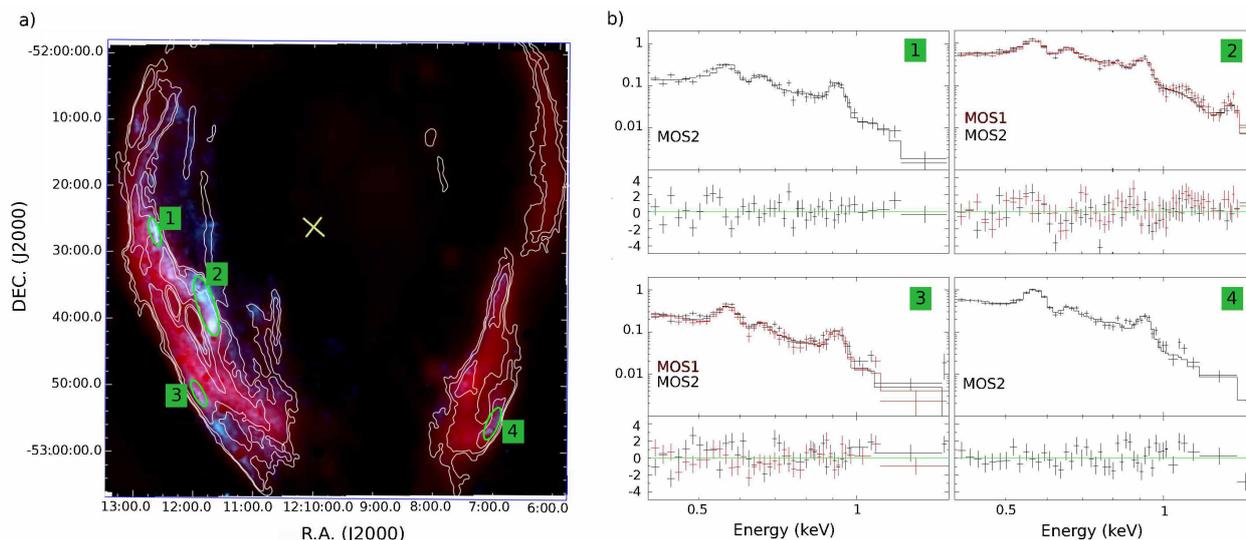


Figura 1: *Panel izquierdo*: emisión combinada de las cámaras EPIC-MOS en dirección al RSN G296.5+10.0 mostrando en rojo el continuo de radio a 1.4 GHz y en cian la banda de rayos X entre 0.4-2 keV. Las cuatro elipses verdes numeradas indican las regiones usadas del estudio espectral, mientras que la cruz amarilla indica la posición de la estrella de neutrones 1E 1207.4–5209. Los contornos blancos corresponden a la banda de radio a 0.036, 0.068, 0.12, 0.16, 0.23, 0.26 mJy haz⁻¹. *Panel derecho*: ajustes espectrales de las cuatro regiones indicadas en a) con el modelo VAPEC, señalando la(s) cámara(s) donde la emisión fue detectable en cada caso. Los datos de las observaciones de XMM-Newton se muestran con cruces y los modelos ajustados en cada región, con líneas. En cada ajuste espectral, en el panel superior se grafican los eventos en unidades de cm⁻² s⁻¹ keV⁻¹, y en el panel inferior, la variable adimensional (datos-modelo)/error.

sión de HI entre las velocidades -16.1 y -15.8 km s⁻¹ que es coincidente con la posición de esta fuente. De estos resultados se propone que la estrella de neutrones se encuentra ubicada a la misma distancia que el RSN. Usando datos de ASCA y ROSAT, Zavlin et al. (1998) encuentran que N_{H} varía entre 0.7 y 2.2×10^{21} cm⁻². Esto les permitió acotar la ubicación de la fuente estelar entre 1.6-3.3 kpc, lo que concuerda con la distancia ~ 2.1 kpc estimada para el remanente en base a las nubes de HI (Giacani et al., 2000). Suponiendo que el RSN se encuentra en la fase de expansión adiabática, se aproxima su edad en 7×10^3 años (Roger et al., 1988).

En este trabajo estudiamos la emisión de G296.5+10.0 en la banda de rayos X utilizando datos de archivo del satélite XMM-Newton. La información sobre las observaciones y el proceso de reducción está presentada en la Sección 2. De nuestro análisis logramos obtener imágenes más detalladas en comparación con estudios previos, donde se observa la distribución del plasma de rayos X dentro de la cáscara de radio (ver Sección 3.1). A su vez, en la Sección 3.2, estudiamos el espectro de cuatro regiones, mientras que en la Sección 4 estimamos la distancia al remanente mediante el método de Chen et al. (1999). Finalmente, comentamos nuestras conclusiones en la Sección 5.

2. Observaciones

Las observaciones en dirección a G296.5+10.0 fueron realizadas por el satélite XMM-Newton utilizando las cámaras MOS1 y MOS2 en el modo *full window*. Estos datos de archivo constan de cinco apuntamientos (ObsId 0781720101, 0762090201, 0762090301, 0762090401 y

0762090501), lo que permitió cubrir la mayor parte de la emisión de rayos X del remanente.

Los datos (Observation Data File - ODF) fueron calibrados usando los Current Calibration Files (CCF) y filtrados por niveles altos de fondo utilizando los paquetes de tareas SAS (Science Analysis System) y heasoft. Además, corregimos por intervalos de tiempos buenos utilizando la tarea *tabgtigen* y removimos las fuentes puntuales detectadas en cada campo de observación. Por último, construimos un mosaico de la emisión de rayos X combinando los mapas pesados por sus respectivos mapas de exposición usando la tarea *emosaic*. No se detecta emisión del remanente por debajo de los 0.4 ni por encima de 2 keV.

3. Resultados

3.1. Mosaico de rayos X.

En la Figura 1, panel izquierdo, se muestra la emisión de rayos X en dirección a G296.5+10.0 detectada por XMM-Newton, combinando las cámaras EPIC-MOS. Estos últimos datos mejoran la resolución espacial en un factor 5 respecto a las imágenes publicadas por Kellett et al. (1987) basadas en observaciones de EXOSAT. En el mapa se puede observar la distribución del plasma de rayos X entre 0.4-2 keV (cian) en relación a la emisión del continuo de radio del RSN a 1.4 GHz (rojo). Esta es la primera imagen detallada de la emisión extendida de rayos X asociada al remanente, donde observamos que esta emisión se encuentra contenida dentro de los límites de la cáscara de radio. Además, es apreciable que la emisión del plasma en el extremo oeste de la cáscara bilateral es más débil que en el extremo este. En la figura

Tabla 1: Parámetros del estudio espectral del RSN G296.5+10.0.

	Regiones			
	1	2	3	4
$N_{\text{H}}(10^{21})$	0.9±0.1	0.9±0.1	0.7±0.2	0.7±0.1
kT	0.16±0.02	0.17±0.01	0.15±0.01	0.14±0.01
O	0.4±0.1	0.4±0.2	0.3±0.1	0.4±0.2
Ne	1.2±0.2	0.9±0.1	0.8±0.1	1.1±0.1
Fe	1.4±0.5	1.1±0.1	1.2±0.4	0.8±0.5
Norm(10^{-3})	4.9±0.4	8.8±0.6	7.5±1.6	3.8±1.9
$\chi^2_{\nu}/\text{d.o.f.}$	1.1	1.4	1.2	1.1

Notes: N_{H} se encuentra en unidades de cm^{-2} , kT es la temperatura electrónica en unidades de keV y Norm es la normalización del modelo ajustado en cada región.

se puede verificar que la zona de emisión más intensa de rayos X forma un arco que coincide con el borde interno de la cáscara de radio al sureste del RSN.

3.2. Estudio espectral.

Con el propósito de caracterizar la emisión de rayos X en dirección al RSN G296.5+10.0, seleccionamos las regiones más intensas del plasma y extrajimos cuatro espectros de los archivos de eventos filtrados de las cámaras EPIC-MOS. En la Figura 1, panel izquierdo, se muestran las cuatro elipses numeradas que utilizamos para el análisis espectral.

En estudios previos se propuso que el plasma es de origen térmico, por ende comenzamos nuestro análisis ajustando un modelo en equilibrio de ionización por colisiones (VAPEC) corregido por el modelo de absorción de *Tuebingen-Boulder* (TBABS; Wilms et al., 2000). En las regiones 1 y 4 se pudo utilizar solamente la cámara MOS2, mientras que en las regiones 2 y 3 se detecta emisión en ambas cámaras EPIC-MOS. En estos últimos dos casos, los valores estimados del modelo VAPEC son el resultado de la media entre los ajuste espectrales de MOS1 y MOS2.

Los mejores ajustes se obtuvieron liberando las abundancias de oxígeno (O), neón (Ne) y hierro (Fe) y fijando a valores solares las abundancias del resto de los elementos. Los ajustes espectrales de cada región entre 0.4-2 keV se muestran en la Figura 1, panel derecho. Además, los parámetros obtenidos para cada estudio espectral se encuentran listados en la Tabla 1. Como resultado del análisis, encontramos una leve variación de N_{H} ($0.7\text{-}0.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) y de la temperatura electrónica (0.14-0.17 keV) a lo largo del RSN.

4. Distancia al RSN G296.5+10.0

Giacani et al. (2000) encuentran una nube de HI a $v = -16 \text{ km s}^{-1}$ lindante con G296.5+10.0 y sugieren que ambas fuentes están vinculadas. En base a esto, proponen que el RSN se encuentra a una distancia cercana de $2.1^{+1.8}_{-0.8}$ kpc utilizando el modelo de rotación galáctica de Fich et al. (1989, con $\Theta_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ y $R_0 = 8.5 \text{ km s}^{-1}$).

En este trabajo nos proponemos obtener un nuevo valor de distancia utilizando el método de Chen et al.

(1999) donde se puede asociar el exceso de color E(B-V) de una fuente con su distancia. Los detalles de la aplicación de este método se encuentran en Reynoso et al. (2017). Por un lado, el enrojecimiento total producido por el plano galáctico en la dirección de G296.5+10.0 hasta el borde de la Galaxia es de $E(B-V)_{\infty} = 0.136 \text{ mag}$ (Schlafly & Finkbeiner, 2011). Por otro lado, el valor de E(B-V) se obtiene de la densidad columnar N_{H} del estudio espectral en rayos X (ver Sección 3.2). Asumiendo una altura de escala del polvo en el plano Galáctico de $117.7 \pm 4.7 \text{ pc}$ (Kos et al., 2014) y una distancia del Sol al plano galáctico de $19.6 \pm 2.1 \text{ pc}$ (Reed, 2006), del modelo de Chen et al. (1999) se desprende que la distancia al RSN G296.5+10.0 se encuentra en el rango de 0.9-2.3 kpc.

5. Conclusiones

La emisión de rayos X en dirección al RSN G296.5+10.0 se encuentra distribuida dentro de los límites de la emisión en radio a 1.4 GHz. En estudios previos se reporta emisión de rayos X hasta 1.2 keV, mientras que en las observaciones realizadas por el satélite XMM-Newton detectamos emisión en el rango de energía de 0.94-2 keV.

El análisis espectral de la emisión de rayos X muestra variaciones en las abundancias asociadas a metales pesados presentes en el plasma, lo cual sugiere que la emisión térmica es originada principalmente por el calentamiento del material eyectado. La temperatura media del plasma es de 0.15 keV y la densidad columnar de $0.7\text{-}0.9 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$. Con este último valor y el método de Chen et al. (1999), podemos estimar una distancia al remanente de 0.94-2.3 kpc, en coincidencia con la distancia propuesta por Giacani et al. (2000) dentro de los márgenes de error. Además, esta distancia es consistente con el rango establecido para la estrella de neutrones visible en rayos X (Zavlin et al., 1998).

Agradecimientos: L.K.E. goza de una Beca Doctoral del CONICET. J.A.C. y E.M.R. son miembros de la Carrera del Investigador Científico del CONICET. J.A.C. está financiado por los proyectos PIP 0113 (CONICET) and PICT-2017-2865 (ANPCyT). Este estudio está parcialmente financiado por el CONICET a través del proyecto PIP 112-201701-00604.

Referencias

- Blandford R.D., Cowie L.L., 1982, ApJ, 260, 625
 Chen B., et al., 1999, A&A, 352, 459
 Fich M., Blitz L., Stark A.A., 1989, ApJ, 342, 272
 Giacani E.B., et al., 2000, AJ, 119, 281
 Kellett B.J., et al., 1987, MNRAS, 225, 199
 Kos J., et al., 2014, Science, 345, 791
 Reed B.C., 2006, JRASC, 100, 146
 Reynoso E.M., Cichowolski S., Walsh A.J., 2017, MNRAS, 464, 3029
 Roger R.S., et al., 1988, ApJ, 332, 940
 Schlafly E.F., Finkbeiner D.P., 2011, ApJ, 737, 103
 Whiteoak J.B., Gardner F.F., 1968, ApJ, 154, 807
 Wilms J., Allen A., McCray R., 2000, ApJ, 542, 914
 Zavlin V.E., Pavlov G.G., Trumper J., 1998, A&A, 331, 821