

# ESTUDIO DE UNA ESTRUCTURA TIPO 'SPUR' EN LA REGIÓN DE UPPER SCORPIUS A 1.435 GHz

J. A. Combi\*, J. C. Testori\*\*\*, G. E. Romero\*, F. R. Colomb\*\*  
Instituto Argentino de Radioastronomía, C.C. 5 (1894) Villa Elisa, Argentina.

Se discuten observaciones en potencia total realizadas a 1.435 MHz de la región de Upper-Scorpius, con la antena de 30 metros del Instituto Argentino de Radioastronomía. Se presentan los resultados del cálculo de índices espectrales correspondientes a la distribución de radiación observada. Se da una interpretación basada en la explosión de una supernova cuyo remanente se encuentra en la última etapa de su fase adiabática. Ésto permite reproducir el espectro no-térmico observado y calcular algunos parámetros físicos de interés.

Total-power observations at 1435 MHz of the Upper-Scorpius region carried out with the 30 m telescope of the I. A. R. are discussed. Results of the computation for spectral indexes of the radiation field are presented. It is provided an interpretation based on a supernova explosion with an expanding remnant in the last stages of the adiabatic phase. This permits to get the observed non-thermal spectrum and estimate some interesting physical parameters.

## I. INTRODUCCIÓN

La presencia de estructuras elongadas de emisión no-térmica conocidas como "spurs" en regiones de alta latitud galáctica ha sido frecuentemente asociada con períodos tardíos de la evolución de remanentes de supernovas. Las observaciones realizadas por Combi *et al.*<sup>1</sup> en la región de Scorpius-Ophiuchus (Sco-Oph) han permitido arrojar nueva luz sobre la naturaleza de la extensa estructura de emisión en el continuo de radio allí observada. En este trabajo se presenta una interpretación de la radioemisión proveniente de esta región, basada en la determinación de los índices espectrales  $\alpha$  de la radiación, que muestran una fuerte componente no-térmica ( $\alpha < -0.5$ ). Estos índices, con valores entre  $-0.55$  y  $-0.57$ , pueden ser entendidos en el marco de un fenómeno expansivo inmerso en el subgrupo Upper-Sco originado en una explosión de supernova cuyo remanente se encuentra en los últimos estadios de su evolución adiabática.

## II. OBSERVACIONES Y RESULTADOS

Los datos que permitieron el cálculo de los índices espectrales para la región fueron tomados por Combi *et al.*<sup>1</sup> como parte de un estudio global de la zona de Upper-Sco. Las observaciones se rea-

lizaron en potencia total a la frecuencia de 1435 MHz con el receptor de dos canales instalado en una de las antenas de 30 metros del Instituto Argentino de Radioastronomía (I.A.R.). El método de observación fue el de Nod-Scan desarrollado por Haslam<sup>2</sup>, que consiste en realizar barridos en declinación ( $\delta$ ) con ángulo horario cero, aprovechando la rotación de la tierra para barrer en ascensión recta ( $\alpha$ ). La velocidad de barrido fue de  $10^\circ$  por minuto, la temperatura del sistema de 90 K, el ancho de banda de 20 MHz, el tiempo de integración de 480 ms y la sensibilidad final del mapa obtenido de 60 mK (temperatura de brillo).

En la región observada se detectaron distintas estructuras que parecen estar íntimamente relacionadas con la expansión de un frente de choque en el subgrupo. Las estructuras A y B (Fig.1) envuelven la región central de Upper-Sco en su parte noroeste desde  $(l, b) \approx (2^\circ, 8^\circ)$  hasta  $(l, b) \approx (350^\circ, 24^\circ)$ , y de allí hasta  $(l, b) \approx (344^\circ, 17^\circ)$ , formando el contorno aproximado de un semióvalo. Si se asume una distancia de 170 pc para Upper-Sco (Blaauw<sup>3</sup>) el tamaño lineal de la estructura A es  $\sim 70$  pc y el de la estructura B  $\sim 30$  pc, con el grueso de la emisión concentrado en una capa de espesor de aproximadamente 10 pc. La distancia desde el borde exterior de la capa al centro de la región es  $\sim 24$  pc.

Los índices espectrales  $\alpha = -d \ln S / d \ln \nu$  fue-

\*Becario del CONICET.

\*\*Miembro de la Carrera del Investigador Científico CONICET.

\*\*\*Profesional asistente CONICET.

ron determinados utilizando las observaciones a 1435 MHz junto con datos del radio-mapa de Haslam *et al.*<sup>4</sup> a la frecuencia de 408 MHz. Los índices espectrales fueron computados a una resolución angular de 1°, según el método descrito por Testori & Colomb<sup>5</sup>. Previamente, el mapa de 1435 MHz fue llevado a coordenadas galácticas y retabulado al mismo intervalo tabular que el mapa de 408 MHz. La distribución de índices espectrales se muestra en la Fig. 2, donde puede verse una fuerte concentración de emisión no-térmica sobre la región tipo spur que hemos designado por A. Por el contrario, el centro de Upper-Sco prácticamente sólo registra emisión térmica, la cual es originada por la presencia de algunas regiones HII, tales como S9 y RCW129 (Sharpless<sup>6</sup>). Otras regiones HII, tales como S1 y S7 (Sharpless<sup>6</sup>), contribuyen con emisión térmica a la estructura B.

### III. DISCUSIÓN

La radioemisión no-térmica en el medio interestelar es producida por mecanismo sincrotrón. Ésto requiere la presencia de electrones ultra-relativistas y campos magnéticos relativamente intensos. Las explosiones de supernovas generan frentes de choque fuertes que se propagan a través del medio interestelar barriendo y comprimiendo el material existente, amplificando los campos magnéticos galácticos y acelerando los rayos cósmicos ambientales por mecanismo de Fermi. En este contexto, el spur observado en la región de Upper-Sco puede ser interpretado como un efecto de la propagación por un medio interestelar inhomogéneo de la onda de choque de una explosión de supernova ocurrida en el centro de la región. Un medio interestelar inhomogéneo de dos fases (un sustrato homogéneo sobre el cual se asientan nubes difusas de densidad numérica  $n$ ) es considerado usual en asociaciones de estrellas jóvenes como la presente en Upper-Sco (Spitzer<sup>7</sup>), que probablemente han sido originadas en un proceso de "cascada" de supernovas tal como el descrito por Ögelman & Maran<sup>8</sup>.

La expansión de la onda de choque, durante la fase adiabática de la evolución de un remanente de supernova (válida hasta diámetros  $D = 60$  pc - Milne<sup>9</sup>, Blandford & Cowie<sup>10</sup>) es descrita por las soluciones de explosión de Sedov<sup>11</sup>, que implican:

$$t = 1.5 \times 10^3 n_0^{0.5} E_{51}^{-0.5} R_{10}^{2.5} \text{ años}$$

$$\bar{p} = 5.4 \times 10^{-9} E_{51} R_{10}^{-3} \text{ dyn cm}^{-2}$$

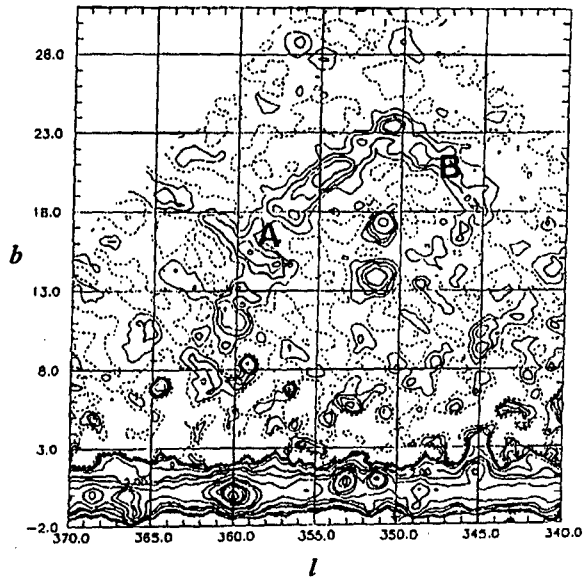


Fig. 1: Mapa del continuo de radio a 1435 MHz en coordenadas galácticas obtenido con el radiotelescopio de 30 metros del I. A. R.

donde  $t$  es el tiempo transcurrido desde la explosión,  $\bar{p}$  es la presión media en la cavidad del remanente,  $E_{51}$  es la energía liberada (en unidades de  $10^{51}$  erg),  $n_0$  es la densidad numérica en el sustrato del medio interestelar donde se produce la propagación (en unidades de  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ ), y  $R_{10}$  es la distancia desde el frente de choque al punto de la explosión en unidades de 10 pc. En nuestro caso asumiremos una densidad ambiente entre nubes difusas  $n_0 = 10 \text{ cm}^{-3}$  (Cappa de Nicolau & Pöppel<sup>12</sup>), una energía liberada estandar para una supernova tipo II de  $E_{51} \approx 0.4$  (Spitzer<sup>7</sup>) y un radio de 24 pc que puede obtenerse directamente de nuestras observaciones. Con estos valores:  $t = 6.7 \times 10^4$  años y  $\bar{p} \approx 1.6 \times 10^{-10} \text{ dyn cm}^{-2}$ . La velocidad del frente de choque en las nubes (fase más densa del medio) será:

$$v_{sc} = 750 E_{51}^{0.5} R_{10}^{-1.5} n^{-0.5}$$

lo cual lleva en nuestro caso ( $n = 40 \text{ cm}^{-3}$ , ver por ejemplo Blandford & Cowie<sup>10</sup>) a  $v_{sc} \approx 20.2 \text{ km}^{-1}$ .

Estas nubes están atravesadas por campos magnéticos y al ser ionizadas por la onda de choque se convierten en un fluido MHD en el cual se propagan ondas de Alfvén. Estas ondas actúan como centros dispersores para los rayos cósmicos electrónicos que atraviesan las nubes, dando origen a un proceso de aceleración de Fermi: los electrones dispersados atraviesan el frente de choque una y

otra vez, siendo acelerados en los sucesivos cruces hasta una energía a la cual los dispersores se hacen transparentes. Al ser ejetados poseen velocidades ultrarelativistas y radían sincrotrónicamente en el campo magnético amplificado de la región post-choque, produciendo emisión no-térmica con índice espectral  $\alpha = (p-1)/2$ . La distribución de energía de los electrones relativistas emergentes es una ley de potencia  $N(E) \propto E^{-p}$  cuyo índice no depende de los detalles del proceso de dispersión ni de la geometría del campo magnético, sino sólo de la razón de compresión  $\xi$  del frente de choque:  $p = 3\xi(\xi-1)^{-1} - 2$  (Blandford & Ostriker<sup>13</sup>, Verschuur & Kellermann<sup>14</sup>), donde  $\xi = n_1/n_2 = (\gamma-1)(\gamma+1)^{-1} + 2M^{-2}(\gamma+1)^{-1}$ , con  $M$  número de Mach y  $\gamma$  índice adiabático. Para el caso de una onda de choque fuerte:

$$\xi \approx (\gamma+1)(\gamma-1)^{-1} = 4 \quad (\gamma = 5/3).$$

Luego  $p \approx 2$ , lo cual implica un índice espectral  $\alpha = -0.5$ . La mayor parte de la emisión no-térmica del spur corresponde a estos valores como puede verse en la Fig. 2. Valores más negativos del índice espectral pueden explicarse por efectos adicionales originados en la conversión parcial de la onda de choque en radiativa (Alfvénica) en el contexto tratado por Blandford & Ostriker<sup>12</sup>. Ésto implica disminuciones locales en la razón de compresión  $\xi$  que a su vez producen valores más negativos en el índice espectral  $\alpha$ . La radiación sincrotrónica se espera se extinga por debajo de una frecuencia  $\nu \approx 20 \text{ nB}_{-6}^{-1} \approx 320 \text{ MHz}$ , donde hemos usado un campo magnético estandar de  $2.5 \times 10^{-6} \text{ Gauss}$ .

La energía total de los electrones relativistas en las regiones comprimidas por el frente de choque de la explosión será (Blandford & Cowie<sup>10</sup>):

$$E_e = 2 \times 10^{47} E_{51}^{0.17} B_{-6}^{-0.33} R_{10}^{2.5} f \text{ erg}$$

con  $f \approx 0.2$  para nubes difusas. En nuestro caso obtenemos  $E_e \approx 2.2 \times 10^{47} \text{ erg}$ , esto es, aproximadamente el 5% de la energía total de la explosión pasa a los electrones ultrarelativistas.

Evidencia adicional sobre la existencia de una onda de choque que barre parte de la región es aportada por la detección de distintas especies moleculares tales como  $\text{CH}^+$  (Meyers<sup>15</sup>),  $\text{CO}$  (Bronf-man<sup>16</sup>, Cohen<sup>17</sup>) y  $\text{OH}$  (Wouterloot<sup>18</sup>) que pueden ser sintetizadas en la región post-choque. El material más liviano debe ser barrido por el frente de la onda de choque, lo que concuerda con las observaciones de HI realizadas por Cappa de Nicolau & Pöppel<sup>12</sup> que muestran una mayor concentración de hidrógeno neutro en la región identi-

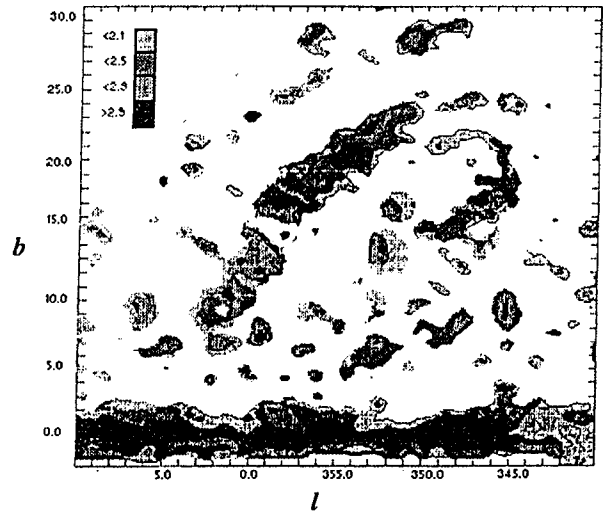


Fig. 2: Mapa de índices espectrales de temperatura ( $T_b \propto \nu^\beta$ ) obtenido entre las frecuencias de 1435 y 408 MHz. Índices espectrales de flujo  $\alpha = \beta - 1/2$ .

ficada como pre-choque.

#### IV. CONCLUSIONES

Se han calculado los índices espectrales correspondientes a la región tipo spur detectada en el continuo de radio en la zona de Upper-Scorpius. Los índices muestran extensas áreas de emisión no-térmica dando apoyo a la idea de que la estructura se ha producido por la interacción del frente de choque de una explosión de supernova con un medio interestelar no-homogéneo, con una concentración de nubes difusas en la zona coincidente con la emisión que define al spur. Este medio interestelar inhomogéneo puede haberse originado a su vez en las sucesivas explosiones de supernovas que previamente crearon la asociación de estrellas jóvenes de la región en un proceso tipo "cascada".

#### REFERENCIAS

1. J. A. Combi, J. C. Testori, G. E. Romero, F. R. Colomb, (en preparación) (1993).
2. C. G. Haslam, W. E. Wilson, D. A. Graham, G. C. Hunt, A&A Suppl. 13, 359 (1974).
3. A. Blaauw, Ann. Rev. Astr. A&A 2, 213 (1962).
4. C. G. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, W. E. Wilson, A&A Suppl. 47, 1 (1982).

5. J. C. Testori, F. R. Colomb, Bol. As. Ar. Astron. N°36 (1992).
6. S. Sharpless, Ap. J. Suppl. 4, 257 (1959).
7. L. Spitzer. *Physical Processes in Interstellar Medium*, Wiley & Sons, New York (1978).
8. H. B. Ögelman, S. P. Maran, Ap. J. 209, 124 (1976).
9. D. K. Milne, Aust. J. 209, 124 (1976).
10. R. D. Blandford, L. L. Cowie, Ap. J. 260, 625 (1982).
11. L. I. Sedov. *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, Academic Press. New York.
12. C. Cappa de Nicolau, Pöppel, A&A 164, 274 (1986).
13. R. D. Blandford, J. P. Ostriker, Ap. J. Let 221, L29-L32 (1978).
14. G. L. Verschuur, K. I. Kellermann, (Eds.) *Galactic and Extragalactic Radioastronomy*, Springer-Verlag, Berlin. (1989).
15. K. A. Meyers, T. P. Snow, S. R. Federman, M. Breger, Ap. J. 288, 148 (1985).
16. L. Bronfman, M. S. Thesis, University of Chile, (1980).
17. R. S. Cohen, In *Surveys of the Southern Galaxy*, Eds. W. B. Burton and F. P. Israel (Reidel, Dordrecht), P. 265.
18. J. G. Wouterloot, A&A 135, 32 (1982).