

Propiedades Físicas De Una Nube Molecular Del Centro Galáctico

Armijos Jairo¹; López Ericson¹; Llerena Mario¹; Aldas Franklin¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Observatorio Astronómico, Quito, Ecuador

Resumen: Se llevó a cabo un estudio de algunas propiedades físicas de la nube molecular de 20 km/s del Centro Galáctico, región que se halla a una distancia de ~8,5 Kpc de la Tierra. Para este trabajo los datos se tomaron con el radiotelescopio GBT del National Radio Astronomy Observatory que posee una antena parabólica con un diámetro de 100 metros, cubriendo con su receptor la banda Ku. En dicha banda espectral se detecta la emisión de líneas de recombinación de hidrógeno Hn α (H79 α , H78 α , H77 α , H76 α y H75 α) y Hn β (H99 β , H98 β , H96 β y H94 β). Para la región de estudio de la nube molecular de 20 km/s se deriva el flujo de emisión del continuo radio, la densidad electrónica, la masa de hidrógeno atómico ionizado y el flujo de fotones Lyman ionizantes, todo ello en base a parámetros derivados a partir de las líneas de recombinación de hidrógeno. En base al flujo de fotones Lyman ionizantes se halla, de forma indirecta, que el gas de la nube molecular de 20 km/s puede estar siendo excitado por la radiación proveniente de una estrella de tipo espectral B1 o B0.

Palabras clave: Centro Galáctico, Nube molecular, regiones HII, líneas de recombinación de hidrógeno.

Physical properties of a molecular cloud in the Galactic Center

Abstract: We carried out a study on the physical properties of the 20 km/s molecular cloud in the Galactic Center, which lies about 8,5 Kpc from the Sun. For our study the data was taken by using the GBT Ku-band receiver of the NRAO 100-m radiotelescope. In this spectral band we detected the emission from the hydrogen recombination lines Hn α (H79 α , H78 α , H77 α , H76 α y H75 α) and Hn β (H99 β , H98 β , H96 β y H94 β). From derived parameters of the hydrogen recombination lines we derived the radio continuum flux, the electron density, the mass of ionized hydrogen and the flux of ionizing Lyman photons for a region of the 20 km/s cloud. Based on the estimation of the flux of ionizing Lyman photons we found, indirectly, that the gas of the molecular cloud can be excited either by a B1 or B0 star.

Keywords: Galactic Center, Molecular cloud, HII regions, hydrogen recombination lines.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro Galáctico (CG) se halla a ~8,5 Kpc de distancia de la Tierra. En el CG existe un complejo molecular conocido como Sgr A que contiene varias nubes moleculares gigantes, entre ellas sobresalen dos nubes por sus enormes dimensiones de alrededor 15 pc (Zylka et al., 1990), una de ellas con una velocidad radial de 20 km/s (véase la Figura 1) y otra con una velocidad radial de 50 km/s. La morfología y la dinámica de dichas nubes han sido estudiadas en detalle (Zylka et al., 1990, Coil y Ho, 2000). En el centro dinámico de la Galaxia reside un agujero negro supermasivo, Sgr A*, que tiene una masa de ~4 millones de masas solares (Ghez et al., 2005). En el CG, aparte de las fuentes mencionadas, existen remanentes de supernovas, regiones HII, regiones de formación estelar, regiones de emisión no térmica, entre otras, por tanto es considerado como un excelente laboratorio para llevar a cabo investigación en Astrofísica (LaRosa et al., 2000).

Se han llevado a cabo muchos trabajos dedicados al estudio de las regiones HII en el CG (Ho et al., 1985, Mills et al., 2011), ello con el objetivo caracterizar la formación estelar reciente y pasada en el núcleo de nuestra Galaxia. Los fotones presentes en las regiones de formación estelar ionizan el gas atómico y molecular de su entorno, formando así regiones HII.

Situada a ~6 pc al este de Sgr A* se encuentra la región G-0,02-0,07. Esta fuente está compuesta por tres regiones HII compactas y una ultracompacta (Mills et al., 2011), las cuales se han estudiado empleando tanto el radio continuo como líneas de recombinación de hidrógeno (LRH) (Ekers et al., 1983, Goss et al., 1985), considerados como excelentes trazadores del gas ionizado en regiones de formación estelar (Condon, 1992, Kepley et al., 2011).

A ~12 pc, en proyección, de Sgr A* se halla otra región HII llamada G, cuyo gas puede estar excitado por una estrella de tipo espectral O9 o cinco estrellas de tipo espectral B0 (Ho et al., 1985). Distintos mapas de radio continuo (Ho et al., 1985, Morris et al., 2013) no muestran otras regiones

jairo.armijos@epn.edu.ec

HII intensas, aparte de la región HII G, en el entorno cercano de la nube molecular de 20 km/s. Por tanto la estrella o estrellas asociadas a la región HII G parecen ser las principales responsables de la ionización del gas atómico/molecular en dicha nube.

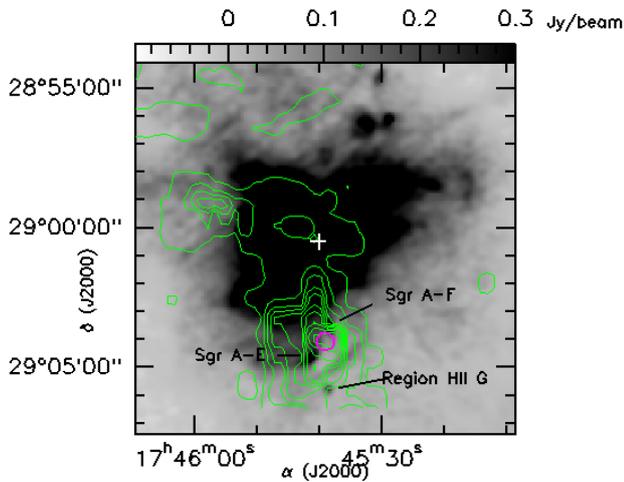


Figura 1. Emisión de radio continuo a 20 cm (escala de grises, mapa obtenido por Yusef-Zadeh et al. (2004)) en el complejo Sgr A del CG. En contornos en verde se representa la emisión de SiO(2-1) de la nube molecular de 20 km/s (mapa obtenido por Martín-Pintado (2014)). La posición de observación se muestra con el círculo rojo que posee el tamaño del haz (55 segundos de arco) del telescopio GBT a ~13 GHz. En el mapa de radio continuo se aprecian a la región HII G y las regiones de emisión no térmica Sgr A-E y Sgr A-F (estudiadas por Morris et al. (2013)). La cruz blanca señala la posición del agujero negro supermasivo Sgr A*. La superposición del mapa de emisión de radio continuo a 20 cm y del mapa de emisión de SiO(2-1) es hecha para este artículo y se lo realizó para indicar la posición de observación y visualizar la posición relativa de las fuentes cercanas.

El objetivo principal de este artículo es la derivación de algunas propiedades físicas e investigar cuál es la fuente principal de ionización del gas atómico, compuesto principalmente de hidrógeno, en una región de la nube molecular de 20 km/s situada a ~5 pc de la región HII G (véase la Figura 1). Para realizar este estudio se han empleado varias LRH $Hn\alpha$ y $Hn\beta$, que como se mencionó anteriormente son consideradas excelentes trazadores del gas ionizado.

Las observaciones y los datos empleados para este trabajo se describen en la sección 2. Los resultados se presentan en la sección 3. Finalmente, en la sección 4 se resumen las conclusiones de este artículo.

2. OBSERVACIONES Y DATOS

Las observaciones se llevaron a cabo en el 2009 con el telescopio GBT (<https://science.nrao.edu/facilities/gbt>) del National Radio Astronomy Observatory de Estados Unidos, cuya antena parabólica tiene un diámetro de 100 metros. Para las observaciones se empleó un receptor centrado en la banda Ku, el cual se conectó a un espectrómetro. De esta manera se obtuvieron varios espectros con una resolución de ~0,6 km/s (24,4 KHz) y un ancho de banda de 200 MHz. La posición de observación en la nube molecular de 20 km/s, en el CG, se indica en la Figura 1. A las frecuencias de observación el

telescopio GBT proporcionó una resolución espacial de 55 segundos de arco.

El procesamiento y análisis de datos se realizó usando el software MADCUBAIJ (http://cab.inta-csic.es/madcuba/MADCUBA_IMAGEJ/ImageJMadcuba.html). Las LRH en el CG muestran anchuras de ~35 km/s (De Pree et al., 1996), por tanto los espectros se suavizaron a una resolución espectral de ~5 km/s. Las intensidades de los espectros están dadas en escala de temperatura de antena (T_a^*) en Kelvin (K), las cuales se hallan afectadas por incertidumbres de 20 % - 30 %, ello como consecuencia del proceso de calibración de los datos.

3. RESULTADOS

3.1. Identificación de líneas de recombinación de hidrógeno y sus perfiles

Para la identificación de las LRH se usaron las frecuencias proporcionadas por una herramienta de MADCUBAIJ. De esta forma se identificaron las LRH $H75\alpha$, $H76\alpha$, $H77\alpha$, $H78\alpha$, $H79\alpha$, $H94\beta$, $H96\beta$, $H98\beta$ y $H99\beta$ que se muestran en la Figura 2. Las líneas detectadas $Hn\alpha$ con $\Delta n=1$ son más intensas que las $Hn\beta$ con $\Delta n=2$ (véase la Figura 2), ello consistente con la teoría sobre la disminución de las intensidades de las líneas de recombinación a medida que aumenta el Δn (Lilley y Palmer, 1968).

En los perfiles de cada LRH se identificaron dos componentes en velocidad: uno con velocidad positiva (~20 km/s) y otro con velocidad negativa (~-30 km/s). En el espectro de la línea $H96\beta$ se nota además la presencia de una línea desconocida que posee una velocidad radial de ~50 km/s.

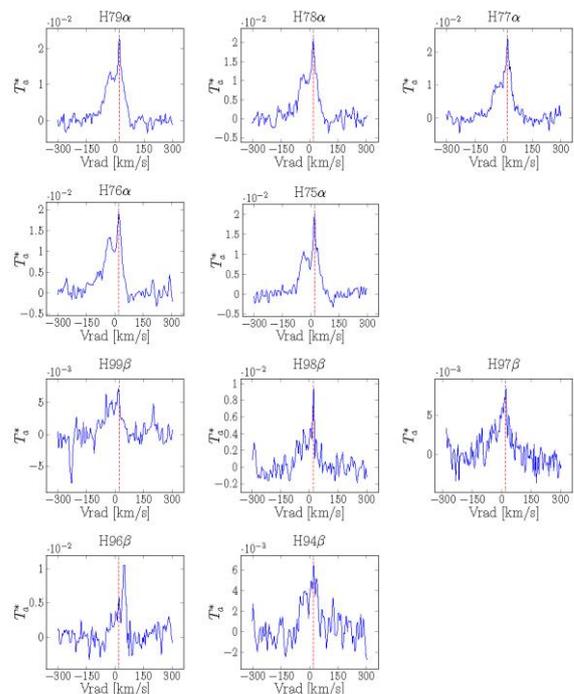


Figura 2. Líneas de recombinación de hidrógeno. La línea discontinua señala la velocidad radial de 20 km/s.

Tabla 1. Parámetros derivados mediante ajustes gaussianos a las LRH.

LRH	ν (GHz)	T_a^* (mK)	V_{rad} km/s	$\Delta\nu$ km/s
H79 α	13,09	19,4 (1,6)	22,9 (1,3)	30,2 (2,9)
		12,6 (1,3)	-26,5 (2,5)	49,7 (6,5)
H99 β	13,15	5,9 (1,1)	17,3 (3,5)	25,8 (7,1)
		4,4 (0,9)	-20,1(5,5)	42,4 (12,1)
H78 α	13,60	17,9 (0,9)	21,9 (1,3)	38,2 (2,8)
		11,0 (0,8)	-32,3 (2,4)	48,6 (5,7)
H98 β	13,56	9,0 (1,7)	15,7 (2,8)	13,2 (6,6)
		$\leq 5,0^a$
H77 α	14,12	24,0 (3,4)	20,2 (2,1)	20,8 (4,9)
		$\leq 10,2^a$
H96 β	14,41	4,8 (1,2)	19,4 (2,9)	22,2 (7,2)
		$\leq 3,7^a$
H76 α	14,69	19,0 (1,1)	22,9 (1,2)	29,9 (2,7)
		13,1 (1,0)	-28,7 (1,9)	51,3 (4,8)
H94 β	15,34	6,0 (0,6)	22,7 (2,3)	37,0 (5,4)
		4,1 (0,6)	-28,3 (3,2)	40,8 (8,0)
H75 α	15,28	20,0 (1,0)	22,5 (0,9)	30,0 (2,0)
		10,4 (0,8)	-32,5 (2,0)	51,6 (5,3)

^aLímite superior 3 σ al pico de intensidad de la LRH.

3.2. Análisis

Usando el programa MADCUBAIJ se realizaron ajustes gaussianos a las LRH con el objetivo de estimar los valores del pico de intensidad T_a^* , la velocidad radial V_{rad} y el ancho de la línea $\Delta\nu$, con sus respectivos errores σ . Los valores derivados de esta manera se listan en la Tabla 1.

El ajuste de las líneas H75 α , H76 α , H78 α , H79 α , H94 β y H99 β se lo realizó empleando dos gaussianas, una para el componente de velocidad positiva y otra para el de velocidad negativa. Para los componentes negativos de las líneas H77 α , H96 β y H98 β se derivaron límites superiores 3 σ al pico de sus intensidades, los mismos que se listan en la Tabla 1.

Si se asumen condiciones de Equilibrio Termodinámico Local (LTE por sus siglas en inglés), según Mezger y Henderson (1967) se puede calcular la densidad de electrones n_e mediante la Ecuación (1) siguiente:

$$\frac{n_e}{cm^{-3}} = 6,321E + 02u_1 a^{1/2} \left(\frac{T_e}{10^4 K} \right)^{0,175} \left(\frac{\nu}{GHz} \right)^{0,05} \left(\frac{S_\nu}{Jy} \right)^{0,5} \left(\frac{D}{Kpc} \right)^{-0,5} \left(\frac{\Theta}{arc\ min} \right)^{-1,5} \quad (1)$$

y la masa total de átomos de hidrógeno ionizado M , expresado en masas solares mediante la Ecuación (2):

$$\frac{M}{M_\odot} = 0,386u_2 a^{1/2} \left(\frac{T_e}{10^4 K} \right)^{0,175} \left(\frac{\nu}{GHz} \right)^{0,05} \left(\frac{S_\nu}{Jy} \right)^{0,5} \left(\frac{D}{Kpc} \right)^{2,5} \left(\frac{\Theta}{arc\ min} \right)^{1,5} \quad (2)$$

donde T_e es la temperatura electrónica que en el CG es igual a 6 500 K (Goss et al., 1985), ν es la frecuencia, S_ν es el flujo de emisión del continuo radio, D es la distancia a la fuente que es igual a 8,5 Kpc y Θ es el tamaño de la región de estudio que en este caso es igual al haz del telescopio (55 segundos de arco a las frecuencias de estudio). Para una nube molecular esférica con densidad constante, los factores u_1 y

u_2 son iguales a 0,775 y 1,291, respectivamente, como se define en Mezger y Henderson (1967).

Por otra parte, S_ν se calcula a partir de la Ecuación (3):

$$\frac{T_e}{K} = 2,2E + 03 \left(\frac{\nu}{GHz} \right)^{0,96} \left(\frac{T_a^*}{S_\nu} \right)^{-0,87} \left(\frac{\Delta\nu}{km/s} \right)^{-0,87} \quad (3)$$

Para expresar S_ν en Jansky (Jy) empleamos la ganancia del telescopio GBT que corresponde a $S_\nu(Jy) = S_\nu(K)/1,9$. Para calcular n_e y M se tuvo además que estimar el valor de a , que depende de ν y T_e , lo que se realizó mediante una interpolación entre 12 y 16 GHz, ello a partir de los datos dados en Spitzer (2004), hallando de esta manera que $a \approx 0,96$. Por otro lado, como se define en Rohlfs y Wilson (2000), el flujo de fotones Lyman ionizantes $N_{Ly\alpha}$ puede calcularse con la Ecuación (4):

$$N_{Ly\alpha} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 n_e n_p \alpha^{(2)} \quad (4)$$

donde d es el tamaño de la fuente cubierto con el haz del telescopio, que en nuestro caso es igual a 2,2 pc, mientras que n_e y n_p representan la densidad de electrones y de protones, respectivamente. Asumiendo condiciones de LTE, se tiene que $n_e = n_p$. De acuerdo a Spitzer (2004) para el hidrógeno el parámetro $\alpha^{(2)}$ está dado por la Ecuación (5):

$$\frac{\alpha^{(2)}}{cm^3/s} = \frac{2,06E - 11}{T_e^{1/2}} \Phi_2 \quad (5)$$

La estimación del valor de la función Φ_2 , que depende de la temperatura, se obtuvo mediante una interpolación entre temperaturas de 1 000 y 16 000 K a partir de los datos de dados en Spitzer (2004). De esta manera se obtuvo que $\Phi_2 = 1,4$. Con este resultado y considerando una $T_e = 6 500$ K se estimó el valor de $\alpha^{(2)}$ igual a 3,6E-13 cm³/s. Teniendo en cuenta la información dada en la Tabla 1, y considerando las ecuaciones anteriores se realizó el cálculo de S_ν , n_e , M y $N_{Ly\alpha}$. Los resultados obtenidos a partir de estos cálculos se listan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros físicos derivados a partir de las líneas de recombinación de hidrógeno.

LRH	V_{rad} (km/s)	S_ν mJy	n_e cm ⁻³	M M_\odot	$\log(N_{Ly\alpha})$ 1/s
H79 α	22,9	62,7	51,3	23,3	47,2
	-26,5	67,2	53,1	24,1	47,2
H99 β	17,3	16,1	26,0	11,8	46,6
	-20,1	19,9	28,9	13,1	46,7
H78 α	21,9	70,1	54,2	24,6	47,2
	-32,3	54,8	48,0	21,8	47,1
H98 β	15,7	12,2	22,7	10,3	46,5
	...	$\leq 24,2$	$\leq 31,9$	$\leq 14,5$	$\leq 46,8$
H77 α	20,2	49,2	45,5	20,6	47,1
	...	$\leq 47,7$	$\leq 44,8$	$\leq 20,3$	$\leq 47,1$
H96 β	19,4	10,2	20,7	9,4	46,4
	...	$\leq 17,0$	$\leq 26,8$	$\leq 12,1$	$\leq 46,6$
H76 α	22,9	53,5	47,5	21,6	47,1
	-28,7	63,4	51,7	23,5	47,2
H94 β	22,7	19,9	29,0	13,2	46,7
	-28,3	15,1	25,3	11,5	46,6
H75 α	22,5	54,2	47,9	21,7	47,1
	-32,5	48,2	45,2	20,5	47,1

4. CONCLUSIONES

A partir de las LRH H α y H β detectadas en este trabajo se han derivado valores entre 10 y 70 mJy para el S_{ν} , valores entre 20 y 54 cm⁻³ para n_e , valores entre 10 y 25 masas solares para una región con un tamaño de 2,2 pc de la nube molecular de 20 km/s y valores entre 46,4 y 47,2 1/s para el $\log(N_{Ly\alpha})$. $N_{Ly\alpha}$ está relacionado con el tipo espectral de la estrella o estrellas ionizantes (Rohlfis y Wilson, 2000). Por tanto a partir de las estimaciones de $N_{Ly\alpha}$ se halla, de forma indirecta, que el gas en la nube de 20 km/s puede estar siendo excitado por una estrella de tipo espectral B1 o B0, posiblemente localizada en la región HII G. En base al valor promedio $N_{Ly\alpha}$ derivado en este trabajo se estima un flujo de fotones de 6,92E+08 cm⁻²s⁻¹, valor que es únicamente un factor ~ 2 mayor que el flujo de fotones de 3,36E+08 cm⁻²s⁻¹ que se estima para nuestra región de estudio en base al valor $\log(N_{Ly\alpha})=48$ de la región HII G que se estimó por Ho et al. (1985) mediante un método directo.

REFERENCIAS

- Coil, A. L., & Ho, P. T. P. (2000). The dynamics of molecular material within 15 parsecs of the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, vol. 533, pp. 245-259.
- Condon, J. J. (1992). Radio emission from normal galaxies. *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, pp. 575-611.
- De Pree, C. G., Gaume, R. A., Goss, W. M., & Claussen, M. J. (1996). The Sagittarius B2 star-forming region. III. High-resolution H52 α and H66 α observations of Sagittarius B2 Main. *The Astrophysical Journal*, vol. 464, pp. 788-804.
- Ekers, R. D., van Gorkom, J. H., Schwarz, U. J., Goss, W. M. (1983). The radio structure of Sgr A. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 122, pp. 143-150.
- Goss, W. M., Schwarz, U. J., van Gorkom, J. H., & Ekers, R. D. (1985). The Sgr A East HII complex at $l=-0^{\circ}.02$, $b=-0^{\circ}.07$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 215, pp. 69-73.
- Guez, A. M., Salim, S., Hornstein, S. D., Tanner, A., Lu, J. R., Morris, M., Becklin, E. E., & Duchene, G. (2005). Stellar orbits around the Galactic Center Black Hole. *The Astrophysical Journal*, vol. 620, pp. 744-757.
- Ho, P. T. P., Jackson, J. M., Barrett, A. H., & Armstrong, J. T. (1985). Interactions between the continuum sources in the Galactic Center and their immediate molecular environment. *The Astrophysical Journal*, vol. 288, pp. 575-579.
- Kepley, A. A., Chomiuk, L., Johnson, K. E., Goss, W. M., Balser, D. S., & Pisano, D. J. (2011). Unveiling extragalactic star formation using radio recombination lines: an expanded very large array pilot study with NGC 253. *The Astrophysical Journal*, vol. 739, L24.
- LaRosa, T. N., Kassim, N. E., & Lazio, T. J. W. (2000). A wide-field 90 centimeter VLA image of the Galactic Center region. *The Astronomical Journal*, vol. 119, pp. 207-240.
- Lilley, A. E., & Palmer, P. (1968). Tables of Radio-frequency recombination Lines. *Astrophysical Journal Supplement*, vol. 16, pp. 143.
- Martín-Pintado, J. (2014). private communication.
- Mezger, P. G., & Henderson, A. P. (1967). Galactic HII regions. I. Observations of their continuum radiation at the frequency 5 GHz. *The Astrophysical Journal*, vol. 147, pp. 471-489.
- Mills, E., Morris, M. R., Lang, C. C., Dong, H., Wang, Q. D., Cotera, A., & Stolovy, S. R. (2011). Properties of the compact HII region complex G-0.02-0.07. *The Astrophysical Journal*, vol. 735, 84.
- Morris, M. R., Zhao, J. H., & Goss, W. M. (2013). Nonthermal filamentary radio features within 20 pc of the Galactic Center. *Proceedings IAU Symposium N° 303*.
- Rohlfis, K., & Wilson, T. L. (2000). Tools of Radio Astronomy. Third revised and enlarged edition. *Springer*, pp. 329-330.
- Spitzer, L. (2004). *Physical processes in the Intertellar Medium*. Published by Wiley-VCH, p. 107.
- Yusef-Zadeh, F., Hewitt, J. W., & Cotton, W. (2004). A 20 centimeter survey of the Galactic Center region. I. Detection of numerous linear filaments. *The Astrophysical Journal. Supplement Series*, vol. 155, pp. 421-550.
- Zylka, R., Mezger, P. G., & Wink, J. E. (1990). Anatomy of the Sagittarius A complex. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 234, pp. 133-146.