

## LAS ENVOLTURAS CIRCUNESTELARES DE LAS SUPERGIGANTES DEL TIPO F Y G EN LA NUBE MAYOR DE MAGALLANES

W. Hagen

Whitin Observatory, Wellesley College

R.M. Humphreys

Department of Astronomy, University of Minnesota

y

R.E. Stencel

Goddard Space Flight Center y  
Joint Institute for Laboratory Astrophysics  
University of Colorado

### RESUMEN

Obtuvimos espectros de alta dispersión (2.5 y 5.1 Å/mm) de cuatro supergigantes de tipo F y G ( $M_V \sim -9$ ) la Nube Mayor de Magallanes para estudiar sus atmósferas y compararlas con sus contrapartes galácticas. Las líneas D de sodio se observan duplicadas, lo cual es evidencia de envolturas circunestelares, con velocidades de expansión entre 10 y 60 km s<sup>-1</sup> y una pérdida de masa mayor de 10<sup>-5</sup> M<sub>☉</sub> año<sup>-1</sup>. Las exposiciones profundas en las líneas H y K nos permiten estudiar las cromosferas de estrellas extragalácticas. Las líneas en emisión dentro de los perfiles de H y K permiten estimar independientemente sus luminosidades.

### ABSTRACT

We have obtained high-dispersion echellograms at 2.5 and 5.1 Å/mm of four F and G-type supergiants ( $M_V \sim -9$ ) in the Large Magellanic Cloud for the purpose of studying their outer atmospheres as compared to their Milky Way counterparts. Line doubling at Na I D indicates extensive circumstellar envelopes and mass loss rates in excess of 10<sup>-5</sup> M<sub>☉</sub> yr<sup>-1</sup> with outflow velocities of 10-60 km s<sup>-1</sup>. Deep exposures at Ca II H and K reveal new information about the chromospheres of extragalactic stars. The presence of H and K wing emission lines augments this, and also provides an independent way of estimating  $M_V$ .

**Key words:** STARS-MASS LOSS – STARS-CIRCUMSTELLAR SHELLS – STARS-CHROMOSPHERES

### I. INTRODUCCION

Hay gran interés en los estudios de atmósferas extendidas y de envolturas circunestelares de estrellas frías gigantes y supergigantes. Actualmente hay muchos problemas para comprender los mecanismos de pérdida de masa, calentamiento de las cromosferas, y las condiciones para máseres moleculares cerca de las estrellas. Pensando en estos problemas, hemos llevado a cabo un programa de espectroscopía de alta dispersión y fotometría infrarroja de gigantes y supergigantes frías, incluyendo las cuatro supergigantes frías más brillantes en la Nube Mayor de Magallanes. Hemos usado nuestras observaciones para estudiar los siguientes temas: 1) la correlación de la tasa de pérdida de masa con la

luminosidad y masa de la estrella, (2) la cantidad de gas y polvo en la envoltura, (3) la presencia o ausencia de máseres, y (4) la calibración de la luminosidad de las líneas H y K de calcio a partir de modelos de cromosferas. Una comparación de las estrellas de la Nube Mayor de Magallanes con las supergigantes galácticas más luminosas es de gran interés para lograr estos objetivos. Podemos comparar estrellas parecidas en dos galaxias con distintas historias evolutivas. Además, las estrellas de la Nube Mayor de Magallanes tienen la ventaja que sus distancias y luminosidades son conocidas a diferencia de sus homólogas galácticas. Esta contribución presenta un sumario de nuestros resultados preliminares. Un artículo más detallado aparecerá en otra publicación.

## II. OBSERVACIONES

Obtuvimos espectros de echelle de alta dispersión y fotometría infrarroja y visible de las cuatro supergigantes más luminosas del tipo F y G de la Nube Mayor de Magallanes y de supergigantes galácticas comparables.

Los espectros de las supergigantes del sur se obtuvieron con el espectrógrafo echelle del telescopio de 4 m del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo. Usamos la cámara Singer (resolución 300 mÅ) en septiembre 1978 y la cámara azul de foco largo (resolución 75-190 mÅ) en abril 1979. Observamos las estrellas del norte con la cámara azul de foco largo (resolución 75-110 mÅ) en el telescopio de 4 m del Kitt Peak National Observatory en octubre 1978. Se calibraron todas las placas con sensitómetro y se hicieron gráficas de intensidad con el microfotómetro del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

Las observaciones infrarrojas de las estrellas del sur se hicieron en el Observatorio Interamericano del Cerro Tololo. Usamos el telescopio de 1.5 m con el bolómetro de germanio-galio. Se observaron todas las estrellas con filtros de banda ancha de 3.5 y 10  $\mu\text{m}$  y la mayoría de ellas con seis filtros de banda 1-2  $\mu\text{m}$  en la región entre 8 y 13  $\mu\text{m}$ . Los errores fotométricos son de 5% para las estrellas brillantes. En Kitt Peak National Observatory observamos las estrellas del norte con un detector de Si-As y un filtro variable circular con el telescopio de 1.3 m. La resolución del sistema es de 0.14  $\mu\text{m}$  pero observamos cada 0.3  $\mu\text{m}$  entre 8 y 13  $\mu\text{m}$ . Además se obtuvieron magnitudes de banda ancha en 3.5  $\mu\text{m}$  de la mayoría de las estrellas.

Se observaron las supergigantes de la Nube Mayor de Magallanes con filtros *BVRI* con un fototubo de Ga-As y el telescopio de 1.5 m del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo en octubre 1978.

## III. RESULTADOS

## a) Características generales de las estrellas

En la Tabla 1 se indican las estrellas incluidas en la parte del programa que comprende la Nube Mayor de Magallanes y las estrellas de comparación galácticas. Se determinaron las luminosidades por la presencia de las estrellas de la Nube Mayor de Magallanes tienen la (Humphreys 1979), o en un cúmulo o asociación de distancia conocida. Sus masas iniciales son 40 o 50  $M_{\odot}$ , según cálculos evolutivos de Chiosi, Nasi y Sreenivasan (1978). Estas estrellas se encuentran entre las estrellas de evolución avanzada de mayor masa, aunque no sabemos si se están convirtiendo en supergigantes rojas o si ya terminaron esa etapa de su vida.

La mayoría de las estrellas con observaciones en 10  $\mu\text{m}$  (estrellas galácticas) poseen emisión de polvo de silicato, lo cual es una evidencia de pérdida de masa.

TABLA 1

ESTRELLAS OBSERVADAS		
Estrella	Tipo espectral	$M_V$
Supergigantes de la Nube Mayor de Magallanes		
HDE 271182	F8 0	- 9.1
HDE 269953	G0 0	- 9.2
HDE 269723	G4 0	- 9.1
HDE 268757	G7 0	- 9.1
Supergigantes galácticas		
$\rho$ Cas	F8p1a	- 9.5
HD 150884	F8 1a	...
R Pup	G2 1a-0	- 7.8
HD 96918	G0 1a-0	- 9.2
HR 8752	G0-G5 1a-0	- 9.1 a - 9.5
HR 5171A	G8 1a-0	- 9.2
AX Sgr	G8 1a	...

## b) Las líneas H y K

La absorción central de las líneas H y K de Ca II es muy profunda en las estrellas de la Nube Mayor de Magallanes, probablemente debido a la absorción circunestelar. Algunas poseen emisión débil en el lado violeta de la absorción. Se ve más a menudo emisión central en las estrellas Ib pero por lo general las de tipo Ia, Ia-0 y 0 poseen tanta absorción circunestelar que oscurece la emisión. Los perfiles de las supergigantes de la Nube Mayor de Magallanes son muy parecidos a los de las estrellas galácticas de temperaturas y luminosidad similares. HDE 271182 (F8 0) y HDE 269953 (G0 0) se parecen a  $\rho$  Cas (F8p1a) y HD 96918 (G0 1a-0). La estrella HDE 269723 (G4 0) se parece también a HD 96918 y HDE 268757 (G7 0) se parece a AX Sgr (G8 1a) y a HR 5171A (G8 1a-0). Se muestran perfiles H y K de algunas de estas estrellas en la Figura 1.

Además, varias estrellas poseen líneas de emisión en los extremos de las líneas H y K. Muchas de estas líneas son de Fe I y Fe II, como las estudiadas por Stencel (1977), posiblemente excitadas por radiación ultravioleta (Cram *et al.* 1980). Se ven en emisión debido a la debilidad de la fotosfera en las líneas fuertes H y K. Estas líneas se pueden usar para estudiar la cromosfera y para la estimación de la luminosidad, con resultados parecidos a luminosidades determinadas independientemente.

## c) Otras líneas circunestelares

Se observan dobles las líneas del doblete D del Na I en las supergigantes de la Nube Mayor de Magallanes con separaciones entre 10 y 50  $\text{km s}^{-1}$ . Algunos ejemplos se presentan en la Figura 2. Este efecto lo consideramos como evidencia de pérdida de masa y lo usamos para estimar su tasa en la próxima sección.

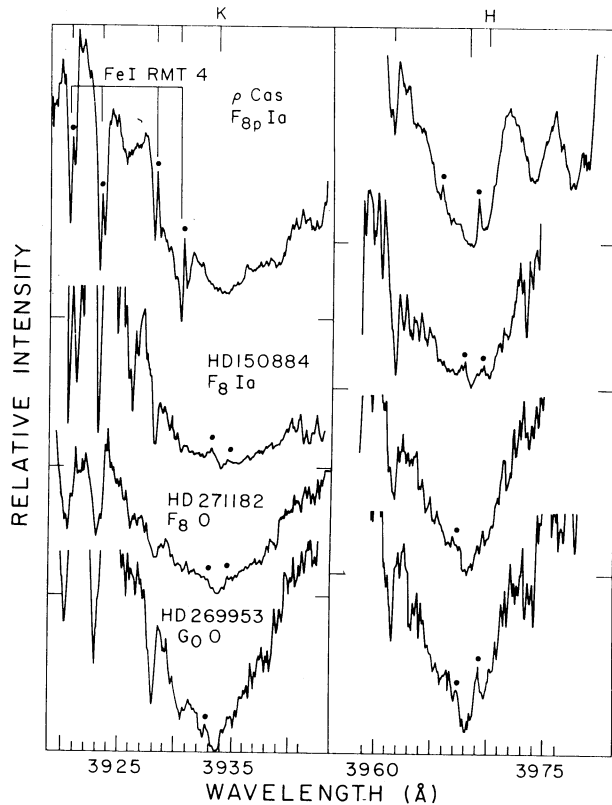


Fig. 1a. Espectros de las líneas H y K de las estrellas del programa. Las líneas en emisión reales o sospechadas están señaladas por puntos.

En los espectros circunestelares de las estrellas del tipo M, las líneas que siguen en intensidad después de las líneas H,K y D son Sr II  $\lambda$  4077 y Ca II  $\lambda$  4226 (Deutsch 1960). De la comparación de nuestras placas con placas

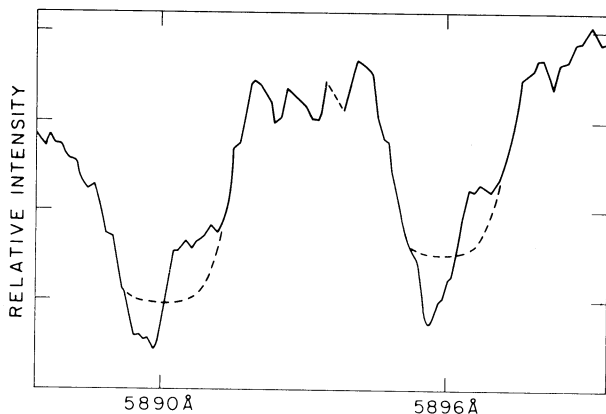


Fig. 2. Las líneas D de Na I en la supergigante HD 269723 (G40). Se ven las componentes de la envolvente. Las líneas quebradas representan el perfil estimado para la fotosfera y muestran el perfil P Cygni de la envolvente.

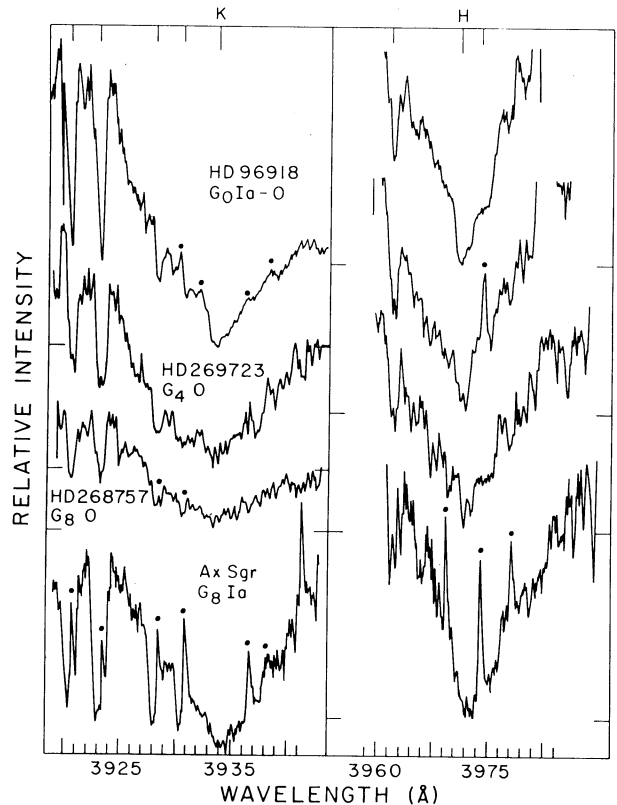


Fig. 1b. Ver Figura 1a.

de estrellas del tipo G de menor luminosidad en las que no se espera mucha pérdida de masa, se comprueba que no hay líneas dobles ni líneas asimétricas causadas por la pérdida de masa. Los cálculos preliminares indican que la ionización probablemente es tan grande que no se observan estos iones.

#### d) Estimación de la tasa de pérdida de masa

Los perfiles de las líneas D de la estrella HDE 269723 se pueden analizar con un programa de computadora escrito por Kunasz, ya usado por Hagen (1978) para estrellas de tipo M. Una comparación de los perfiles observados con los perfiles calculados indica una velocidad de expansión de  $10 \text{ km s}^{-1}$  y un límite menor de densidad columnar de  $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  para Na I. Para estimar la densidad columnar total, es necesario calcular el equilibrio de ionización por medio de la ecuación siguiente:

$$\frac{n_{II}}{n_I} = \frac{\Gamma}{n_e \alpha}$$

donde  $\Gamma$  es una integración sobre la longitud de onda del campo de radiación multiplicado por las secciones de fotoionización. El campo de radiación está determinado por la dilución y es proporcional a  $r^{-2}$ , donde  $r$  es la

distancia al centro de la estrella (en radios estelares). La tasa de recombinación,  $\alpha$ , depende débilmente de la temperatura efectiva y suponemos que ésta no cambia mucho en la envoltente. Suponiendo que la densidad del campo de radiación es proporcional a  $r^{-2}$ , vemos que el nivel de ionización es más o menos constante en toda la envoltente. Usamos entonces las predicciones para las condiciones físicas calculadas para las partes exteriores de una atmósfera del modelo de Kurucz (1980) para una estrella de 5500°K y  $\log g = 0$  para calcular la ionización en la parte interior de la envoltente. La razón  $n(\text{Na II})/n(\text{Na I})$  de aproximadamente  $3.4 \times 10^4$ , obtenida así, es representativa de la razón en toda la envoltente. Ignorando ionizaciones dobles del sodio, llegamos a una densidad columnar del sodio de  $5.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ . Suponiendo abundancias cósmicas de los elementos, calculamos una densidad columnar total de  $3.3 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ .

Para calcular la tasa de pérdida de masa usamos la ecuación siguiente:

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi v r_0^2 \rho(r)$$

donde  $v$  es la velocidad de expansión,  $r_0$  es el radio interior de la envoltura y  $\rho$  es la densidad. La cantidad menos conocida es el valor de  $r_0$ . Este problema se ha discutido varias veces (ver por ejemplo Van der Hucht *et al.* 1980). Los resultados de varios promedios son entre 5-10 R para las supergigantes del tipo K y M (cf. Stencel *et al.* 1981). Las estrellas del tipo G son más calientes, y posiblemente tienen radios interiores más grandes, aunque probablemente del mismo orden de magnitud.

El radio calculado para  $\rho$  Cas (F8p1a) y HR 8752 (G5Ia-0) por Barnes *et al.* (1976) es de unos  $10^{14} \text{ cm}$ . Estimando  $r_0$  entre  $10^{14}$  y  $10^{16} \text{ cm}$ , nuestros resultados para HD 269723 nos dan límites inferiores para la tasa de pérdida de masa entre  $3.9 \times 10^{-4}$  y  $3.9 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$ . Aunque estas pérdidas son aparentemente muy grandes, ya Lambert *et al.* (1981) han calculado una tasa de pérdida de masa para  $\rho$  Cas de  $7 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$  por medio de las líneas de CO.

#### IV. CONCLUSIONES

La pérdida de masa tan alta en estas estrellas presenta un problema de evolución, a menos que éste sea un

fenómeno de corta duración. La escasez de este tipo de estrellas también es evidencia de que no permanecen mucho tiempo en esta etapa.

¿Qué mecanismo puede causar tal pérdida? Una alternativa ha sido sugerida por Lambert *et al.* (1981) de que se puede disminuir la tasa calculada si hay una circulación entre la fotosfera y la envoltente. Evidencia adicional a favor de que la circulación se encuentra en la asimetría de la emisión de las líneas de Ca II y Mg II, la cual es dominante en el lado violeta, indicando que hay material en descenso, como en los supergránulos solares. Probablemente, hay una combinación de circulación entre la parte interior de la envoltente, la cual estaría conectada a la fotosfera, y una expansión en las partes exteriores de la envoltente.

Observaciones en varias longitudes de onda, indican que las estrellas del tipo GII, y menos luminosas, poseen coronas parecidas a la del sol, mientras que las estrellas de tipo G más luminosas poseen atmósferas muy extensas y experimentan una gran pérdida de masa (Basri y Stencel 1981). Son necesarias más investigaciones de las estrellas supergigantes el tipo G para comprender la estructura de las atmósferas y el mecanismo de pérdida de masa.

Queremos agradecer al personal de los observatorios de Cerro Tololo y de Kitt Peak por permitirnos obtener las observaciones; también nuestro agradecimiento al Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics por permitirnos usar su microdensitómetro y computadora.

#### REFERENCIAS

- Barnes, T., Evans, D., y Parsons, S. 1976, *M.N.R.A.S.*, 174, 503.  
 Basri, G. y Stencel, R. 1981, *Bull. AAS.*, en preparación.  
 Chiosi, C., Nasi, E., y Sreenivasan, S.R. 1978, *Astr. and Ap.*, 63, 103.  
 Cram, L., Rutten, R., y Lites, B. 1980, *Solar Phys.*, en prensa.  
 Deutsch, A.J. 1960, en *Stellar Atmospheres*, ed. J.L. Greenstein, (Chicago: University of Chicago Press).  
 Hagen, W. 1978, *Ap. J. Suppl.*, 38, 1.  
 Humphreys, R.M. 1979, *Ap. J. Suppl.*, 38, 309.  
 Kurucz, R.L. 1980, *Ap. J. Suppl.*, 40, 1.  
 Lambert, D., Hall, D., y Hinkle, K. 1981, en preparación.  
 Stencel, R.E. 1977, *Ap. J.*, 215, 176.  
 Stencel, R.E., Linsky, J., Jordan, C., Brown, A., Carpenter, K., Wing, R., y Czyzak, S. 1981, entregado para su publicación en *M.N.R.A.S.*  
 Van der Hucht, K., Bernat, A., y Kondo, Y. 1980, *Astr. and Ap.*, 82, 14.

## DISCUSION

*Torres-Peimbert:* ¿Se podría decir, del trabajo realizado, que la pérdida de masa no depende de la metalicidad?

*Hagen:* Los errores inevitables en la determinación de la tasa de pérdida de masa todavía impiden tener una respuesta.

*Smolinsky:* Do you observe considerable sporadic or periodic changes of the spectra, i.e., strong broadening of some spectral lines and their splitting?

*Hagen:* We have only one exposure of all but two stars and instrumental problems prevent direct comparison for one of these. No major changes are seen in the other star (HDE 271182). The lines are very broad in all four LMC stars observed. Two recently obtained plates will be examined for changes.

Idy Hagen: Whittin Observatory, Wellesley College, Wellesley, MA 02181, EUA.

Berta M. Humphreys: Department of Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, EUA.

Bert E. Stencel: J.I.L.A., University of Colorado, Boulder, CO 80309, EUA.

