

## INFORMES DE BECA

### CLASIFICACION ESPECTRAL

M. E. Castore

(Observatorio Astronómico e IMAF, Córdoba)

"Spectral classification may be defined as the direct estimation of the physical characteristics of stars by comparison of their spectral features". (P.C. Keenan, Classification of Stellar Spectra, Basic Astronomical Data, Vol. III on Stars and Stellar Systems).

El Sistema Tri-paramétrico Temperatura, Luminosidad, Metalicidad, respeta la evolución genealógica de los métodos, es decir el Sistema unidimensional de temperaturas de Harvard y la Clasificación Bidimensional de Morgan, Keenan y Kellman, a la vez que perfecciona las técnicas empleadas gracias a la enorme precisión del instrumento actual. En particular la introducción de la metalicidad como tercer parámetro condujo muchas veces a desplazamientos en el diagrama H-R ( $M_V$  versus Tipo espectral) de una o más clases de luminosidad, modificando así la clasificación bidimensional de algunas estrellas. Este hecho se debe a la existencia de líneas que en ciertas estrellas se presentan con intensidades mayores o menores de lo correspondiente a otras juzgadas de su misma clasificación; éstas han sido objeto de estudio, y lejos de corresponder a una distribución al azar, se les observó un comportamiento particular sólo en aquellas estrellas muy ricas o muy pobres en metales. En las primeras -llamadas "metalizadas"- esas líneas aumentan sus intensidades normales, mientras que en las segundas -las "no-metalizadas"- dichas líneas son relativamente poco intensas frente a las de estrellas calificadas de "metalicidad normal".

En el sistema desarrollado en el Observatorio de Córdoba, la metalicidad sólo tiene el sentido de un parámetro estimativo que permite clasificar correctamente.

Precisamente uno de los objetos de este trabajo es colaborar en la búsqueda de nuevos criterios que puedan aplicarse al Nuevo Atlas del Hemisferio Sur, verificando si son consistentes con los ya existentes para ver si estos últimos son también aplicables a dicho Atlas. La confección de este Atlas del Hemisferio Sur que está siendo llevado a cabo por el Observatorio de Córdoba en colaboración con el Observatorio de La Plata, exige la standardización de estrellas en ciertas zonas del diagrama H-R donde aún faltan estrellas de referencia para la clasificación espectral. La importancia de la standardización de estrellas reside en tener con ella una base segura para clasificar o interpolar -por encaje- estrellas de clasificación desconocida.

Una de las zonas a "rellenar" es la correspondiente a supergigantes en el rango F 8 - K 0, razón por la cual los criterios y conclusiones de la presente información están limitados a ese rango espectral de estrellas supergigantes con algunas notas para gigantes y enanas dentro del mismo rango.

Un criterio de particular interés -aplicado en este trabajo- es la búsqueda de "igualdad de líneas" para definir un tipo o clase espectral, el cual no es un criterio absoluto pues también puede caracterizársele por alguna relación de mayor o menor, siempre que tal relación se mantenga en toda la clase y sea realmente un indicador, aclarándose que el primer criterio tiene mayor peso. Esta definición por "igualdad de líneas" o "relaciones de mayor o menor" debe realizarse preferentemente con líneas independientes del hidrógeno (especialmente en las clases tardías donde se presenta químicamente alterado), y no sensibles a la metalicidad, ya que en aquellas estrellas metalizadas o pobres en metalicidad, esas líneas alterarían los criterios.

Es conveniente aclarar además, que en general no se puede hablar de criterios térmicos, luminosos o metalizantes, "absolutos", pues la mayoría de las relaciones son criterios mixtos, y según sean más o menos sensibles a uno u otro parámetro, se denominan respectivamente Térmicos, Luminosos o Metalizantes.

También se menciona como criterio empleado en este trabajo para clasificar, la conveniencia de elegir líneas que se presentan en distintos estados de ionización para cada tipo o clase, para establecer relaciones interlíneas, condición que no excluye el relacionar también líneas ionizadas entre sí, ya que hay algunas que cambian de estado más rápidamente que otras sobre el nivel de energía en que se encuentren, como ocurre por ejemplo en los 10 pares de líneas sensibles a luminosidad propuestos por la clasificación de Monte Wilson (Basic Astron. Data, Vol. III of Stars and Stellar Systems) para estrellas de tipo G-M, en los cuales la primera de las líneas de cada par muestra un positivo efecto de luminosidad, en tanto que las líneas del Fe usadas para comparar cambian relativamente muy poco con la luminosidad.

### El material

El material utilizado actualmente en el Observatorio Astronómico de Córdoba está constituido por placas fotográficas tomadas con el espectrógrafo I del reflector de 154 cm de la estación astrofísica de Bosque Alegre.

Este espectrógrafo tiene una cámara Schmidt de aproximadamente 400 mm de distancia focal, y la ranura que se proyecta sobre la placa fotográfica es de 19 micrones de ancho. Las placas usadas -de 43 Å/mm de dispersión- son IIA-0, en cuyo revelado se utiliza un método adecuado a fin de lograr un moderado contraste entre líneas, necesario para obtener buenos registros microfotométricos.

La clasificación espectral de las mismas no se hace analizándolas directamente, sino transportadas a registros microfotométricos, absolutamente fieles a las impresiones de las placas fotográficas, cuya comparación permite un análisis cuidadoso de las relaciones inter-líneas. Estos espectrogramas se obtienen con un Registrador Hilger, a una velocidad de 0.25 mm/minuto, que corresponde a una dispersión de 5 Å/pulgada de papel.

Las placas fotométricamente standardizadas, y los registros linealizados con un sistema de resistencias -construído en el Observatorio de Córdoba- acoplado al microfotómetro.

Con estas técnicas modernas, el análisis espectral alcanza gran exactitud, ya que líneas en "blend" que para el ojo son imposibles de separar, dan origen a nuevos criterios al ser considerablemente amplificadas, y por ende, distinguibles sus componentes con el instrumental actual.

#### TECNICAS DE CLASIFICACION: Observaciones generales

El método utilizado para clasificar responde al esquema del sistema MKK, según los criterios citados para los distintos tipos y clases espectrales en An Atlas of Stellar Spectra de W.W. Morgan, P.C. Keenan and E. Kellman. Estos sólo sirven para ubicar aproximadamente las estrellas en las dos coordenadas, ya que en la mayoría de los casos estos criterios no bastan para establecer una clasificación definitiva. Precisamente el objeto de la búsqueda de nuevos criterios reside en fijar bases firmes que aseguren una determinada clasificación, ya que actualmente se cuenta con un instrumental que así lo permite, notándose que este análisis más minucioso condujo muchas veces a desplazamientos de estrellas standards en el diagrama H-R.

Por otra parte, en las clases tempranas, aún hasta G 8 ó G 9, los espectros son más intensos en el ultravioleta, mientras que en las tardías predominan en el rojo, y son muy débiles o a veces desaparecen en el ultravioleta.

Ya que el rango en tipo espectral a que se refiere esta información corresponde a estrellas relativamente tempranas, es posible mencionar algunos criterios encontrados en el ultravioleta, poco tratados hasta ahora, que junto con los correspondientes a otras zonas, contribuyen a asegurar las clasificaciones espectrales. Estos criterios son de particular interés para clasificar estrellas cuyas placas están sobreexpuestas fotográficamente, ya que en estos casos los espectrogramas son fieles solamente a la zona no-ennegrecida, que corresponde generalmente al ultravioleta, y en algunos casos puede alcanzar algunas longitudes de onda mayores, según el ennegrecimiento de la placa.

La falta de standards en la zona estudiada en este informe obligó muchas veces a clasificar espectros interpolando simultáneamente en las dos coordenadas -temperatura y luminosidad- tarea que se simplificará si se logra "rellenar" dicha zona. En realidad no se pretende cubrir completamente toda la zona, pero teniendo al menos algunos tipos intermedios, es posible deducir las características de los tipos restantes. Se supone entendido que sólo se puede usar este procedimiento deductivo cuando se trata de "saltos" de no más de uno o a lo sumo dos tipos espectrales. También es de notar que para distinguir las sub-clases de luminosidad, a, ab ó b, se necesitan líneas muy sensibles a la luminosidad, cuyas pequeñas variaciones sean suficientes para caracterizar una u otra sub-clase. También es posible aplicar el procedimiento deductivo para establecer las características de las

clases sin standards, aclarándose nuevamente que sólo es aplicable cuando se trata de "saltos" pequeños. Para este propósito se utilizó como medio auxiliar a la cefeida 1 Carinae, estrella supergigante de clase Ib, que es una variable de largo período  $P = 35^d 556$  - cuyo rango de variación en tipo espectral cubre justamente la zona F 8 - K 0, de modo que su análisis proveerá, si bien no como standard, las bases necesarias para la clasificación de nuevas estrellas tipo. Es importante recalcar que la cefeida se emplea como interpolador entre los tipos F8 Ib - K0 Ib, standards con cuyas características concuerda. Es decir, el análisis de las sucesivas placas tomadas en las distintas fases de su período, permitirá "rellenar" en cierto modo, la zona del diagrama H-R desprovista de standards, sirviendo para definir los criterios de la misma.

Un buen sistema para aplicar en la búsqueda de nuevos criterios es la comparación de espectros de clasificación conocida que difieran mucho en sus coordenadas, por ejemplo comparar simultáneamente GO Ib con GO V y con G5 Ib. Como el "salto" es grande, tanto en tipo espectral como en luminosidad, son bien notables las líneas sensibles a uno u otro parámetro, notándose también las relaciones que corresponden a criterios mixtos. Esto constituye una base de partida para obtener criterios, que analizados a posteriori en las clases intermedias, permite decidir si son válidos o no.

### Criterios Térmicos

En síntesis, para determinar criterios térmicos se comparan, en lo posible, estrellas de la misma clase luminosa correspondientes a distintos tipos espectrales. Sin embargo como la secuencia en temperatura abarca un rango tan amplio -de O a M- es lógico entender que estos criterios varíen gradualmente dentro de cierto rango en el que responden perfectamente a algún criterio, pues suele ocurrir -como se observó en muchos casos- que llegado a un determinado tipo espectral, la diferencia entre las intensidades de las líneas comparadas alcanza una proporción de mayor o menor tan grande que no se puede seguir aplicándolo como indicador.

La predominancia de las líneas del hidrógeno frente a aquellas de longitud de onda vecinas, es un buen indicador de tipo espectral temprano; por el contrario, a medida que se avanza en la escala térmica, se observa que en las clases más tardías, las líneas del hidrógeno se hacen cada vez más débiles hasta perderse entre las líneas de los metales y en las bandas moleculares, o desaparecer para ser sustituido por estas últimas. Por otra parte como los espectros de las clases tardías son más intensos en las longitudes de onda relativamente grandes, el hidrógeno en esta zona es bastante escaso, ya que sus líneas, abundantes y poco distantes en el ultravioleta, se van espaciando cada vez más al avanzar hacia el rojo. Los criterios térmicos citados en An Atlas of Stellar Spectra responden a esta propiedad ya que las relaciones propuestas incluyen las líneas  $\lambda 4045$  Fe,  $\lambda 4226$  Ca,  $\lambda 4325$  Fe-Ni, comparadas con  $H_{\delta}$  y  $H_{\gamma}$  en la forma:  $\lambda 4045/H_{\delta}$  (F5-G8);  $\lambda 4226/H_{\delta}$  (F5-G5);  $\lambda 4226/H_{\gamma}$  (F5-K5);  $\lambda 4325/H_{\gamma}$  (F5-G2); además la relación  $\lambda 4383/$

/  $\lambda$  4406 (G8-K5), y la aparición de la banda G (FO-K5), siendo menester aclarar que se aplican a estrellas supergigantes en la zona de interés mencionada.

Ubicada la estrella según estos criterios, se analizan además otras relaciones que sirven para corroborar o ajustar esta primera clasificación, eligiéndose para este fin las zonas U-V ( $H_{10} - H_8$ ),  $\lambda$  4045 -  $\lambda$  4144,  $\lambda$  4340 -  $\lambda$  4443, en las cuales se usó, según su clasificación previa, los espectrogramas adecuados de 1 Car.

En la zona ultravioleta las relaciones  $\lambda$  3820 ~  $\lambda$  3840,  $\lambda$  3850 ~  $\lambda$  3872, de finen a la clase Ib al menos en el rango F 8 - G 5, en tanto que las relaciones  $\lambda$  4290 =  $\lambda$  4300,  $\lambda$  4352 ~  $\lambda$  4375,  $\lambda$  4404 ~  $\lambda$  4408, la definen en el rango G0 - G 8, excepto la segunda de estas últimas que también se cumple en K2 Ib.

En la zona  $\lambda$  4045 -  $\lambda$  4144 la relación principal es  $\lambda$  4045/ $H_8$  la cual aconseja reemplazar P.C. Keenan (Basic Astron. Data) por  $\lambda$  4144/ $H_8$  a partir de G5 debido a la intensidad que alcanza  $\lambda$  4045 en este tipo espectral.

Entre las diversas relaciones de las distintas zonas, aquellas de validez más general son:

Zona U-V :	$\lambda$ 3824/ $\lambda$ 3825	F8 - G8	
	$\lambda$ 3850/ $\lambda$ 3859	F8 - G8	
	$\lambda$ 3878/ $H_8$	F8 - G8	(propuesta por el Dr. Jorge Landi Dessy)
	$\lambda$ 3886/ $H_8$	F8 - G8	
Zona $\lambda$ 4315 - $\lambda$ 4443:	$\lambda$ 4383/ $H_8$	F8 - G8	
	$\lambda$ 4400/ $\lambda$ 4404	F8 - K2	

Hay además algunas características peculiares en el desarrollo de ciertas líneas que pueden servir de referencia para confirmar las clasificaciones en los tipos espectrales. Tal es el caso de  $\lambda$  3859 y  $\lambda$  3872 que se desdobra en tres líneas la primera y dos la segunda al avanzar de F8 a G8;  $H_8$  a cuya derecha comienza a desarrollarse una línea en F8, que la iguala en intensidad en G5. Así también puede mencionarse el "blend"  $\lambda$  4383-4385, la primera de cuyas líneas comienza a desarrollarse en F8, se alarga hasta igualar a  $\lambda$  4385 en G2 donde comienza a disminuir la intensidad de esta última hasta confundirse con  $\lambda$  4383 a partir de G8.

En esta coordenada la variable 1 Car proporcionó criterios para supergigantes G5, G6 y G7, y posiblemente también para K0 ó K1, ya que el "salto" existente ahora entre G7 Ib y K2 Ib es bastante grande como para decidir definitivamente a cuál de ellos corresponde. Se aclara que la falta de standard supergigantes en el rango G5 - K2 obligó a clasificar los registros microfotométricos de 1 Car interpolando en las dos coordenadas, usando  $\beta$  Sct, Stan G5 II, y  $\eta$  Psc, Stan G8 IIIa.

### Criterios Luminosos

En esta coordenada se adoptó el mismo criterio que para la búsqueda de relaciones térmicas, es decir se analizaron las distintas clases de luminosidad manteniendo fijo, en lo posible, el tipo espectral, procedimiento que dio como resultado algunas relaciones que definen un dato tipo espectral como las que se mencionan a continuación:  $\lambda 3878 = H_{\beta}$  para GO, y  $H_{\gamma} = \lambda 3905$  para G5.

Las zonas elegidas para estudiar el comportamiento de este parámetro son: U-V ( $H_{10} - H_{\beta}$ ),  $\lambda 4215 - \lambda 4340$  y  $\lambda 4375 - \lambda 4461$ , cuyo análisis se realizó para los tipos espectrales GO, G5, G8 y K2.

De las diversas relaciones sensibles a la luminosidad, resulta interesante detenerse a analizar en especial tres de ellas:

- a) El desarrollo de  $\lambda 4067$ , especialmente en la zona G, línea que se debilita respecto a  $\lambda 4071$  y  $\lambda 4057$ , adoptando un comportamiento similar a  $\lambda 4077$  al avanzar de gigantes a enanas.

En G8 V y K2 V es mejor criterio compararla con  $\lambda 4057$  que con  $\lambda 4071$  según el desarrollo que muestran las líneas en los espectrogramas, siendo también adecuado compararla con  $\lambda 4077$ .

Por otra parte, el triplete  $\lambda 4063 - \lambda 4067 - \lambda 4071$  que en supergigantes de tipo G se presenta según la relación  $\lambda 4063 > \lambda 4067 > \lambda 4071$ , cambia su estructura en las supergigantes de tipo K al debilitarse  $\lambda 4067$  frente a  $\lambda 4071$ , constituyendo así un indicador de tipo.

- b) El triplete  $\lambda 4400 - \lambda 4404 - \lambda 4408$ , en el cual las líneas  $\lambda 4400$  y  $\lambda 4408$  se debilitan respecto a  $\lambda 4404$  al pasar de gigantes a enanas, es una característica notable en el rango espectral GO - G5.
- d) La relación  $\lambda 4408 / \lambda 4415$  constituye un criterio bastante sensible para supergigantes K, el cual juntamente con la relación  $\lambda 4455 / \lambda 4461$  -propuesta por P.C. Keenan- muy sensible para enanas K, proporcionan criterios "fuertes" para la clasificación en luminosidad en esta zona.

También en esta coordenada hay líneas con ciertos detalles particulares que sirven más bien para refinar o confirmar una clasificación, como así también hay criterios válidos especialmente para gigantes mientras que otros son preferentemente sensibles para enanas.

Muy buenos indicadores luminosos lo constituyen las líneas  $\lambda 4077$  y  $\lambda 4215$ , que se acortan, respecto a líneas de longitud de onda vecinas, al avanzar de gigantes a enanas, permitiendo determinar una primera clasificación "rápida" en esta coordenada. Sin embargo la introducción de la metalicidad, parámetro esencialmente vinculado con la luminosidad, aconseja no usar como criterio absoluto la intensidad de  $\lambda 4215$ , que es también un indicador de metalicidad.

### Criterios de Metalicidad

$\lambda$  4196 comparada con  $\lambda$  4199 es una de las relaciones que junto con  $\lambda$  4202/ $\lambda$  4215 han sido propuestas por el Dr. Jorge Landi Dessy como criterios metalizantes (Adaptation of the MK System to later spectra of medium dispersion with an intent of three-parametric classification, Symposium N<sup>o</sup> 24), siendo digno de mención el comentario que hizo al respecto el astrónomo Prof. Lindblad:

"I find this investigation very interesting and important. I should like to mention that the sensitivity to the line  $\lambda$  4196 which includes a band-head of cyanogen was studied in a paper by Setterberg a few years ago, who also found it specially sensitive to luminosity. The comments on the 3883 band of CN are also very interesting. The complication here is considerable".

Este tercer parámetro solucionaría en gran medida aquellas "distribuciones al azar", que precisamente no serían tales, sino que responderían al andar de estos nuevos criterios, los de metalicidad. Sin embargo es aconsejable tener especial atención cuando se utilizan criterios térmicos, tales como  $\lambda$  3878/ $\lambda$  3883,  $\lambda$  3883/ $\lambda$  3886, o luminosos,  $\lambda$  3883/ $\lambda$  3886,  $\lambda$  3878/ $\lambda$  3883, que incluyen la línea  $\lambda$  3883, indicador de metalicidad, ya que en aquellas estrellas muy pobres o muy ricas en metales, esta línea alteraría los criterios.

### Conclusiones

Aunque el rango F8 - K2 en el que se analizaron criterios en el presente trabajo, es relativamente reducido, se observa una variación más o menos continua en el comportamiento de los mismos, notándose que aquellos muy sensibles en la zona F, se aplican también en un cierto rango de la zona G, pero van perdiendo paulatinamente su "peso" hasta dejar de ser útiles como indicadores. Simultáneamente van apareciendo otras relaciones "fuertes" en la zona G que manifiestan el mismo comportamiento de las anteriores al pasar a la zona K, a medida que van apareciendo criterios que recién empiezan a ser sensibles a partir de este tipo espectral, observándose un paulatino desplazamiento de las relaciones hacia el rojo a medida que se avanza a tipos espectrales más tardíos. Algo similar ocurre en las clases de luminosidad, observándose que aquellos criterios "fuertes" para tipos espectrales F, se aplican también a algunos tipos G, pero no son ya lo suficientemente sensibles como para caracterizar sub-clases, hasta dejar de ser indicadores luminosos. Simultáneamente aparecen otros, sensibles recién a partir de este tipo. Hay además relaciones que sólo sirven como índice de gigantismo, mientras otras son aplicables preferentemente a estrellas enanas.

Estas conclusiones corroboran algunas observaciones hechas en el desarrollo de este informe, referentes a la deducción de las características de tipos o clases espectrales sin standards, interpolando entre estrellas de clasificación conocida, siempre que éstas no difieran en más de uno o a lo sumo dos tipos o clases espectrales.

Las conclusiones obtenidas conducen a asegurar, al menos en una primera etapa, la coherencia de los nuevos criterios con los correspondientes al Sistema Bidimensional MKK.

#### Aclaraciones

- a) Las relaciones propuestas en la presente información son resultado de promedios de varios espectrogramas de cada estrella correspondientes a distintas placas fotográficas de las mismas.
- b) Todas estas relaciones se analizaron sólo en la zona de interés (F8 - KO), no excluyéndose la posibilidad de extenderlas a otro rango, previo análisis de las mismas.
- c) Las relacionadas encontradas en este trabajo como "nuevos criterios", deben tomarse en un sentido relativo, pues si bien se pueden considerar "nuevas" en el esquema del sistema MKK, no se excluye la posibilidad de haber sido ya estudiadas en algún otro sistema de clasificación.

Para finalizar, deseo agradecer la colaboración del Dr. Jorge Landi Dessy y del Sr. Angel Puch en las discusiones que me proporcionaron sobre el tema; al Sr. José Colazzo por su colaboración en la obtención de las placas fotográficas.

No puedo menos que agradecer también a la Asociación Argentina de Astronomía por la beca de iniciación que me ha otorgado.

Bibliografia:

- |   |      |   |
|---|------|---|
| WHITE   | 1934 | Introduction to Atomic Spectra (New York and London; McGraw-Hill Book Company, Inc.)  |
| JACCHIA, L.                                       | 1929 | Pub. Osser. Astr. Univ. Bologna, Vol. II, N° 2: Sopra alcune variabili irregolari estremamente rapide   |
| JACCHIA, L.                                       | 1933 | Pub. Osser. Astr. Univ. Bologna, Vol. II, N° 14: Le stelle variabili  |
| MILONE, L.A.                                      | 1963 | Principios de clasificación espectral, Boletín del IMAF, Vol. I, N° 5   |
| KEENAN, P.C.                                      | 1963 | Basic Astronomical Data, ed. K Strand Vol. III of Stars and Stellar Systems (Chicago: University of Chicago Press)  |
| JOHNSON, H.L., and<br>MORGAN, W.W.                | 1953 | Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes Spectral Atlas Ap. J., Vol. 117, N° 3   |
| MORGAN, W.W.,<br>KEENAN, P.C., and<br>KELLMAN, E. | 1943 | An Atlas of Stellar Spectra (Chicago: University of Chicago Press)  |
| LANDI DESSY, J., and<br>KEENAN, P.C.              | 1966 | Spectral types on the M.K. system for forty-three bright southern stars, K2 - M6. Ap. J., Vol. 146, N° 2  |
| LANDI DESSY, J., and<br>KEENAN, P.C.              | 1966 | Variations in spectral type of the Mira variables R Cen and T Cen. Ap. J., Vol. 146, N° 2   |
| LANDI DESSY, J.                                   | 1966 | Adaptation of the M-K System to later spectra of medium dispersion with an intent of three-parametric classification. Reprint from International Astronomical Union, Symposium N° 24. |