

RESULTADOS DE OBSERVACIONES DE LINEAS DE  
RECOMBINACION DEL MEDIO INTERESTELAR

J.C. Cersosimo (\*)

Instituto Argentino de Radioastronomía,  
Argentina

RESUMEN. Las desviaciones del equilibrio termodinámico local (ETL) pueden estudiarse observando las intensidades relativas de varias transiciones. También es posible comprobar la presencia de efectos de no-ETL comparando transiciones de diferentes órdenes que emiten aproximadamente en la misma frecuencia, eliminando, así, los problemas debido al ancho del haz del radiotelescopio.

En este trabajo se presentan observaciones de las transiciones H159 $\alpha$ , y H200 $\beta$  detectadas con un haz de 30' de arco en dirección de cuatro regiones HII galácticas y de 30 Doradus, en la Nube Mayor de Magallanes. Tres de las fuentes observadas, G268-1.1, G287.5-0.5, y G305+0.0, muestran evidencia de emisión estimulada habiéndose calculado un cociente promedio  $\beta/\alpha = 0,14 \pm 0,05$ . El cociente observado en la dirección G12.7+0.0 es  $0,20 \pm 0,06$ . En dirección de la fuente 30 Doradus el resultado es ambiguo debido a la baja relación señal-ruido.

En el espectro de la nebulosa de Carina (G287.5-0.5) se detectó la línea He159 $\alpha$ . El cociente He/H =  $0,11 \pm 0,05$  sugiere que el He podría estar distribuido sobre un gran volumen en la nebulosa.

ABSTRACT. Departures from local thermodynamic equilibrium (LTE) may be investigated by studying the relative intensity of various transitions. Furthermore, it is possible to test the presence of non-LTE effects by comparing different order transitions at approximately the same frequency, thus eliminating problems associated with different beamwidths.

The present paper reports on observations of the transitions H159 $\alpha$ , and H200 $\beta$  with a beam of 30' in the direction of four HII galactic regions and of 30 Doradus, in the Large Magellanic Cloud. Three of the galactic sources observed, G268-1.1, G287.5-0.5 and G305+0.0, show evidence of stimulated emission having an average ratio  $\beta/\alpha = 0.14 \pm 0.05$ . The observed ratio in the direction G12.7+0.0 is 0.20  $\pm$  0.06. In the direction of the 30 Doradus Nebula the results are ambiguous due to the low signal to noise ratio.

In the spectrum of the Carina Nebula the He159 $\alpha$  line is present. The ratio He/H =  $0.11 \pm 0.05$  suggests that the He may be distributed over a large volume in the nebula.

## I. INTRODUCCION

Las emisiones de líneas de recombinación en dirección del Plano Galáctico pueden estar amplificadas debido a mecanismos de estimulación, causado por la radiación libre-libre de

(\*) Becario del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

regiones HII, o por fuentes de continuo no-térmico. Tales desviaciones del equilibrio termodinámico local (ETL) pueden estudiarse comparando las intensidades de las líneas en diferentes frecuencias. También es posible estudiar el efecto observando líneas de recombinación de diferentes órdenes en la misma frecuencia, de esta manera es posible obtener distintas emisiones provenientes del mismo volumen de gas.

En este trabajo se muestran datos observacionales de líneas de recombinación en 18 cm, utilizando un haz de antena de 30'. La región espectral observada contiene las líneas H159 $\alpha$ , H200 $\beta$ , y He159 $\alpha$ . Las observaciones se hicieron en dirección de regiones HII extendidas, cada una de las cuales tiene uno o más núcleos de densidad relativamente alta. Las emisiones de líneas de recombinación detectadas con haz de antena grande y baja frecuencia, provienen principalmente de las regiones extendidas de baja densidad. Las líneas detectadas en este experimento provendrían principalmente de las partes más exteriores de las regiones HII.

## II. OBSERVACIONES

Las observaciones se hicieron durante el mes de marzo de 1983, se utilizó la antena "I" de 30 metros del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), la cual en la frecuencia de 1,6 GHz tiene un ancho de haz a mitad de potencia de 30'. El receptor utilizado consiste de un amplificador GaAs-FET y 84 filtros de 75 KHz, cuya resolución en velocidad es de 13,9 km/s. El modo de observación fue de conmutación en frecuencia. El oscilador local conmutaba en un monto menor que el ancho de banda utilizado, de esta forma se obtienen dos espectros independientes los cuales son de origen instrumental. Así, el ancho de banda observado resulta ser de 3 MHz.

La temperatura del continuo de cada región se observó en el modo de potencia total. Sobre cada fuente se hicieron barridos con ascensión recta constante. La velocidad de la antena fue de 10 grados por minuto, el tiempo de integración de 1 segundo, y el ancho de banda de 120 MHz.

## III. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1 se listan los resultados básicos de las líneas H159 $\alpha$  y H200 $\beta$ . En la última fila aparecen los cocientes entre las potencias de las líneas  $P(H200\beta)/P(H159\alpha)$  obtenidos para cada fuente. En condiciones de ETL la teoría predice un valor de este cociente  $\beta/\alpha = 0,28$ , para valores de la fuerza del oscilador calculados por Menzel (1969). En las Fig. 1, 2, y 3 se muestran los perfiles obtenidos en dirección de las fuentes G268-1.1, G287.5-0.5, y G305+0.0 respectivamente. Para estas fuentes se obtuvo un cociente promedio  $\beta/\alpha = 0,14 \pm 0,05$  el cual implica la presencia de fuertes efectos de no-ETL. En estas tres direcciones se observan picos de emisión en el continuo en 408 MHz (Haslam *et al.* 1981). Además se observa fuerte emisión de continuo 5 GHz (Haynes *et al.* 1979) e importante emisión de la línea H109 $\alpha$  (Wilson *et al.* 1973), provenientes de las zonas centrales de las regiones HII. Gordon y Gottesman (1971) hicieron un experimento similar observando en tres direcciones diferentes del plano galáctico libres de fuentes discretas de radiación continua. Obtuvieron un cociente promedio  $\beta/\alpha = 0,26 \pm 0,10$ . Según la teoría desarrollada por Shaver (1976), las líneas observadas por Gordon y Gottesman (1971) se originarían en un gas cuya densidad electrónica no es menor que  $5 \text{ cm}^{-3}$ . En términos de la misma teoría el cociente obtenido en dirección de las fuentes G268-1.1, G287.5-0.5, y G305+0.0, sugiere que la emisión se formaría en un gas cuya densidad oscila entre 10 y  $100 \text{ cm}^{-3}$ .

TABLA 1

Posición Nombre	12.7-.3 W33	268.0-1.1 RCW 38	287.5-.5 Carina	305.0+.0 RCW 74	279.4-31.7 30 Dor
$T_c$ (K)	7.2	30.	45.	12.	6.5
$T_p$ (mK)	90.	297.	330.	160.	53.
A (Km/s)	48.	54.	53.	39.	39.
H159 $\alpha$ P (KHz)	25.06	94.45	99.68	35.59	11.77
$P/T_c$ (KHz)	3.48	3.15	2.21	2.97	1.81

TABLA 1 (continuación)

Posición Nombre	12.7-.3 W33	268.0-1.1 RCW 38	287.5-.5 Carina	305.0+.0 RCW 74	279.4-31.7 30 Dor
H200 $\beta$					
T <sub>p</sub> (mK)	21.	45.	51.	26.	14.
A (Km/s)	42.	52.	42.	35.	42.
P (KKHz)	5.02	14.20	12.26	5.18	3.35
P/T <sub>c</sub> (KHz)	0.70	0.47	0.27	0.43	0.51
P( $\beta$ )/P( $\alpha$ )	.20 $\pm$ .06	.15 $\pm$ .04	.12 $\pm$ .05	.14 $\pm$ .04	.28 $\pm$ .15

T<sub>c</sub> : Temperatura del continuo en 1.6 GHz.

T<sub>p</sub> : Temperatura del pico de la línea.

A : Ancho de la línea a mitad de intensidad.

P : Potencia total de la línea.

El efecto de emisión estimulada observado en dirección de las fuentes G268-1.1, G287.5-0.5, y G305+0.0 probablemente se deba a la intensa radiación no-térmica de fondo, pero también parte de la emisión de la línea puede producirse por mecanismos de emisión espontánea. Es de esperar que las líneas provengan de una mezcla de gas caliente con temperatura electrónica T<sub>e</sub>  $\sim$  5000 K y baja medida de emisión (ME < 10000), como el estudiado por Hart y Pedlar (1976a) en dirección del brazo de Perseo, y de un gas frío con T<sub>e</sub>  $\sim$  100 K.

En dirección de W33 (G12.7+0.0) se observó la emisión de la línea H200 $\beta$  cuya intensidad es del 20% de la línea H159 $\alpha$  (Fig. 4). La emisión de la línea H159 $\alpha$  está por encima de los 40 mK entre las velocidades -10 y +45 km/s, mientras que las observaciones en alta frecuencia y con alta resolución espectral (Bieging *et al.* 1977) muestran emisiones con velocidades más positivas que 10 km/s. La distribución en velocidad de la emisión en baja frecuencia sugiere que el gas responsable de la emisión se encuentra en las cercanías de los brazos espirales de Sagittarius-Carina y de Scutum-Crux (2 y 4 kpc del Sol). Shaver (1977) observó en dirección del Centro Galáctico con un haz de 31' las líneas H159 $\alpha$  y H200 $\beta$ . Encontró una relación de intensidades  $\beta/\alpha$  0,24 $\pm$ 0,07. Él interpreta que la emisión proviene de gas ionizado situado en la dirección de la visual. Probablemente estas emisiones y las detectadas en dirección de W33, provengan del mismo tipo de gas ionizado, con T<sub>e</sub>  $\approx$  5000 K y n<sub>e</sub>  $\approx$  10 cm<sup>-3</sup>, que se ubica en las partes más internas de la Galaxia.

El espectro observado en dirección de 30 Doradus tiene muy baja relación señal-ruido. La línea H159 $\alpha$  (Fig. 5), es comparable a la observada en 21 cm por Cersósimo y Loiseau (1983) quienes en base a observaciones de la línea H166 $\alpha$  y el continuo sugieren la presencia de una envoltura de gas ionizado de baja densidad. El cociente de intensidades obtenido es  $\beta/\alpha$  = 0,28 $\pm$ 0,15; el alto porcentaje de error en esta medida no permite hacer un análisis adecuado de las condiciones físicas de la región donde se forman las líneas H166 $\alpha$  y H159 $\alpha$ .

Generalmente los autores calculan la temperatura electrónica de regiones HII a partir de observaciones de líneas de recombinación. Los resultados que se muestran en la Tabla 1 indican que el cociente P/T<sub>c</sub> varía significativamente de una fuente a otra. Si se supone que estas fuentes son de geometría plano-paralela y ópticamente delgada, y que los niveles atómicos están poblados en condiciones de ETL, podría interpretarse que la T<sub>e</sub> varía de una fuente a otra, pues P/T<sub>c</sub> es una función de T<sub>e</sub>. Cuando se tiene un conjunto de observaciones de una fuente, algunos autores calculan la pendiente de la correlación entre P y T<sub>c</sub>. Este método estadístico presupone que la fuente es isotérmica, o bien, si se tienen observaciones de distintas regiones HII, se supone que todas las fuentes tienen igual temperatura electrónica (Hart y Pedlar 1976b). Este método permite evaluar la contribución de la temperatura del continuo que proviene de regiones donde no se produce emisión de la línea, pero no permite conocer el grado de estimulación de la misma. Los efectos de no-ETL elevan el cociente P/T<sub>c</sub>, y, en consecuencia, se obtiene un valor de

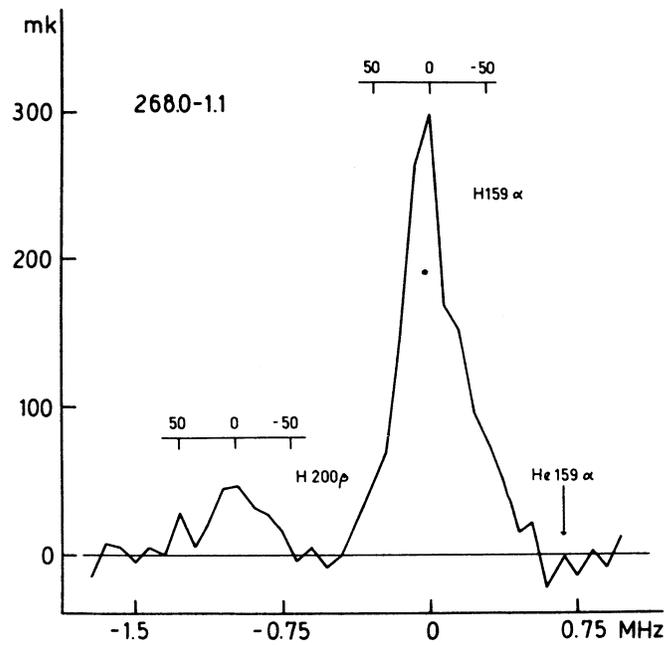


Fig. 1. Espectro observado en dirección G268-1.1. En la ordenada se indica la escala de temperatura de antena  $T_a$  en función de la frecuencia en MHz, cuyo origen corresponde a la frecuencia de laboratorio de la línea H159 $\alpha$ . En la parte superior de cada línea se indica la velocidad respecto del LSR. La flecha indica la posición donde se esperan las líneas no detectadas.

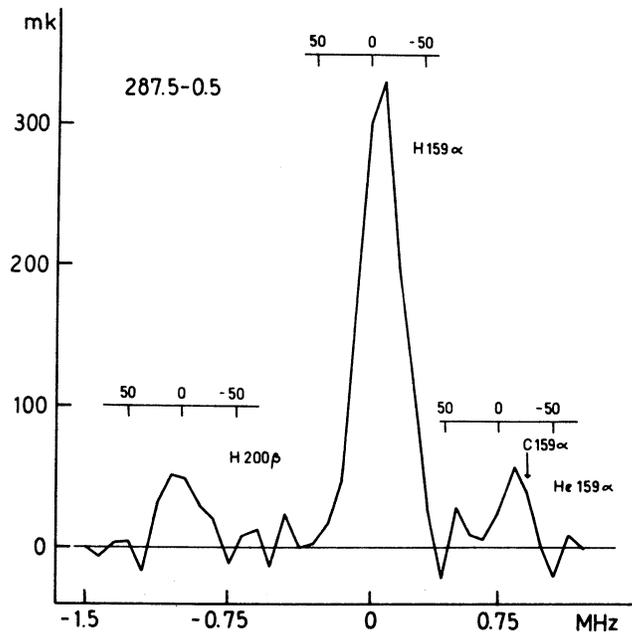


Fig. 2. Espectro observado en dirección de G287.5-0.5. En este espectro es evidente la detección de la línea He159 $\alpha$ . En la ordenada se indica la escala de temperaturas de antena  $T_a$  en función de la frecuencia en MHz, cuyo origen corresponde a la frecuencia de laboratorio de la línea H159 $\alpha$ . En la parte superior de cada línea se indica la velocidad respecto del LSR. La flecha indica la posición donde se esperan las líneas no detectadas.

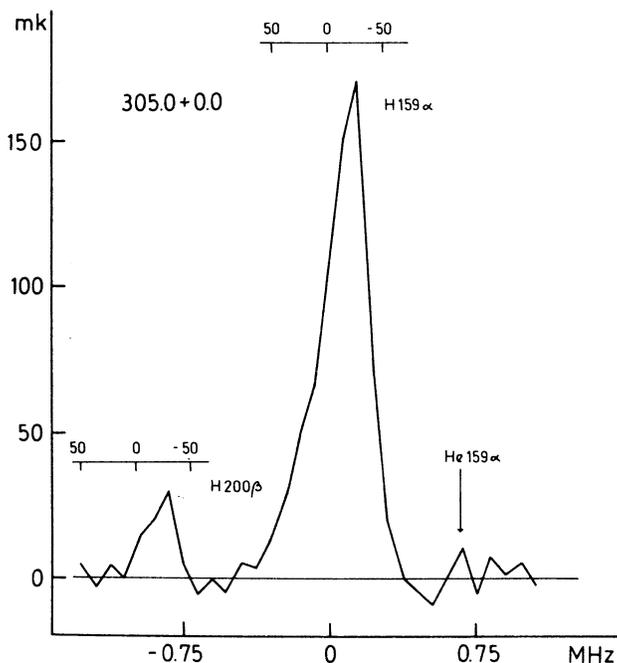


Fig. 3. Espectro observado en dirección de G305.0-0.0. En la ordenada se indica la escala de temperaturas de antena  $T_a$  en función de la frecuencia en MHz, cuyo origen corresponde a la frecuencia de laboratorio de la línea H159 $\alpha$ . En la parte superior de cada línea se indica la velocidad respecto del LSR. La flecha indica la posición donde se esperan las líneas no detectadas.

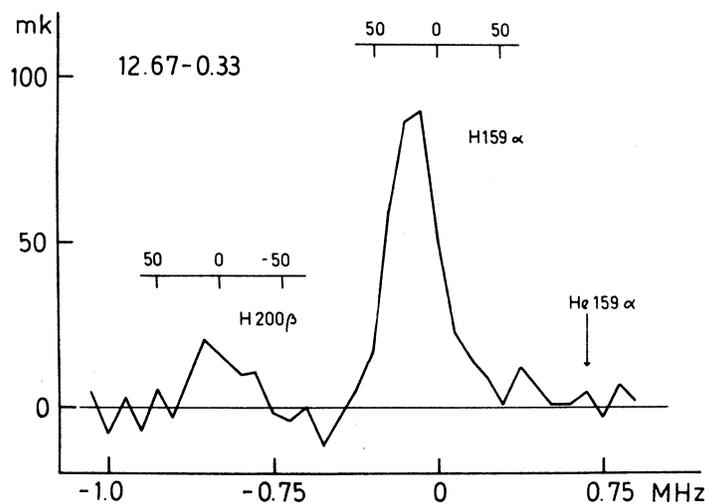


Fig. 4. Espectro observado en dirección de G12.7-0.3. En la ordenada se indica la escala de temperaturas de antena  $T_a$  en función de la frecuencia en MHz, cuyo origen corresponde a la frecuencia de laboratorio de la línea H159 $\alpha$ . En la parte superior de cada línea se indica la velocidad respecto del LSR. La flecha indica la posición donde se esperan las líneas no detectadas.

$T_e$  que está por debajo del valor real. En un estudio realizado en la región de la nebulosa de Carina, Cersosimo *et al.* (1984) calculan la pendiente de la correlación entre  $P$  y  $T_c$ . En la misma no se incluyen los puntos en los cuales se supone que hay una contribución en la potencia de la línea debido a efectos de estimulación. De esta forma se obtuvo un valor de  $T_e = 4700$  K que es el 49% del obtenido incluyendo todos los puntos. Si bien los puntos considerados para hallar la correlación son de bajo brillo superficial, en la región (a 0,5 grados del plano galáctico) hay emisión continua de fondo (Haslam *et al.* 1981, Jones y Finlay 1974), la cual podría superponer los niveles superiores del átomo.

Los relevamientos de la línea  $H166\alpha$  en el plano galáctico (Hart *et al.* 1976b, Lockman 1976, Hart *et al.* 1983) no muestran emisión del  $HeII$ . Este resultado sugiere que la abundancia de  $HeII$  es muy baja en el medio interestelar ionizado difuso. Rubin (1969) mostró que en las regiones HII la transición entre dos estados de ionización del He (por ejemplo,  $HeI$  y  $HeII$ ) depende fundamentalmente de la temperatura efectiva de la estrella excitadora. La transición podría ocurrir en el intervalo de temperatura efectiva  $34000 < T < 37000$  K. En los espectros que se muestran aquí, solamente se observa emisión del  $HeII$  en dirección de la nebulosa de Carina (287.5-0.5). Se obtuvo una abundancia relativa  $HeII/HII = 0,11 \pm 0,05$ . Es de esperar que el  $HeII$  esté distribuido en un gran volumen en la nebulosa debido a la presencia de las asociaciones Carina OB1 y OB2.

Los errores que se dan son estimaciones.

#### Agradecimientos

Agradezco al equipo técnico del IAR por su labor en el mantenimiento del receptor. También agradezco a los Drs. E. Bajaja y F.R. Colomb por haber facilitado la realización del presente trabajo de investigación.

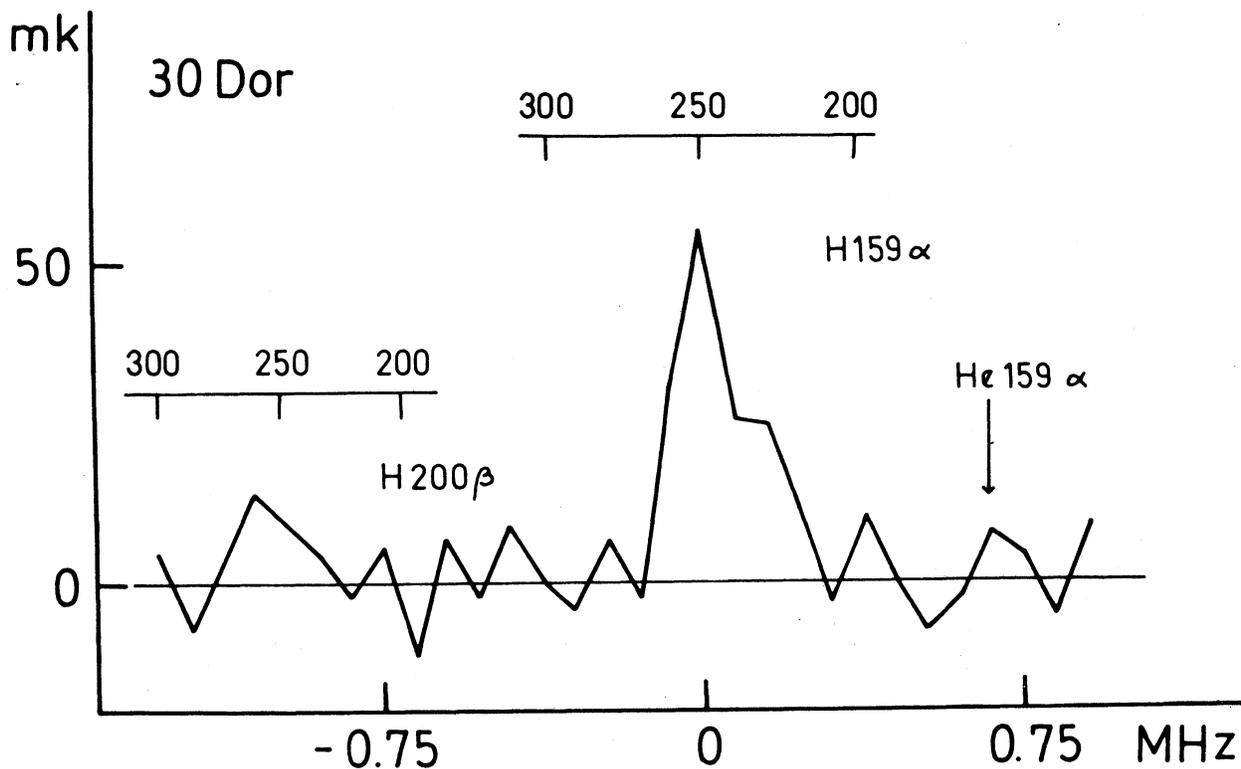


Fig. 5. Espectro observado en dirección de 30 Doradus. En la ordenada se indica la escala de temperaturas de antena  $T_a$  en función de la frecuencia en MHz, cuyo origen corresponde a la frecuencia de laboratorio de la línea  $H159\alpha$ . En la parte superior de cada línea se indica la velocidad respecto del LSR. La flecha indica la posición donde se esperan las líneas no detectadas.

## REFERENCIAS

- Biegging, J.H., Pankonin, V. and Smith, L.F. 1978, *Astron. Astrophys.* 64, 341.  
 Cersosimo, J.C. Loiseau, N. 1984, *Astron. Astrophys.* 133, 93.  
 Cersosimo, J.C., Azcárate, I.N. y Colomb, F.R. 1984, *Ap. Letters* 24, 1.  
 Gordon, M.A., Gottesman, S.T. 1971, *Ap. J.* 168, 371.  
 Haynes, R.F., Caswell, J.L., Simons, L.W.J. 1979, *Australian J. Phys. Astrophys. Suppl.* 48, 15.  
 Hart, L., Azcárate, I.N., Cersosimo, J.C. y Colomb, F.R. 1983, *Survey of the Southern Galaxy*, Ed. W.B. Burton e I.P. Israel (Dordrecht: Reidel), p. 43.  
 Hart, L., Pedlar, A. 1976a, *M.N.R.A.S.* 176, 135.  
 Hart, L., Pedlar, A. 1976b, *M.N.R.A.S.* 176, 547.  
 Haslam, C.G.T., Salter, C.J., Stoffel, H., Wilson, W.E. 1982, *Astr. Ap. Suppl.* 47, 1.  
 Jones, B.B., Finlay, E.A. 1974, *Australian J. Phys.* 27, 687.  
 Lockman, F.J. 1976, *Ap. J.* 209, 429.  
 Menzel, D.H. 1969, *Ap. J. Suppl.* 18, 221.  
 Rubin, R.H. 1969, *A. J.* 74, 994.  
 Shaver, P.A. 1976, *Astron. Astrophys.* 49, 1.  
 Shaver, P.A. 1977, *Astron. Astrophys.* 59, L31.  
 Wilson, T.L., Mezger, P.J., Gardner, F.F., Milne, D.K. 1970, *Astron. Astrophys.* 6, 364.

## DISCUSSION

*Peimbert*: A partir de observaciones con el satélite ultravioleta internacional se encuentra que la abundancia de C con relación a la de H es como siete veces menor que en la vecindad solar lo cual debería de dificultar la detección de líneas de carbono. ¿Se observa la línea de recombinación de C en la dirección de 30 Doradus?

*Cersosimo*: En este experimento no la hemos detectado. Tampoco se de que se halla detectado en otras frecuencias en dirección de 30 Dor.

Juan C. Cersosimo: Instituto Argentino de Radioastronomía, C.C. 5, 1894 Villa Elisa, Buenos Aires, Argentina.