

FOTOMETRÍA CON FILTROS

Francisco A. Violat Bordonau
 Víctor Violat Martín

Asociación de Variabilistas de España
 Asesores Astronómicos Cacerreños

fviolat@yahoo.es

¿Qué es la Colorimetría?: pues la parte de la Astrofísica que se dedica al estudio del **color** propio de los cuerpos celestes. Conozcamos un poco más de este tema.

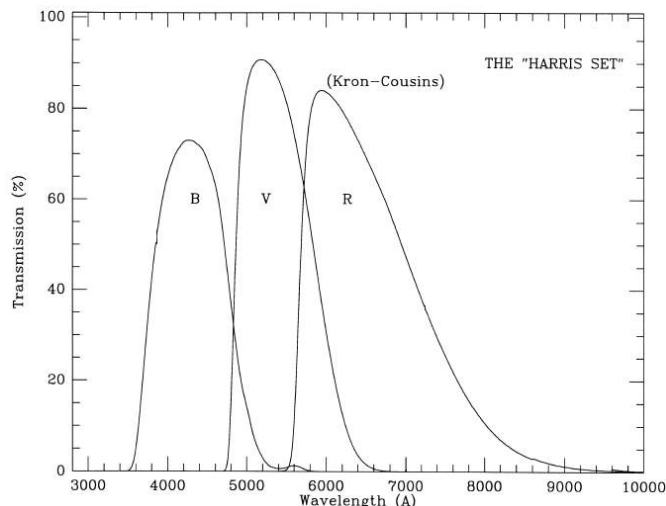
La colorimetría se basa en el uso de la **luz** (radiación electromagnética), que será **filtrada** por medio de vidrios del color apropiado denominados **filtros**: con ello conseguimos que llegue al detector (el ojo, una fotografía, un fotómetro fotoeléctrico o una CCD) sólo una porción del espectro electromagnético: precisamente la parte que más nos interesa para nuestros estudios.

¿De qué color pueden ser los filtros?: pues de todos los colores del espectro visual, desde el **rojo** extremo (o infrarrojo, en aquellos detectores sensibles a esa radiación: por ejemplo el chip de la SBIG ST-4) al **violeta** extremo (o incluso el ultravioleta), pasando por todos los colores intermedios: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta.

¿Cómo son los filtros?: en principio no son más que discos de material coloreado, usualmente vidrio óptico (¡no sirve el vidrio de botella!), rodeados de un anillo de metal con el diámetro apropiado para ser insertados delante del ocular del telescopio o, en trabajos fotométricos, delante del detector (fotómetro, fotografía o CCD). Con ello lo que logramos es **eliminar** (filtrar) parte de la luz recibida dejando sólo la que nos interesa para nuestros propósitos. Existe otro tipo de filtro que es el de gelatina, consistente en una fina lámina de gelatina coloreada: son más delicados que los de vidrio y cualquier roce los estropea.

¿Cómo se utilizan?, de modo simple: basta con insertarlos en el portaocular delante del ocular (si observamos visualmente) o en el lugar del mismo (si hacemos fotografía clásica o con CCD) para que la luz nos quede modificada y nos sea de utilidad ya para nuestros propósitos.

La colorimetría nos permite medir en qué longitud de onda (color) brilla más un astro determinando, de modo indirecto, su **temperatura superficial** y de ésta el **tipo espectral** aproximado. Para hacer estas mediciones de modo preciso se utilizan filtros cuyo pico máximo de transmisión, y anchura de banda (medidas en nanómetros), han sido determinados y definidos con toda exactitud según unos ciertos autores: el primero de ellos fue presentado por H. Johnson y W. Morgan en 1953,



Transmisión de los filtros B, V y R: sistema Kron-Cousins.

utiliza los filtros ultravioleta (**U**, ultraviolet), azul (**B**, blue) y verde (**V**, visual) por lo cual se suele conocer también con el nombre **UBV**. Sus picos de mayor transmisión y anchura son:

	U	B	V
pico (nm)	360	440	550
ancho (nm)	70	100	90

Algo más tarde (1973), al mejorar la sensibilidad de los equipos astronómicos, el sistema Johnson-Morgan se extendió al rojo (**R**) e infrarrojo (**I**), con lo cual los datos quedaron entonces así:

	U	B	V	R	I
pico (nm)	360	440	550	700	900
ancho (nm)	70	100	90	220	240

Después aparece el sistema Kron-Cousins ofrecido en el esquema anterior que utiliza los mismos filtros pero que, con la mejora de los detectores al rojo e infrarrojo, modifica los dos últimos quedando ahora el sistema de este modo:

	U	B	V	R	I
pico (nm)	360	440	550	650	800
ancho (nm)	70	100	90	100	150

también se suele llamar sistema **UBVRI** según la abreviatura de los filtros que utiliza.

Más recientemente (1976) algunos observadores han comenzado a trabajar con un tercer sistema definido por Thuan y Gunn que aparece como una mejora o refinamiento del anterior, puesto que ahora se tienen en cuenta las líneas espectrales producidas por luces parásitas (sobre todo las del alumbrado urbano) que pueden afectar las observaciones astronómicas durante los trabajos nocturnos; los nuevos filtros son:

	u	v	g	r	i
pico (nm)	353	398	493	655	820
ancho (nm)	40	40	70	90	130

en donde **u** es el ultravioleta, **v** el violeta, **g** el

verde (green), **r** el rojo e **i** para el infrarrojo.

Podemos ver en el esquema anterior que las curvas de transmisión de cada filtro son diferentes, tanto en su anchura como en el porcentaje de transmisión: el más "ancho" es el **R** y el más "luminoso" el **V**, con una transmisión del 74,41% en los 530 nm; se produce también un *solapamiento* entre ellos, de modo que podemos cubrir fácilmente todo el espectro visual entre los 360 y 1000 los nanómetros (3.600-10.000 Angstrom si empleamos esta obsoleta unidad de medida).

¿Para qué podemos usarlos?, ¿cómo podemos medir magnitudes o determinar colores?; el uso de estos filtros no es muy difícil de entender. El primer uso al que podemos destinarlos es en la captura de imágenes de un astro (como Júpiter) en diferentes **bandas** o colores, por ejemplo en banda visual (color verde): una imagen del planeta con filtro **V** aparecerá con un aspecto distinto a la imagen tomada con filtro **B** (en banda azul) o con filtro **R** (banda roja), según el color propio de los detalles nubosos; esto mismo es más notorio en los astros intensamente coloreados como ocurre en Marte, en el cual un filtro naranja destaca los detalles superficiales mientras que uno rojo oscurece fuertemente los azules y verdes.

El segundo uso es determinar el brillo de un astro (p. ej. una estrella) en diferentes colores: de este modo podemos medir el brillo de Aldebarán (α Tauri) con filtro verde y obtenemos que su magnitud es 0.85; hacemos lo mismo en azul y resulta que su magnitud es 2.39. ¿Qué quiere decir todo esto?: pues que Aldebarán *brilla más* a través del filtro verde que del azul, pero cuando trabajamos con el rojo notamos que *brilla más* que con el verde y bastante más que con el azul. O lo que es lo mismo: la lógica nos dice que el color de Aldebarán es más bien rojizo que azulado...

El tercer uso, quizá el más interesante, no es más que una derivación lógica del empleo anterior y es determinar el **índice de color**, definiendo éste como el resultado de restar el brillo del astro medido con un primer filtro al determinado con un segundo filtro. De este modo lo que hallamos es la **zona espectral** (o color) en la cual se registra la emisión más alta de luz o, indirectamente, el *tipo espectral* del astro dado que, dependiendo de la temperatura superficial, el pico máximo de energía está localizado en una zona u otra del espectro electromagnético (ley de Wien).

Así si tenemos una estrella que a través del filtro **B** es de magnitud 13.8^a, con el **V** medimos la 12.7^a y con el **R** aparece con 12.0^a sus índices cromáticos respectivos serán entonces estos:

$$\mathbf{B-V: +1.1 \quad V-R: +0.7 \quad B-R: +1.8}$$

siendo, por tanto, *un cuerpo rojizo* dado que su brillo más alto (12^a magnitud) se registra en la zona roja del espectro y esto se pone de manifiesto de inmediato con el filtro **R**. En ocasiones se

determina también el índice de color **U-B** habiendo utilizado en este caso un filtro ultravioleta (**U**) y otro azul (**B**), cuya resta pone de manifiesto inmediatamente si el astro es caliente, bastante caliente, templado o frío.

En cualquier buen programa astronómico del mercado (p. ej. *SkyMap Pro*) casi todas las estrellas de brillo mediano y alto suelen traer los índices de color (medido en el sistema Johnson) del siguiente modo: **B-V**, **U-B** e **R-I**; a modo de ejemplo veamos los índices de color de algunas conocidas estrellas brillantes junto con su tipo espectral, que insertamos a modo de comparación:

Nombre	B-V	U-B	R-I	Espectro
α Ori	1.85	2.06	1.28	M2
α Tau	1.54	1.90	0.94	K5III
α Boo	1.23	1.27	0.65	K0
α Aur	0.80	0.44	0.44	G5III
α CMa	0.01	-0.05	-0.03	A0

Se ha determinado que las estrellas de tipo A (blancas) tengan un índice de color 0.0: según esto las estrellas más calientes (de tipo O y B) tendrán índices negativos; cuanto más alto sea el índice B-V más fría es la estrella y más avanzado (F, G, K, M...) será su tipo espectral: lo mismo ocurre al utilizar los índices U-B o el R-I. Si ordenamos estos índices por longitud de onda creciente nos quedan entonces del siguiente modo:

Nombre	U-B	B-V	R-I	Espectro
α Ori	2.06	1.85	1.28	M2
α Tau	1.90	1.54	0.94	K5III
α Boo	1.27	1.23	0.65	K0
α Aur	0.44	0.80	0.44	G5III
α CMa	-0.05	0.01	-0.03	A0

Ahora se nota mejor la diferencia entre filtros, siendo valores altos en la zona ultravioleta y azul en estrellas frías (α Ori y α Tau, astros de baja temperatura superficial) y bajos o negativos en estrellas calientes (α Aur y α CMa, de alta temperatura superficial), ya que su máximo de radiación se ha desplazado hacia la zona blanca y azul del espectro respectivamente según el tipo espectral.

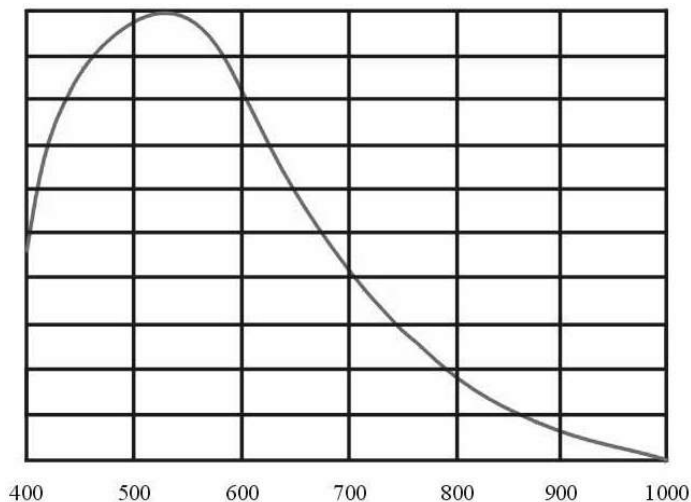
Lo usual es emplear este índice B-V para hacernos una idea del **color** del astro: así en los ejemplos anteriores las estrellas son roja (1.85), anaranjada (1.54), amarilla (0.80) y blanca (0.01). Si los valores son intermedios los colores también lo serán: de este modo un astro con índice de color 0.85 será un poco más anaranjado que el de 0.80 pero bastante más amarillo que el de 0.93.

Podemos saltar sin problema al mundo planetario (y también a los asteroides e incluso los satélites planetarios) para comprobar cuáles son los índices de color B-V:

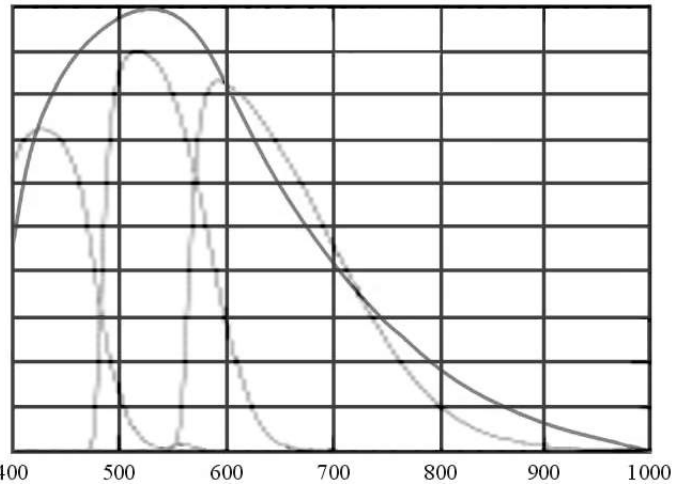
Nombre	B-V	Color
Mercurio	0,93	amarillo
Venus	0,82	blanco
Marte	1,36	anaranjado-rojizo
Júpiter	0,83	blanco-perlino
Saturno	1,04	anaranjado
Urano	0,56	verdoso
Neptuno	0,41	azulado

siendo Marte el planeta más rojizo (un poco más que Arcturo) seguido de Saturno (anaranjado) y quedando Neptuno como el cuerpo más azulado.

¿Podemos determinar con una CCD la magnitud de cualquier astro trabajando **sin filtros**?; en principio **no** pues la sensibilidad del chip a la luz será dispar, siendo más alta en una zona que en otra: así el chip de la **SBIG ST-4** presenta una acusada sensibilidad al color rojo y naranja siendo casi ciego al azul y violeta, mientras que el de la **Starlight MX5** presenta su máximo de sensibilidad en la zona verde (ver gráfico inferior) mientras que lo es muy poco en la zona roja e infrarroja. Comprobamos entonces que, dependiendo de la cámara empleada y su sensibilidad espectral, el brillo aparente de un mismo cuerpo va a ser distinto: un astro rojo aparecerá más brillante con la ST-4 que con la MX5 mientras que uno azulado aparecerá más brillante con la MX5 que con la ST-4; esto ocurre cuando tomamos imágenes de la enana roja *Kuiper 90* con estas cámaras, pues siendo su índice de color B-V nada menos que 1.6 aparece con brillo muy diferente según la CCD que utilicemos para estudiarla.



Curiosamente la curva de respuesta espectral de la MX5 (sobre estas líneas) es bastante similar a la cubierta por los filtros **B+V+R**: ello no impide el que, para hacer mediciones **V**, necesitemos utilizar siempre el filtro **V** y nos alejemos de la tentación de hacerla sin filtros (o sea, en **luz integral**). El chip empleado por estas cámaras de la casa Starlight tiene su máximo de sensibilidad en la zona verde del espectro (cerca de los 530 nm), como el ojo humano durante el día o con iluminación fuerte. Pero todavía hay más: si nos fijamos



bien vemos que el uso de un filtro **R** (580-900 nm), el de uno **V** (480-620 nm) y el de uno **B** (400-480 nm) están casi perfectamente en concordancia con la respuesta espectral del chip; parece que ésta ha sido diseñada por los ingenieros británicos para acomodar estos tres filtros, pues la suma de las curvas de transmisión de los tres, una al lado de la otra, es casi idéntica a la sensibilidad del chip a lo largo de todo el espectro visual.

Para hacer fotometría de calidad adquirimos hace tiempo el filtro verde **V Johnson** (que pasó a sustituir al *Kodak Wratten* nº 58 cuya anchura de banda era 120 nanómetros y cubría el rango 490-610 nm, con una transmisión de la luz del 24%), y es con este filtro con el que hacemos ya todos nuestros trabajos astronómicos.

También disponemos del filtro *Kodak Wratten* nº 25 (rojo oscuro), cuya anchura es de 110 nm y cubre el rango 590-900 nm que equivale al **R** Johnson; al dejar pasar sólo el 14% de la luz las exposiciones han de ampliarse en un factor 7.1 para obtener la misma luminosidad que al hacer fomas sin filtrar. El filtro **B** está cubierto con el *Kodak Wratten* nº 80A (azul) cuya transmisión sube ya al 30% pero que también nos sirve.

Una advertencia: aquellos usuarios de cámaras muy sensibles al rojo e infrarrojo (como la ST-4) deben utilizar **siempre**, instalado delante del chip, el filtro **IR block** en conjunción con cualquier otro filtro (p. ej. el **V**); la misión de dicho filtro es la de bloquear la luz infrarroja en el tramo 700-1200 nm dejando que el otro filtro, sea el que sea, se vea libre de esta *luz parásita*. En las cámaras sensibles el verde (como la MX5) no es preciso este filtro, ya que la sensibilidad del chip es inferior al 8-5% más allá de los 850 nm y decrece suavemente hasta reducirse a 0 en los 1.000 nm.

Perfecto: supongamos que todo ha quedado entendido más o menos bien (y si no es así, es mejor volver al párrafo o cuestión dudosa y releerla hasta que lo esté). ¿Podemos empezar a trabajar ya en serio?, ¿es factible tomar algunas sencillas imágenes para ver los resultados?: a eso vamos.

Dado que este artículo se ha terminado a finales de marzo de 2003, con la constelación de

Orión todavía *a tiro*, no nos ha costado demasiado trabajo capturar la nebulosa M42 tanto en luz integral (sin filtros) como con filtros B, V y R.

Una aclaración: quienes no disponen de verdaderos filtros fotométricos Johnson (bastante caros, todo hay que decirlo) pueden no obstante hacer sus primeros *pinitos*; para ello ha de saber que los filtros fotográficos *Wratten* de la casa Kodak sirven, en principio, para el mismo caso: podemos emplear los siguientes filtros, sabiendo que el máximo de su ventana de transmisión es la siguiente:

B: Wratten 47 (440 nm), Wratten 44 (490 nm)

V: Wratten 40 (510 nm), Wratten 55 (520 nm)

aunque permiten el paso de la luz roja, por lo cual no serían útiles en chips sensibles a esta luz salvo usando uno que bloquee el paso de la luz roja e infrarroja adecuadamente.

Hemos de recordar que la nebulosa de Orión es un *criadero de estrellas* situado a unos 1600 años-luz, que contiene una gran masa de gas (hidrógeno y oxígeno sobre todo), de polvo y que, además, posee varias docenas de estrellas recién nacidas (y, por tanto, bastante frías: emisoras de luz infrarroja y roja): es un lugar ideal para comprobar el uso de los filtros de color. Sin embargo en el seno de la nebulosa podemos observar, resplandecientes blancas o azules, docenas de estrellas calientes de los tipos espectrales O y B de gran masa: por ejemplo las componentes del Trapecio (Theta1) o la llamada Theta2, destacada al SE del mismo.

El color propio de la nebulosa depende de la luz que emiten los gases ionizados que la forman, los cuales brillan principalmente en dos líneas espectrales: la verdosa del oxígeno (OIII en los 500 nm) y la rojiza del hidrógeno (H α cerca de los 650 nm); sin embargo con menor intensidad se emite también luz azulada del OII y del hidrógeno (H γ), verdosa del hidrógeno (H β) y el OIII e incluso rojiza del nitrógeno (NII) en las inmediaciones de los 650 nm.

Cuando capturamos la zona del Trapecio con reductor de focal f/6.3 (la focal queda acortada a 1.260 mm) el campo aparente es algo mayor; con filtro B y 25 s de exposición las estrellas integrantes del mismo, calientes, aparecen brillantes mientras que el fondo celeste (rojizo por el hidrógeno ionizado) es muy débil: no obstante como la nebulosa también emite luz verdosa debido al oxígeno ionizado, ésta no deja de verse y sigue estando presente. Sin embargo con el uso del filtro R la nebulosa es visible (ahora por su luz rojiza) mientras aparecen las más débiles estrellas frías rojizas: notamos que basta una exposición algo más breve para que las estrellas rojizas aparezcan claramente visibles en la toma, además de apreciarse nítidamente detalles internos en la nebulosidad que se notaba algo amorfa e indistinta en luz azul.

Cuando observamos la imagen azul detenida-

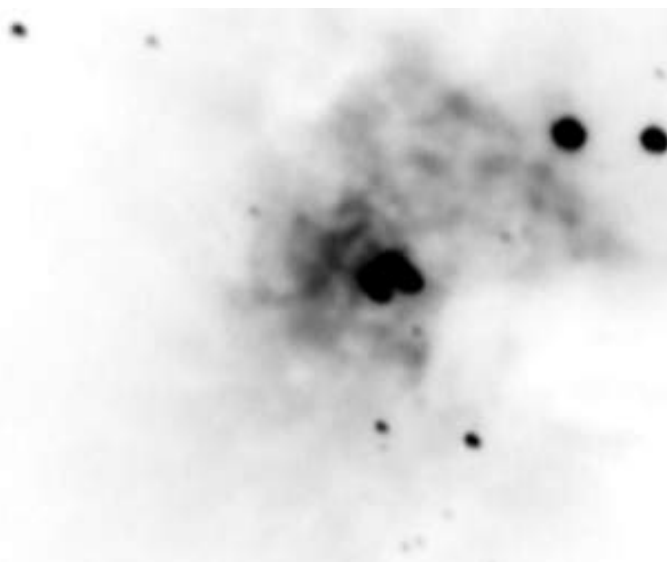


Foto 1: M42 a través del filtro azul con de 20 s (F. Violat).

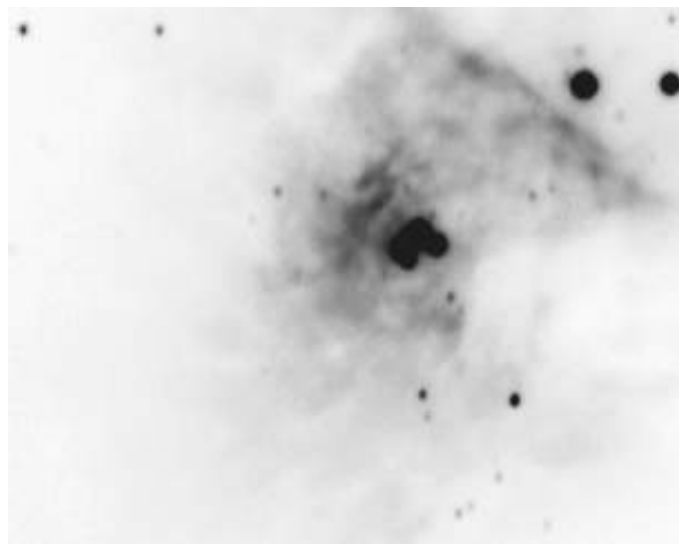


Foto 2: M42 con filtro rojo y 20 s de exposición (F. Violat).

mente notamos que aparecen pocas estrellas en la zona, destacando sólo los astros más calientes O y B mientras que detrás, débiles, aparecen tímidamente algunas estrellitas que parecen muy distantes. Esa misma zona capturada con el filtro rojo es notablemente diferente: siguen apareciendo brillantes las estrellas calientes pero, a la vez, las estrellitas que antes se veían tímidamente han cobrado brillo y son fácilmente individualizables una a una. Con respecto a la nebulosa en sí, la "barra" inclinada que aparece justo al este del trapecio (o al oeste de Theta2) es de color rojizo: lógico es que sea más nítida con luz roja que azul.

El resto de la nebulosa, que llena prácticamente *toda la imagen*, es de notorio color verdoso: por ello aparece tanto en luz azulada como rojiza, al ser su color la suma conjunta de los dos colores (rojizo del hidrógeno y azulado del oxígeno); sin embargo ciertos detalles concretos se distinguen mejor con un filtro u otro, según la tonalidad dominante de la misma.

Al superponer la imagen B a la R y desplazar-

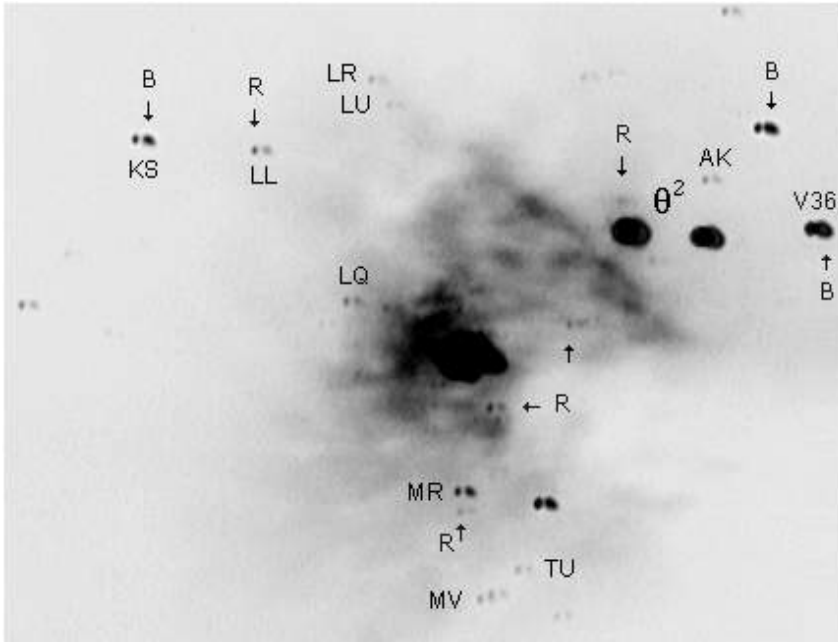


Foto 3: superponiendo una foto en luz azul con otra en luz roja, y desplazando levemente las imágenes, se pone de manifiesto el color propio de los astros que son o bien rojos (R) o bien azules (B).

las un poquito para poder comparar el aspecto de las estrellas (sobre estas líneas) se aprecian claramente las diferencias: así vemos que la variable **LL** (como **AK**) brilla más con filtro R que B debido a su tipo espectral (K4IV) mientras que su compañera **KS** brilla más con el B que con el R. Esto mismo ocurre en la variable **V361**, más brillante en filtro B que R debido a su tipo espectral caliente (B5V); el resto de las estrellas variables, todas del tipo IN (Irregular Nebular) aparecen más brillantes con el filtro R que con el B.

Encima de la estrella **Theta2** aparece, en las imágenes profesionales en color, un glóbulo nebuloso de fuerte color rojizo: en nuestras fotos, como era de esperar, se destaca más en la fotografía con filtro R que en la tomada con el B; exactamente lo mismo ocurre con una estrellita situada al NE de **Theta1**, envuelta en nebulosidad rojiza y que sólo aparece bastante más notoria al trabajar con el filtro rojo...

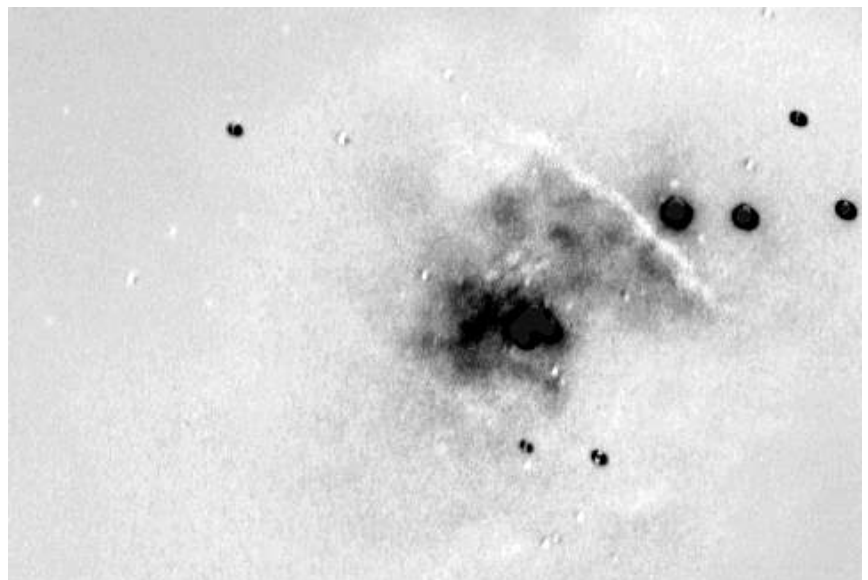
¿Y qué ocurre si sumamos ambas imágenes, una negativa y otra positiva?: pues que los detalles de color dispar (rojo en este caso) aparecen **blancos**: es el caso de la "barra" antes citada, de fuerte color rojizo, que aparece muy destacada sobre el fondo verdoso de la nebulosa. La turbulencia notoria de la imagen azul (los astros aparecen movidos), el que las dos imágenes se hayan tomado con tiempos dispares y la propia naturaleza del chip impiden que los astros se anulen completamente: no obstante las estrellas más calientes

(azules) aparecen notoriamente **negras** (p. ej. **KS**, **Theta2** o **V361**) poniendo en evidencia al resto de cuerpos que son fuertemente rojizos. Si nos fijamos bien encima de **Theta2** aparece una mancha blanca: no es más que un glóbulo rojizo muy visible en la imagen roja; no obstante, por toda la fotografía aparecen estrellitas blancas que son astros de luz rojiza tal como el que está situado bajo las variables **MR**, **LQ** o la propia **TU**. Sin embargo el objeto más blanco (más rojo en realidad) es la estrella situada inmediatamente al norte del Trapecio, muy evidente en luz roja y señalada con una flecha (y la letra R) en la foto 3.

La nebulosa (que es verdosa), por su parte, muestra zonas oscuras (verdosas) menos intensas y algunas que casi se ha vuelto *grises*, al anularse la luz roja, verde y la azul dispersa en ella; aunque el sector más destacado es sin duda la "barra" que aparece blanca al ser de un intenso color rojizo.

¿Podríamos determinar tipos espectrales?: sí, aunque de modo aproximado; si medimos la magnitud de una estrella con el filtro B, la medimos con el V y luego restamos la B a la V obtenemos el índice de color **B-V**, muy empleado en Astrofísica y ya citado párrafos atrás. Utilizando un buen catálogo estelar que contenga miles de índices de color (por ejemplo el bien conocido *Sky Catalogue*) podemos saber, por comparación con los índices de estrellas que ahí aparecen, cuál es el tipo espectral aproximado de un astro. De este modo si el índice fuese 0.9 el tipo espectral puede estar situado entre el G4 y el G9 con bastante aproxima-

Foto 4: sumando una foto positiva y otra negativa, de diferentes colores, aparecen blancos los astros rojos y negros los azules; obsérvese la barra rojiza junto a Theta2.



ción, necesitando disponer de dos decimales para afinar todavía más (p. ej G5 si fuese 0.93).

En fin, como podemos ver estamos en disposición de realizar trabajos bastante serios con medios sencillos y divertidos pues, no lo olvidemos, todo esto se está haciendo sólo con dos/tres filtros de color, algunos conocimientos físicos y un poco de imaginación...

Observatorio Astronómico de Cáceres (España), 31 de marzo de 2003.

Astronomical photometry, Henden, A. A. Van Nostrand Reinhold (1982).

The study of variable stars using small telescopes (editado por J. R. Percy), Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (1986).

The classification of stars, Jaschek, C., Jaschek, M., Cambridge University Press (1987).

The Observation and Analysis of stellar photospheres, D. F. Gray, Cambridge Univ. Press, U.K. (1992).

Astronomical Photometry. A Guide, C. Sterken y J. Manfroid, Kluwer Academic Pub., Holanda (1992).

BIBLIOGRAFÍA

On the Color-Magnitude Diagram of the Pleiades., H. L. Johnson, W. W. Morgan, ApJ **114**, 522 (1951).

Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas, Johnson, H. L.; Morgan, W. W., ApJ **117**, 313 (1953).

Some Characteristics of Color Systems, Morgan, W. W.; Harris, D. L.; Johnson, H. L. ApJ **118**, 92M (1953).

Astronomical techniques, Irwin, J. B., University of Chicago Press (1962).

Photoelectric Astronomy for amateurs, Wood, F. B., Macmillan (1963).

H. L. Johnson, Comm. Lunar. Planet. Lab, No. **53** (Univ. Arizona) 3, pp. 73-77 (1965).

Introduction to astronomical photometry, Golay, M., Reidel D. Publ. Co. (1974).

VRI standards in the E regions, Cousins, A. W. J., Mem. R. Astron. Soc, **81**, 25 (1976).

A new four color intermediate-band photometric system, Thuan, T. X.; Gunn, J. E., PASP **88**, 543 (1976).

VRI Photometry of E and F Region Stars, Cousins, A. W. J., M. N. Astr. Soc. South Africa, **3**, 8 (1978).

Photoelectric Photometry of Variable Stars, Hall, D. S. y Genet, R. M., I.A.P.P.P., Faiborn, U.S.A. (1982).

EN INTERNET

http://www.astored.org/contenidos/articulo.php/francisco_violat/colorimetria/1.html

<http://www.astro-digital.com/5/fotometria.html>

<http://www.astrogea.org/VARIABLE/promocion.htm>

http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/eduardo_e/node30.html

http://condor.cida.ve/~briceno/cursos/astrof_observ/clase3/cnegro.html

http://www.astro.puc.cl/~linfante/fia1010_1_02/tareas/tarea_05/

<http://docs.kde.org/es/HEAD/kdeedu/kstars/ai-colorandtemp.html>

<http://www.institutocopernico.org/cic/cic13.htm>

<http://www.dfuls.cl/~cen/centauri/curso/clase4.html>

<http://www.britastro.org/vss/gc-cofp1.html>