

## VARIABLES EN M13

### L414, UNA NUEVA VARIABLE

Francisco A. Violat Bordonau

Toni Bennasar Andreu

Asociación de Variabilistas de España  
Asesores Astronómicos Cacereños

violat@olanet.net

En artículos anteriores hemos estudiado algunas de las variables rápidas más fáciles de M13, como las cefeidas V2 y V6: en esta ocasión queremos exponer la confirmación de una nueva variable, la primera de las cinco gigantes rojas que hasta ahora hemos descubierto o confirmado en M13.

Las estrellas más brillantes de los cúmulos globulares son astros amarillo-anaranjados que pertenecen al tipo *gigante roja*: al capturar una imagen de M13 podemos estudiar fácilmente en ella, con toda comodidad, varias docenas.

Una gigante roja es una estrella fría, grande y muy luminosa que ha abandonado la secuencia principal al haber agotado el hidrógeno de su núcleo, aunque se mantiene todavía estable al fusionar elementos químicos más pesados (helio, litio, carbono...). Debido a su baja temperatura superficial visualmente aparecen de color amarillo fuerte o naranja (Barnard, 1900 y 1909), presentando tipos espectrales G, K y M aunque son muy luminosas debido a su dilatado tamaño (tienen una gran superficie emisora de radiación); se puede decir que es más brillante, grande y fría que una estrella de la secuencia principal de la misma masa presentando diámetros de 5 a 25 veces el solar, con luminosidades desde decenas a miles de veces la de nuestro sol.

Esta etapa es una más en la evolución estelar estando caracterizada porque el astro ha iniciado ya la “ignición del helio”, fenómeno que origina inestabilidades en su tamaño físico (radio) y, de ahí, la superficie emisora y brillo aparente resultante. No es de extrañar que todas, o casi todas, las gigantes rojas oscilen de brillo con períodos largos que se miden en decenas de días (variables pulsantes), un ejemplo de las cuales puede ser Aldebarán, gigante naranja de tipo K5III que varía irregularmente en torno a la magnitud 0.85 con una amplitud de 0.1 magnitudes. Otra estrella gigante muy conocida es Arcturo, astro anaranjado de espectro K2III situado a 37 años-luz cuya luminosidad absoluta (la magnitud visual si la situamos a 32.6 años-luz) es -0.3: su cercanía a la Tierra permite que brille con magnitud -0.04<sup>a</sup> siendo, por tanto, la estrella más brillante del hemisferio norte y la cuarta más resplandeciente de todo el firmamento. La última estrella gigante roja que mencionaremos es la bien conocida Betelgeuse, inmensa esfera fría que también cambia de tama-

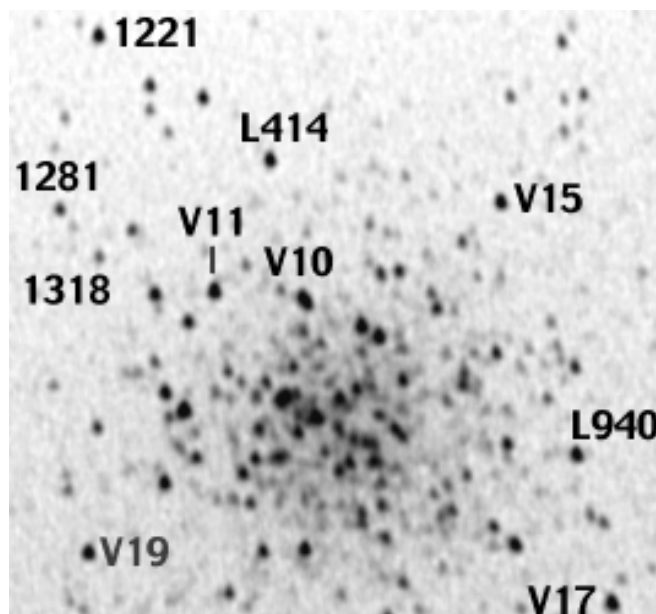


Imagen digital de L414, las estrellas de comparación y algunas de las variables, o sospechosas, citadas en el trabajo: norte abajo, este a la derecha (F. A. Violat, SC-203 mm).

ño y brillo con un período cercano a 2.110 días.

Las gigantes rojas globulares son “pobres en metales” (al ser astros muy viejos de la Población II), lo que quiere decir que la concentración de elementos pesados que contienen puede ser tan pequeña como el 1% (o menor) de la solar. La *metalicidad* de M13 (el contenido en elementos químicos más complejos que el hidrógeno o el helio) ha sido cifrada en 1999 en **-1.54 dex**: esto quiere decir que el contenido medio en metales es equivalente a 1/35 del valor solar (Sol= 0 dex).

En el verano de 2000 uno de nosotros (Violat) hizo un intento de búsqueda de variables en M13: por desgracia sin experiencia fotométrica alguna, sin buenas cartas de identificación, filtros fotométricos o software de análisis adecuado la campaña fue prácticamente un fracaso. Después de localizar en Internet, concretamente en el servidor del “NASA Astrophysics Data System, ADS” ([http://adsabs.harvard.edu/abstract\\_service.html](http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html)), mucha información sobre M13, estudiarla a fondo y elaborar una carta de sus variables, sospechosas y estrellas de referencia (tal como hemos explicado en un artículo previo), comenzamos a estudiar el globular en mayo de 2001 con 4 proyectos de investigación muy bien definidos:

- 1) obtener curvas de brillo y medir los parámetros (rango de oscilación y período) de sus cefeidas más fáciles (V2 y V6), para poner a prueba nuestro equipo y métodos de trabajo

- 2) obtener curvas de brillo, rangos de oscilación y períodos de las variables del tipo gigante roja bastante bien conocidas

- 3) confirmar que las estrellas clasificadas como del tipo “variable sospechosa” lo son, determinando el rango, el período y la curva de brillo

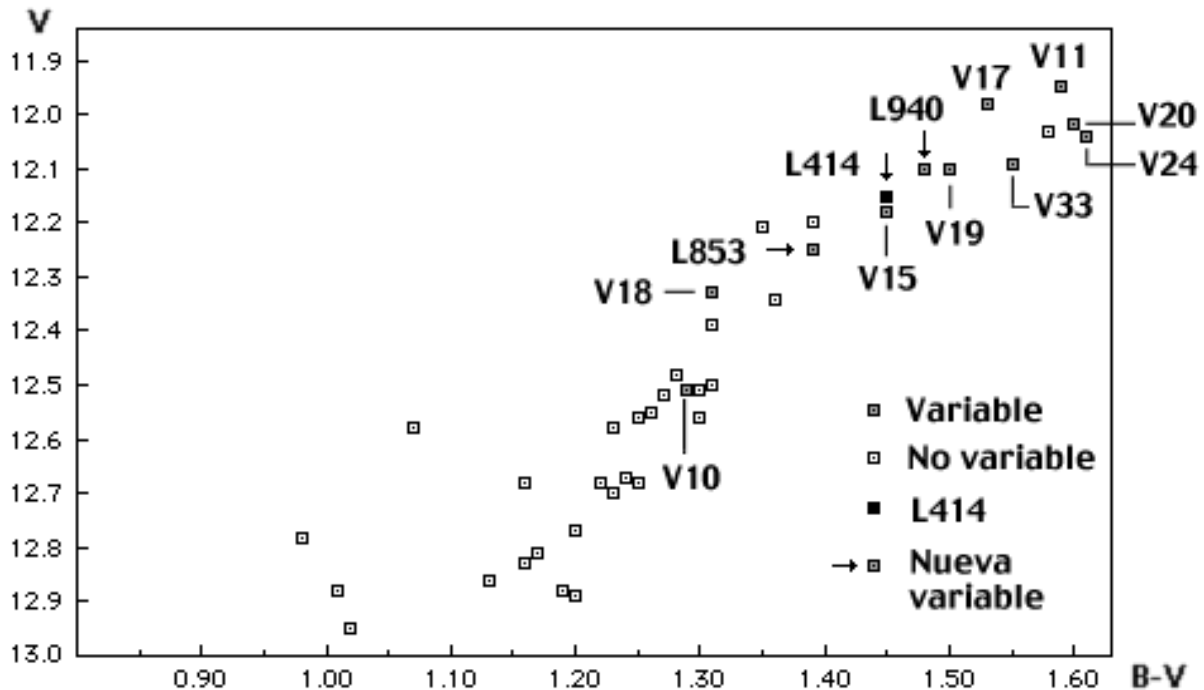


Figura 1: Posición de L414 (cuadro negro), y de dos nuevas variables descubiertas por nosotros (L940 y L853), en un diagrama color-magnitud de M13; se han señalado con cuadros grises y nominado las variables bien conocidas; como se puede apreciar las tres nuevas variables se encuentran situadas en la cima de la Rama de las Gigantes Rojas. (F. A. Violat).

4) localizar nuevas estrellas variables “rápidas” como RR Lyrae o cefeidas, de las cuales se conocen muy pocas en M13.

Para intentar conseguir estos resultados hemos tomado noche a noche (siempre que la meteorología local lo ha permitido: afortunadamente al disponer de dos observatorios, muy distantes entre sí, esto ha sido posible casi siempre) imágenes CCD del cúmulo -en ocasiones incluso una decena de ellas en cada sesión de trabajo, para realizar *fotometría rápida* de cefeidas-, empleando telescopios catadióptricos de 203 mm (Cáceres, “Observatorio Astronómico de Cáceres”) y 305 mm (Palma de Mallorca, Observatorio Astronómico “Ca Nostra”) dotados de filtros “V” Johnson para normalizar las mediciones; tras la resta de cuadros oscuros y campos planos se han abierto y medido las imágenes con el programa **IRIS** (disponible en la página web de Christian Buil: <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>), para determinar la magnitud de cada estrella y se han analizado estas medidas con **A.V.E.**, software empleado por el Grupo de Estudios Astronómicos (se puede descargar fácilmente de su página web: <http://www.astrogea.org/web-gea/software.htm>)

para la búsqueda de períodos, representación de curvas de brillo y otros estudios o trabajos más complejos.

## ANTECEDENTES

**L414**, denominada así por aparecer en el puesto 414 dentro del catálogo de estrellas de M13 elaborado por el astrónomo alemán Hans Luden-

dorff (1905), es propuesta como nueva estrella variable por el astrónomo Ruscho Russev en 1974; en diciembre de ese mismo año Wayne Osborn, utilizando 56 placas tomadas para otras tareas a lo largo de 3 años, publica una breve nota en la que indica que no aprecia variabilidad alguna: “*Encontramos que, hasta la precisión de nuestras observaciones, L414 no varía*”. Osborn y Fuenmayor (1977) detectan oscilaciones de brillo (como máximo 0.26 magnitudes en banda B, con filtro azul) y encuentran un posible período de 105 días, aunque no se atreven a asegurar que es variable: “*Encontramos que L414 no es variable hasta nuestro límite de detección, aunque la estrella puede ser una variable de pequeña amplitud... Se necesitan observaciones fotoeléctricas para decidir la cuestión*”. Welty, en su trabajo sobre gigantes rojas (1985), no es capaz de encontrar variabilidad alguna, seguramente porque su rango de oscilación en banda V (o banda “visual”, brillo medido con filtro de color verde) es inferior a su límite de detección: hasta 0.2 magnitudes en banda B. Lupton, Kraft, Lyons, Shetrone y otros detectan, entre 1987 y 1997, claros indicios de variabilidad en L414 (y otras estrellas), aunque ninguno las propone como nuevas variables. Finalmente Osborn comenta en su artículo -junio de 2000- que ve probable su variabilidad pero sin ofrecer nuevos datos ni explicar los motivos: “*La variabilidad es probable para L414... y (con menor certeza) para L940*”; imaginamos que porque ha comprobado que es variable, aunque no dispone de material para demostrarlo (en comunicación privada nos aseguró que todavía no había podido medir muchas placas de 1969...). Hemos de indicar que L940 es precisamente otra de las

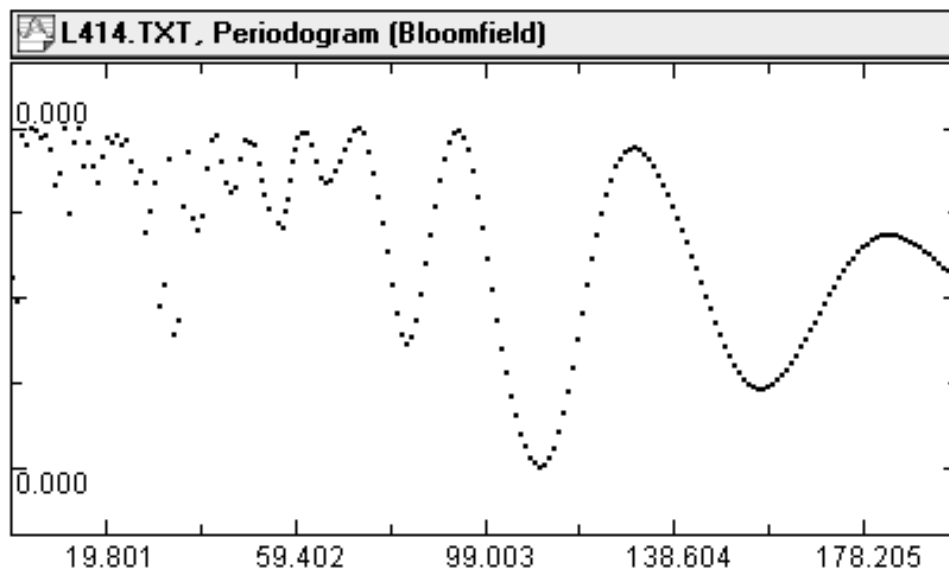


Figura 2: Periodograma de L414 empleando el algoritmo de Bloomfield; se observa claramente el período de oscilación, levemente superior a los 111 días (F. A. Violat).

nuevas variables confirmadas por nosotros: esto nos demuestra que sabe más de lo que publica y que, al no disponer de más datos, prudentemente no se atreve a asegurar nada; sin embargo vuelve a lanzar una atrevida hipótesis: *“Los datos indican que las gigantes rojas con índices de color  $B-V > 1.45$  son variables, con amplitudes mayores en banda B que en V e incrementándose con el índice de color”*.

Nuestras mediciones muestran que L414 (cuyo índice de color  $B-V$  es 1.45) es realmente una estrella variable, con un período de **111.5 días** y una amplitud (con filtro V) de **0.14-0.15 magnitudes**, totalmente de acuerdo con los trabajos de Russev, Fuenmayor, Welty, Osborn y otros astrofísicos.

## MÉTODO DE TRABAJO

Para identificar las nuevas variables (confirmar en este caso, ya que era sospechosa de variabilidad) hemos estudiado el globular durante un período de **521 días** (DJ 2.452.076 al DJ 2.452.596, ambos inclusive), y en él medido durante **129 noches** (DJ 2.452.076-52.204) en 2001, y **189 noches** (DJ 2.452.408-52.596) en 2002, la magnitud V de 30 estrellas diferentes (entre variables, sospechosas y estrellas elegidas cuidadosamente por nosotros) por medio de la *fotometría diferencial*; una de ellas ha sido **L414** también conocida como **III-56**, pues así aparece en el artículo clásico de Halton C. Arp (1955). Es una estrella gigante roja (visualmente aparece amarillenta) de magnitud V media 12.15<sup>a</sup> que pertenece al cúmulo de acuerdo con su velocidad radial, movimiento propio y posición en el diagrama color-magnitud de M13 (Cudworth y Monet, 1979, figura 1); su espectro es **G8Ib** según el trabajo de Carl Popper (1947).

Para la calibración del software se han empleado dos estrellas no variables utilizadas por Osborn

(en junio de 2000) de magnitud V 12.21<sup>a</sup> (L199) y otra de magnitud 12.81<sup>a</sup> (L169); una tercera estrella no variable de magnitud 12.83<sup>a</sup> V, L353, ha sido empleada como *test* para verificar la dispersión y el error cometido al medir las estrellas sometidas a estudio.

Todas las medidas del año 2001 se han efectuado sin filtro alguno, aunque el sistema fotométrico es próximo al V debido a la respuesta espectral de las cámaras empleadas; sin embargo las mediciones de la campaña de 2002 sí han sido efectuadas con el filtro V Johnson (de color verde); los

tiempos de integración han sido de 15 s (para el SC-305 mm) y 30 segundos (SC-203 mm) respectivamente, para no saturar las estrellas, ofreciendo una escala cercana a 1.3”/píxel en la peor de nuestras cámaras (Observatorio de Cáceres).

Para los más puristas podemos indicar que la desviación media estándar en las medidas CCD de las estrellas no variables (L199, L169 y L353) ha sido de 0.005-0.014 magnitudes, mejorando la precisión con respecto a la anterior campaña. Pensamos que este valor podrá ser reducido, todavía algo más, en la campaña del año 2003.

La Tabla 1 ofrece los datos básicos de esta estrella: las columnas 1 y 2 indican su posición (2000.0), la 3 su magnitud con filtro V, la 4 el índice de color  $B-V$  ambos según Osborn (2000), la 5 su magnitud absoluta  $M_v$  (Shetrone, 1994) y la 6 su temperatura efectiva (Kraft *et al.*, 1992):

**Tabla 1. Estrella L414 en M13 (Cl 1639-365)**

Asc. Recta	Declinación	V	B-V	$M_v$	T efec.
16h 41m 38s	+36° 26' 38"	12.15	1.45	-1.94	4100 K

Como podemos ver aunque está a 25.102 año luz la capturamos con magnitud 12.15<sup>a</sup>: la magnitud absoluta nos dice que tiene un brillo intrínseco muy alto (situada a 10 pc casi alcanzaría la magnitud -2<sup>a</sup>), mientras que su temperatura superficial es baja, próxima a 4.100° K (astro de color amarillento); su masa es 0.86 la solar (Lupton, 1987).

Hemos analizado **351 imágenes CCD** tomando sólo las mejores (astros poco afectados por la turbulencia o errores de seguimiento) de cada jornada de trabajo: téngase en cuenta que medimos ¡30 estrellas! por imagen y observatorio, a una media de 4-5 imágenes por noche como mínimo (a veces de 10 a 12 imágenes por noche y observatorio). Una vez obtenidas las magnitudes éstas se pasan a una tabla de datos (que tabula el Día

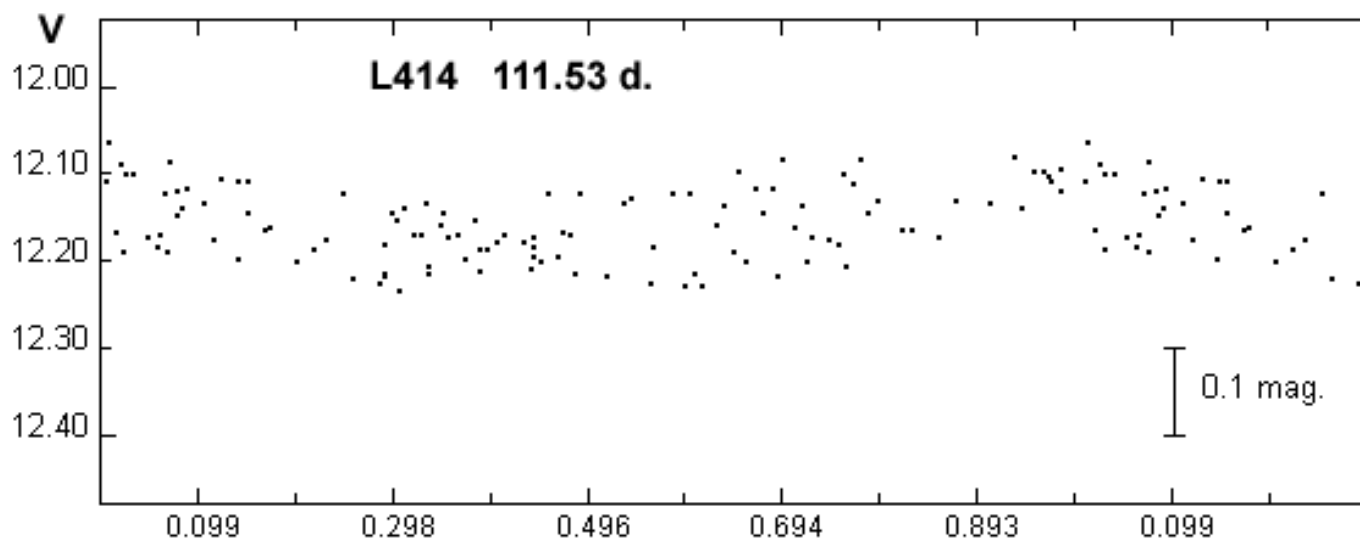


Figura 3: Curva de luz de L414 utilizando un período de 111.53 días; la amplitud de su oscilación no llega a 0.2 magnitudes.

Juliano, fracción de día y magnitud) para ser analizada con el programa A.V.E. (*Análisis de Variabilidad Estelar*), el cual pone de manifiesto los posibles períodos de oscilación en forma de “periodograma” (Figura 2); en el caso de L414 encontramos un período **111.53 días** (el que estimamos más correcto) así como otros de menor probabilidad, producidos por la desigual distribución de observaciones a lo largo de estos dos años (incluyendo el período de no visibilidad debido a su proximidad al sol). Empleando el período más probable obtenemos su curva de brillo (figura 3): ésta es plenamente consistente tanto con las observaciones como con el período apuntado por Osborn (en torno a 105 días). La amplitud medida es de **0.15 magnitudes** incluyendo el error estadístico (0.014 mag.): las oscilaciones de brillo son de **0.06-0.07 magnitudes** sobre o bajo la magnitud media (12.15<sup>a</sup> V).

### PRUEBAS PROFESIONALES DE VARIABILIDAD

Cualquier escéptico podría pensar que el haber obtenido una curva de luz *bonita*, que *parece mostrar* una oscilación de brillo periódica, de ninguna manera es suficiente para asegurar la confirmación de una nueva estrella variable gigante roja, sobre todo cuando somos dos simples aficionados -equipados con pequeños telescopios- quienes lo anunciamos. Por esto hemos descargado de Internet abundante material astrofísico sobre M13 y sus gigantes rojas, centrándonos especialmente en los estudios realizados por astrofísicos profesionales los cuales corroboran (de modo indirecto pero indiscutible) nuestros resultados. Algunos de ellos, sólo unos pocos para no cansar demasiado al lector, son los siguientes:

Osborn y Fuenmayor (1977) encuentran leves

oscilaciones de brillo en L414 y apuntan un posible período de 105 días; en su artículo lanzan una atrevida hipótesis: “*Lo más probable es que todas las gigantes rojas de M13, cuyo índice de color B-V es igual o superior a 1.45, sean variables*”. El índice de color B-V de L414 medido por ellos es 1.47 y, por tanto, debe ser variable...

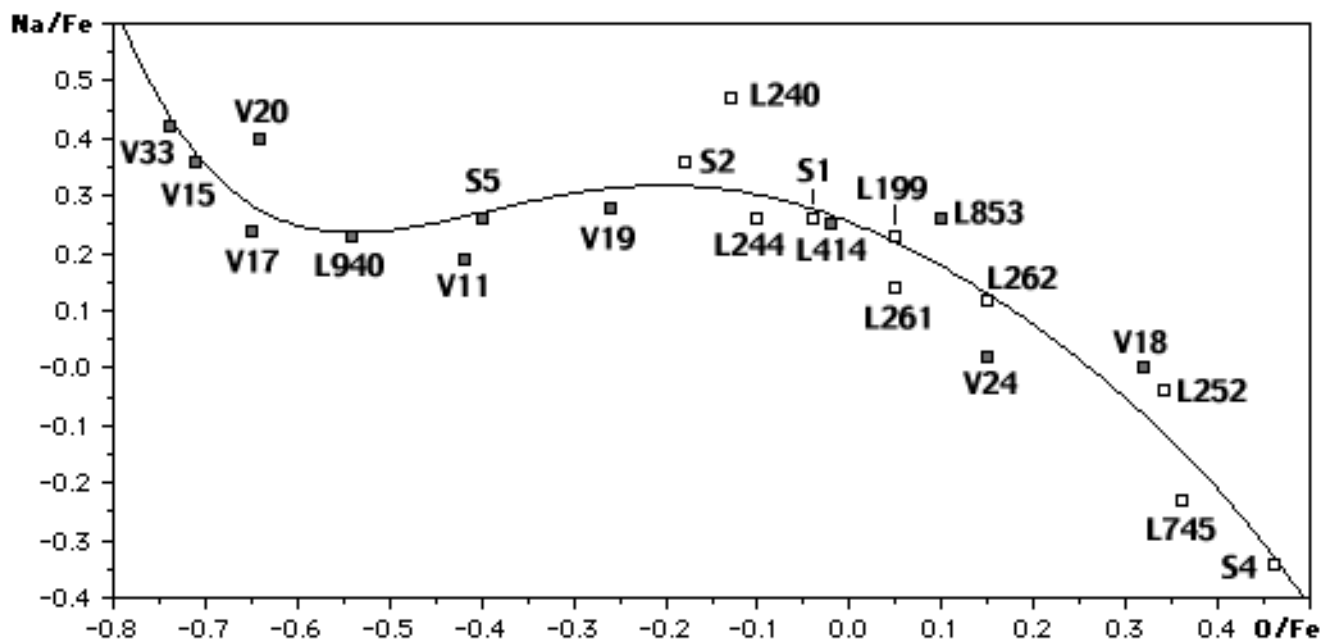
Lupton *et al.* (1987), en un trabajo sobre los movimientos radiales de 154 estrellas en M13, aprecian fuertes oscilaciones en la velocidad de L414 exactamente igual que las variables ya conocidas; según apuntan esto sólo puede ser debido a dos razones:

- a) que la estrella pertenezca a un sistema binario
- b) que existan movimientos de las capas gaseosas de la estrella (oscilaciones radiales).

El primer punto indicaría la existencia de sistemas estelares binarios en M13, mientras que el segundo quedaría explicado por la variabilidad de las estrellas y su cambio periódico de tamaño (radio) y luminosidad. En L414 miden fuertes oscilaciones de su velocidad radial con el tiempo (de 3.79 a 9.63 km/s) en el período mayo 1977-junio 1980, lo cual sólo puede explicarse si es binaria o variable. Este mismo fenómeno miden en otras cinco estrellas más, todas ellas conocidas variables situadas en la cima de la Rama Asintótica; la explicación es que L414 también presenta oscilaciones en su tamaño y debe ser, por tanto, variable y no binaria: tantas binarias de características similares es improbable.

Brown *et al.* (1991) miden una proporción N/Fe muy alta en L414 (1.31), similar al de las variables V20 (1.62) y V33 (1.61) que también analizan; la cuarta estrella estudiada (L199) presenta un valor muy dispar (1.09). L414 es muy similar a las dos variables estudiadas.

Kraft *et al.* (1992) miden la abundancia de oxígeno y sodio en 13 estrellas gigantes rojas de



Anticorrelación en la abundancia de Na con respecto al O en gigantes rojas de M13; podemos ver que L414 sigue la misma pauta que las demás variables: cuanto más ricas en sodio son, más pobres en oxígeno aparecen; nótese la posición de la también nueva variable L940, junto a las demás variables más pobres en O. (F. A. Violat, tomado de Kraft *et al.*, 1993).

M13: su estudio muestra que L414 es muy pobre en oxígeno, exactamente del mismo modo que las demás gigantes rojas de conocida variabilidad; además de esto su metalicidad media es exactamente igual que el de las tres variables estudiadas en el trabajo (V20, V33 y V18) siendo -1.51 dex. La reducida abundancia de oxígeno en estas estrellas sólo se puede explicar bien por dos hipótesis muy distintas:

- la transferencia de masas en un sistema binario
- la variabilidad real de las estrellas.

Estos astrofísicos rechazan la primer hipótesis por ser altamente improbable (¿demasiadas binarias en M13 de nuevo!), confirmando que la alta escasez de oxígeno en estas estrellas se debe a que son variables gigantes rojas; L414 debe ser una estrella variable.

Shetrone (1994) determina la velocidad radial de 21 estrellas gigantes rojas de M13, entre ellas L414, y sólo encuentra oscilaciones en las bien conocidas estrellas variables; las únicas excepciones son L414, II-76 y III-59, astros que también presentan fuertes oscilaciones en su velocidad radial (-5, -2 y 2 km/s respectivamente) pero que no son variables conocidas. L414 debería ser, entonces, una estrella variable. (Nuestras mediciones fotométricas demuestran que **las tres** son en realidad variables: L414 era ya sospechosa y las otras dos son nuevas variables descubiertas por nosotros, de las cuales presentaremos un completo estudio en un futuro artículo.)

Lyons *et al.* (1996) miden los movimientos de masas en las atmósferas en 9 gigantes rojas de M55 y 10 de M13, determinando el perfil de las líneas espectrales Na D e H $\alpha$ : encuentran una no-

toria asimetría en la forma de la línea del H $\alpha$  en todas las estrellas de M13, así como desplazamientos en el centro (*core*) de las líneas espectrales del Na; la pruebas indican movimientos en su atmósferas y, por tanto, variabilidad: L414 es idéntica a cualquiera de estas variable.

Smith *et al.* (1996) determinan la abundancia de carbono, nitrógeno y oxígeno en 11 gigantes rojas de M13: su estudio demuestra que L414 es la estrella que menor cantidad de carbono contiene de las medidas, mucho menor que las demás variables bien conocidas. Su abundancia N/Fe (1.18) es similar a la de las variables V33 (1.22), V20 (1.39), la sospechosa de variabilidad L240 (1.23) y la estrella III-59 (1.11), precisamente una de las nuevas variables descubiertas por nosotros. Por tanto L414 vuelve a ser idéntica a las variables estudiadas en todos sus aspectos.

Cualquiera que lea estos trabajos, sobre todo los más recientes, puede comprobar que los resultados no están completos: se necesitarían nuevas mediciones, actuales, para poder elaborar modelos o confirmar variabilidades. No obstante en el esquema superior (elaborado a partir del trabajo de Kraft *et al.*, 1993) podemos apreciar la anticorrelación existente entre la abundancia de Na y O en las gigantes rojas de M13, incluyendo L414 y otras tres nuevas variables descubiertas por nosotros (L853, S5 y L940): las dos últimas aparecen en el grupo de variables más pobres en oxígeno (V33, V15, V20, V17, V11 y V19).

En la Tabla II se ofrecen, ordenadas por su magnitud absoluta **M<sub>v</sub>** (el brillo aparente de un astro situado a la distancia normalizada de 10 pc, 32.6 años luz), los datos de las variables de M13

mejor estudiadas comparándolos con los de L414; la columna 1 muestra el nombre, la 2 y 3 la magnitud V e índices B-V (Osborn, 2000) y la 4 la magnitud absoluta (Lyons *et al.*, 1996):

**Tabla II. Datos de las variables de M13.**

Nombre	V	B-V	Mv
V24	12.04	1.61	-2.08
V20	12.03	1.58	-2.05
V19	12.10	1.50	-2.05
V17	11.98	1.53	-2.04
V15	12.18	1.45	-2.00
V33	12.09	1.55	-1.99
<b>L414</b>	<b>12.15</b>	<b>1.45</b>	<b>-1.94</b>
V18	12.33	1.31	-1.76

Es fácil apreciar que L414 encaja perfectamente entre ellas: de hecho tiene un índice de color similar al de V15, mientras que por su magnitud absoluta e índice de color B-V ha de estar situada inmediatamente debajo de V33 y encima de V18, todas ellas variables bien conocidas...

## CONCLUSIÓN

Todas las pruebas profesionales demuestran, siempre de modo indirecto pero contundente, que L414 no sólo es una estrella similar o idéntica a las demás variables gigantes rojas en composición química, luminosidad, temperatura, velocidad radial, líneas espectrales o magnitud absoluta, sino que **L414 presenta exactamente las mismas propiedades físicas que las estrellas variables gigantes rojas bien conocidas**. “Si tiene cuernos de vaca, pezuñas de vaca, ubres de vaca, aspecto de vaca y muge como una vaca sólo puede ser una vaca”. Y a todo esto hemos de añadir nuestra curva de luz, el “mugido” final que permite identificarla como tal...

Los trabajos de diferentes grupos profesionales, unidos a nuestra curva de luz, demuestran de modo inequívoco que L414 es, en efecto, una estrella variable de largo período que pertenece al tipo “gigante roja” y se encuentra en la Rama de las Gigantes Rojas. El período apuntado por Osborn en 1977 (105 días) es apenas 6 días más corto que el que nosotros hemos determinado en este trabajo: es posible que esta estrella sea una variable semirregular como V11, la cual presenta irregularidades en la duración de su ciclo. Necesitamos una tercera campaña de estudio, a lo largo de 4-5 meses en el año 2003, para definir mejor su período de oscilación, rango y ofrecer una curva de luz más completa en el tiempo: con estas observaciones podemos clasificarla como perteneciente al tipo **SRd**.

¿Por qué nuestro éxito donde los profesionales han fracasado?; la explicación es sencilla: Osborn no encuentra variabilidad en L414 en 1974 debido a que, como él mismo comenta, ha empleado 56

placas fotográficas tomadas a lo largo de 3 años... la media no llega a 19 placas por año. Welty no puede encontrar variabilidad en su trabajo de 1985 porque, como indica, ha utilizado **63 fotografías**, que corresponden a **36 noches distintas** repartidas en un período de 6 años... la media es de poco más de 10 fotografías -y 6 noches- por año, aunque hay una campaña en la que sólo ha dispuesto de **3 mediciones en todo el año** y otras dos campañas ¡con **una única medición** en cada una! Se comprende fácilmente que con una, dos o tres mediciones de brillo al año sea **imposible** ver la evolución de una estrella variable de largo período... Nosotros hemos seguido el cúmulo durante **521 días** (DJ 2.452.076 al DJ 2.452.596, ambos inclusive), obteniendo más de un centenar de mediciones de brillo (¡sin contar las abundantes imágenes destinadas a “fotometría rápida” de cefeidas y RR Lyrae, no medidas hasta la fecha al ser un trabajo ingente!) a lo largo de **129 noches (2001) y 189 noches (2002)**: nuestro estudio es más *rico* en observaciones de brillo a lo largo del tiempo, así que podemos cubrir -como mínimo- un ciclo completo de cualquier variable lenta, y varios ciclos de las variables rápidas (de 35 a 65 días). Como el mismo Osborn nos indicó en comunicación privada, disponemos de registros fotométricos mucho más completos y densos que los de los propios profesionales: “*Welty observó todas las estrellas y no descubrió variabilidad en ningún caso. Sin embargo, las observaciones suyas tienen mejor cobertura (coverage)*”.

Un análisis estadístico de las mediciones muestra que la amplitud de brillo en el rango ( $x-3\sigma$ ,  $x+3\sigma$ ), siendo  $x$  la magnitud V media y  $\sigma$  la desviación estandar, es **0.14 $\pm$ 0.014 magnitudes**; su semi-amplitud es **0.06-0.07 magnitudes**. El recorrido o **rango** es de 12.08<sup>a</sup> a 12.22<sup>a</sup> magnitud V en sus límites ( $3\sigma$ , tenemos en cuenta el 99.74% de las mediciones), de modo que al excluir las medidas muy afectadas por el error estadístico ( $>3\sigma$ ) **su amplitud real es 0.13-0.14 magnitudes**: no es de extrañar que Welty fuese incapaz de detectar cambios de brillo tan reducidos. Estos datos nos quedan entonces del siguiente modo:

Amplitud	Período	mag. V
0.14 mag.	111.53 d	12.08-12.22

Siguiendo con el análisis comprobamos, en 12 mediciones distintas, que el **error** al determinar la magnitud de una estrella no variable oscila entre 0.001 magnitudes como mínimo y 0.027 como máximo (en las *peores* imágenes), siendo el **error medio de 0.014 magnitudes**.

Al analizar el conjunto completo de mediciones (y hallar la *media estadística*) encontramos que su magnitud V es **12.166<sup>a</sup>**, valor que sólo difiere en **0.016 magnitudes** de su brillo oficial (12.15<sup>a</sup> V): la diferencia coincide con el error

medio antes citado. Si determinamos la mediana **Me** vemos que este valor es **12.153**: la diferencia con la magnitud oficial es de 0.003 magnitudes. Podemos resumir estos datos de este modo:

Magnitud V media oficial:	12.15 <sup>a</sup>
Magnitud V media (nuestra):	12.166 <sup>a</sup>
Diferencia:	0.016 mag.
Nuestra mediana Me:	12.153 <sup>a</sup>
Diferencia con mag. oficial:	0.003 mag.
Error medio en las mediciones:	0.014 mag.
Magnitud V ( $x-3\sigma$ )	12.075
Magnitud V ( $x+3\sigma$ )	12.225

vemos entonces que **el error es 10 veces inferior** a la oscilación real (o rango) que medimos.

En un futuro artículo, una vez procesadas adecuadamente las numerosas imágenes digitales de las dos campañas, presentaremos nuevas estrellas variables descubiertas o confirmadas por nosotros así como curvas de luz, rangos de oscilación, períodos y trabajos de equipos profesionales que corroboran (de modo indirecto) estos descubrimientos. No obstante el lector dispone ya de varios artículos nuestros en la siguiente dirección de Internet (Web Casanchi, de Carlos S. Chinae):

<http://personales.ya.com/casanchi/astronomia.htm>

Un resumen de este trabajo se remite al Konkoly Observatory (Hungria), sede central del "Information Bulletin on Variable Stars" (disponible en [www.konkoly.hu/IBVS/issues.html](http://www.konkoly.hu/IBVS/issues.html)), para conocimiento de los profesionales y aficionados más interesados en este campo de trabajo.

Antes de acabar, como simple entretenimiento, podemos intentar ver si existe alguna relación clara entre la **magnitud absoluta y el período de oscilación**, lo cual presentamos en la Tabla III.

La magnitud absoluta **M<sub>v</sub>** nos da una idea de cuánto brilla realmente cada estrella: para ello hemos de situarlas con la imaginación a la misma distancia (32.6 años luz de la Tierra o 10 parsecs). Nuestro sencillo razonamiento es el siguiente:

cuanto más brillante es la estrella más grande debe ser el radio de la misma (mayor superficie emisora), de donde el período de oscilación debe ser también más dilatado, ya que podemos suponer que la estrella es un cuerpo gaseoso que oscila periódicamente. Veamos si existe alguna relación:

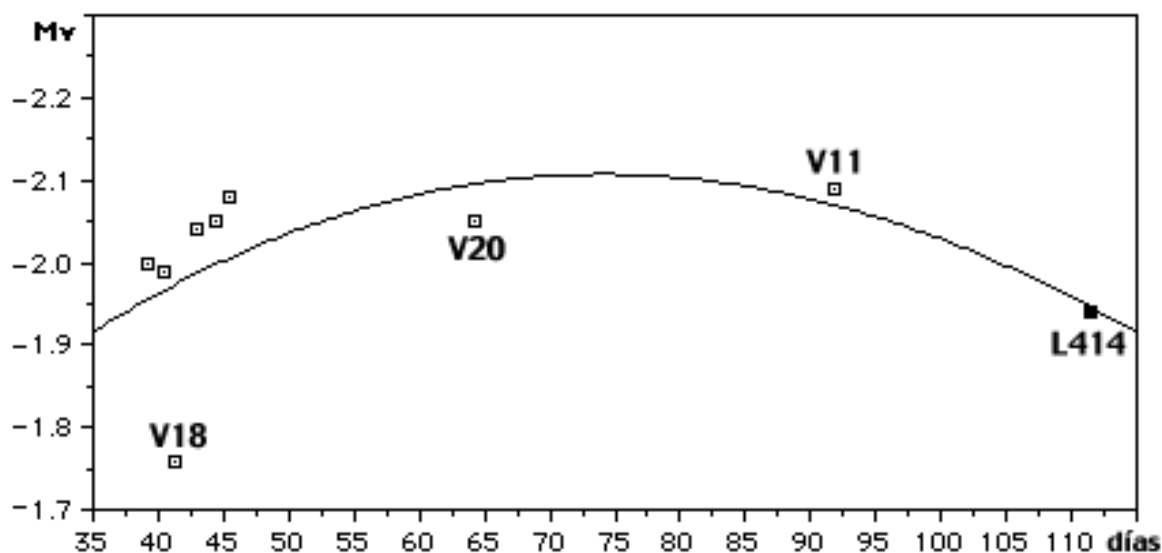
**Tabla III. Períodos de oscilación.**

Nombre	M <sub>v</sub>	Período
V11	-2.09	91.77
V24	-2.08	45.34
V20	-2.05	64.26
V19	-2.05	44.48
V17	-2.04	43.04
V15	-2.00	39.23
V33	-1.99	(40.37)
<b>L414</b>	<b>-1.94</b>	<b>111.53</b>
V18	-1.76	41.25

Parece que los períodos de variación (ver gráfica en la parte inferior de la página) **no dependen de la magnitud absoluta**, sino de otros parámetros desconocidos: quizá la temperatura o densidad del núcleo estelar, la abundancia de helio o elementos más complejos (C, N, O...), la mezcla de los mismos, la velocidad de rotación, etc...

Sin embargo cuando hacemos un ajuste polinómico (al pie de esta página) vemos que **L414 aparece situada en una posición anómala** ya que, según el ajuste, en función de su magnitud absoluta M<sub>v</sub> debería tener un período cercano a los 40 días: V18 aparece también como variable anómala, ya que tiene un brillo intrínseco bajo pero un período similar al de otras variables (39-45 días).

Podemos intentar hacer lo mismo, pero esta vez teniendo en cuenta la *velocidad radial* de la estrella o el *desplazamiento de las líneas espectrales*. Para ello hemos recurrido al trabajo de Shetrone, aparecido en 1994 (PASP 106, 161S), el cual utiliza la conocida línea D del sodio para medir la velocidad de 23 estrellas distintas: entre ellas podemos encontrar a L414, a S4 y S5, la primera de ellas variable sospechosa y las otras dos



estrellas elegidas por nosotros para buscar en ellas algún rasgo de variabilidad (el cual, por cierto, creemos haber encontrado).

Según comenta el propio Shetrone, **las estrellas que ofrecen velocidades mayores o iguales que 4 km/s son realmente variables**: entre ellas aparecen las bien conocidas V24 (-5 km/s), V17 (-7), V20 (-5, -4 y -5), V19 (-9) o V33 (-5). Sin embargo hay variables que muestran velocidades menores incluso siendo variables reconocidas: es el caso de V11 (-1 km/s), V18 (-2 y -1) o V15, la cual ofrecía en una única medición una velocidad nula (0 km/s).

En la Tabla IV, tomada del citado trabajo, aparecen tabulados estos datos; hay estrellas que tienen más de un valor, los cuales ponemos en la misma columna para no alargar mucho la lista:

**Tabla IV. Velocidad de la línea Na D.**

Nombre	$\Delta V$ (km/s)	Fecha	km/s
V24	-5		
V17	-7		
V20	-4, -5, -5		
V19	-9		
V11	-1		
V33	-8, -5, -3		
V15	0		
<b>L414</b>	<b>-2, -5, 0</b>		
L199	-1, 2	1971, mayo 02.34	7.00
L240	1, 2	1971, junio 01.34	6.93
V18	-2, -1	1972, mayo 24.34	6.12
S4	-2	1974, mayo 29.47	5.23
S5	2	1979, junio 06.31	5.43
L629	-1	1979, junio 08.46	3.79
		1980, junio 26.20	7.86
		1980, junio 27.17	9.63

Cuando todos estos valores los pasamos a un gráfico, que presenta en el eje X el nombre de cada estrella y en el eje Y el **valor medio** de la velocidad, notamos enseguida que aparecen *dos grupos distintos* separados por una estrella variable con velocidad nula, V15:

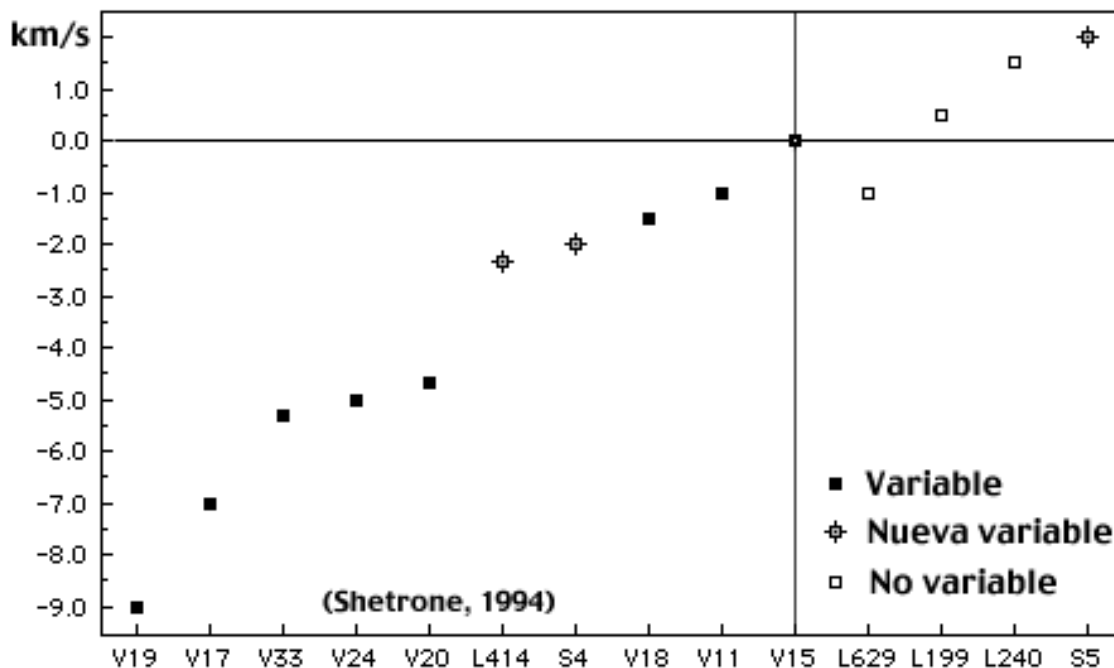
1) las **estrella variables** con velocidades negativas, de -9 km/s (V19) a -1 km/s (V11)

2) las **estrellas no variables** de valores nulos o positivos, de -1 km/s (L629) a 2 km/s (S5).

En el primer grupo (las estrellas variables de reconocida *variabilidad*) aparecen dos astros ya mencionadas en este estudio: uno de ellos es S4 (II-76) y el otro L414, ambas **nuevas variables** descubiertas por nosotros. ¿Casualidad otra vez? Los errores estadísticos en la determinación de estas velocidades son muy reducidos, como indican los autores del estudio.

Elijamos otro trabajo que mida también las velocidades radiales de estrellas gigantes de M13, dato éste (a nuestro juicio) muy relacionado con el movimiento de las atmósferas estelares y, por tanto, con la variabilidad del astro; tomemos los datos de L414 del estudio de Lupton *et al.* (1987) y veamos qué encontramos:

Como el lector puede apreciar en cualquiera de los instantes estudiados se han encontrado valores distintos: un análisis muy superficial, ya que nos faltan mediciones intermedias a intervalos de tiempo menores, pone de manifiesto que en el plazo de un mes (mayo a junio de 1971) hay un descenso en la velocidad radial, en el plazo de 2 días (junio de 1979) hay otro leve descenso en la velocidad mientras que, en el plazo de dos días,





(junio de 1980) hay un incremento apreciable en la velocidad.

Los datos aquí mostrados, al ser tan escasos y aparecer tan mal espaciados en el tiempo, son del todo insuficientes para demostrar nada o especular sobre su posible período (comparándolo, de paso, con el que hemos determinado nosotros), pero al menos indican que existe una *variación periódica* en la velocidad radial de L414; ya puestos, comparemos los rangos medidos en las distintas estrella y variables estudiadas por ellos, utilizando el **m/s** como unidad de medida:

**Tabla V. Velocidades radiales.**

Nombre	Rango	Amplitud
V20	4.85 a 9.96	5.11
V18	0.23 a 5.92	5.69
S4	7.81 a 9.33	1.52
V19	4.20 a 8.88	4.68
L240	9.14 a 11.73	2.59
S5	6.18 a 7.07	0.89
V11	0.89 a 3.41	2.23
<b>L414</b>	3.79 a 9.63	<b>5.84</b>
V24	8.30 a 13.82	5.52
L629	11.02 a 14.63	3.61
V15	-10.87 a -15.33	4.46
L853	-1.78 a -3.19	1.41
L940	-0.23 a -2.67	2.44
V33	-3.98 a -8.59	4.61
V17	-1.08 a -6.62	5.54

Hemos marcado con letra negrilla el astro que presenta el valor más alto en el rango de oscilación de velocidades: quizá parezca casual pero es otra vez L414 quien aparece destacada...

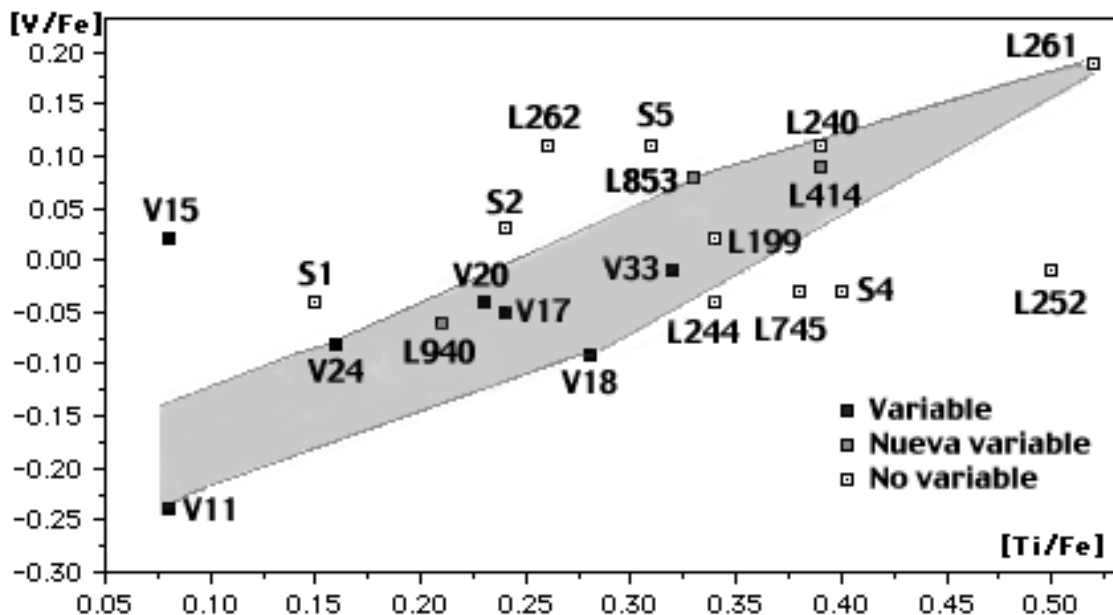
Si ahora nos tomamos la molestia de ordenar esta lista en función de los rangos de oscilación, de mayor a menor, veremos que la misma -y ya no nos sorprende lo más mínimo- nos queda del siguiente modo:

**Tabla VI. Velocidades radiales (II).**

Nombre	Rango	Amplitud	B-V
<b>L414</b>	3.79 a 9.63	<b>5.84</b>	<b>1.45</b>
V18	0.23 a 5.92	5.69	1.31
V17	-1.08 a -6.62	5.54	1.53
V24	8.30 a 13.82	5.52	1.61
V20	4.85 a 9.96	5.11	1.58
V19	4.20 a 8.88	4.68	1.50
V33	-3.98 a -8.59	4.61	1.55
V15	-10.87 a -15.33	4.46	1.45
L629	11.02 a 14.63	3.61	1.60
L240	9.14 a 11.73	2.59	1.36
L940	-0.23 a -2.67	2.44	1.48
V11	0.89 a 3.41	2.23	1.59
S4	7.81 a 9.33	1.52	1.27
L853	-1.78 a -3.19	1.41	1.39
S5	6.18 a 7.07	0.89	1.23

Encabezando la relación tenemos a L414, astro que aparece como una estrella variable más... Si tomamos 4 km/s como el límite mínimo a partir del cual una estrella es variable, V11 nos queda fuera del grupo al igual que L940, L853, S4 y S5 todas ellas **nuevas variables** según nuestras mediciones. Si bajamos el listón hasta los 2 km/s, con la idea de incluir a V11 entre las variables, vemos entonces que deben serlo también L629, L240 y L940: nosotros sólo hemos estudiado la última, encontrando oscilaciones de brillo que la caracterizan como nueva variable. Hemos insertado una última columna, el índice de color B-V: notamos enseguida que **todas las estrellas cuyo índice B-V es igual o superior a 1.35 son variables sin duda alguna...** (ver esquema en pág. 2).

Hemos elaborado un diagrama, a partir del trabajo de Kraft *et al.* (1993), en el que comparamos la abundancia de vanadio (V) con la de titanio (Ti) en gigantes rojas. Podemos apreciar de inmediato que, si unimos las variables **V11**, **V24** y **V18** con las sospechosas de variabilidad **L853** y **L261** obtenemos una curiosa *banda de variabili-*



*dad*: dentro de ella nos encontramos de modo natural a **V20**, **V17**, **V33**, **L414** y **L940** (ambas de variabilidad recién confirmada por nosotros), así como las sospechosas **L199** y **L240**. Fuera de la banda nos quedan **V15** y nuestras presuntas variables **S4** y **S5**; es muy posible que este esquema (obra nuestra) tenga una base científica, pero que todavía sea preciso *repulirlo un poco* para incluir otras variables que aún no hemos confirmado con nuestras mediciones (como L261). Esto nos impone una nueva obligación: medir las magnitudes de L629 y L240 en nuestras imágenes para dilucidar si, conforme a las dos últimas hipótesis (amplitud de variación en su velocidad radial y presencia en la *banda de variabilidad*) son también variables ...

## RESUMEN

Las diferentes pruebas que hemos presentado y analizado, obtenidas por distintos equipos de astrofísicos, así como nuestras **351 mediciones fotométricas tomadas en 521 noches**, indican de modo claro que **L414 es una estrella variable de tipo gigante roja**, con un período de **111.5 días**, no diferenciándose en nada de las demás variables de M13 de este mismo tipo. Nuestras mediciones apuntan también al descubrimiento de nuevas variables rojas de largo período, pero de ellas hablaremos más extensamente en un futuro artículo.

Esperamos que nuevas y más precisas mediciones, que realizaremos en la campaña del año 2003, refinen los parámetros que aquí hemos presentado y confirmen los mismos con una nueva (y más precisa) curva de luz.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento al Dr. Wayne Osborn (Central Michigan University) por su asistencia y ayuda; al Dr. Jason Rowe (Universidad de Ontario) por sus indicaciones y consejos, así como a Josep M. Gómez (Grupo de Estudios Astronómicos), por sus valiosos comentarios, consejos y ayuda prestada. Hemos contado también con las ideas, apoyo, interés y ánimos de Donn Starkey (AAVSO), Roger Pickard (director de la 'Variable Star Section' de la British Astronomical Association), Mr. Emile Schweitzer (de la AFOEV), la Dra. Vittoria Caloi (Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, IASF), Marco Castellani (Rome Astronomical Observatory), la Dra. Christine Clement (Universidad de Toronto), Andras Holl (Konkoly Observatory) o Richard Hill (Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona) entre otros muchos.

## REFERENCIAS

- Arp, H. C. (1955). AJ **60**, 1.  
 Barnard, E. E. (1900). ApJ **12**, 176B.  
 Barnard, E. E. (1909). ApJ **29**, 72B.  
 Barnard, E. E. (1914). ApJ **40**, 173B.  
 Cudworth, K. M. y Monet, D. G. (1979). AJ **84**, 774C.  
 Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, G. E. y Shetrone, M. D. (1993). AJ **106**, 1490.  
 Ludendorff, H. (1905). Publ. Postd. Obs., 15, No **50**.  
 Lupton, R. H., Gunn J. E. y Griffin, R. F. (1987). AJ **93**, 1114L.  
 Popper, D. M. (1947). ApJ **105**, 204.  
 Osborn W. (1973). AJ **186**, 7250.  
 Osborn W. y Fuenmayor, F. (1977). AJ **82**, 3950.  
 Osborn W. (2000). AJ **119**, 2902.  
 Russev, R. (1974). Astr. Zh. **51**, 122.  
 Shetrone, M. D. (1994). PASP **106**, 161.  
 Welty, D. E. (1985). AJ **90**, 2555.

## BIBLIOGRAFÍA

- 3rd. Catalogue of Variable Stars in Globular Clusters. Helen Sawyer-Hogg. Publicaciones del David Dunlap Observatory, Vol. 3, N° 6 (1973).  
 A search for giant and asymptotic-giant-branch variable stars in six globular clusters. Daniel E. Welty (AJ **90** 1555, 1985).  
 On the nature of the variables in M13. C. D. Pike y Caroline J. Meston (MNRAS, **180**, 1977).  
 Spectral types of stars in the globular clusters Messier 3 and Messier 13, Daniel M. Popper (ApJ **105**, 204P, 1947).  
 Photometry of nearby globular clusters: M3, M5, M13 and M92. Jennifer A. Johnson y Michael Bolte (AJ **115**, 693-707, 1998).  
 Variable Stars in M13, Wayne Osborn (AJ **119**, 2902-2902, 2000).  
 Astrometry in the globular cluster M13. I. New proper motions and membership probabilities, Cudworth, K. M. y Monet, D. G. (AJ **84**, 774C, 1979).  
 Red variable star L973 (V17) in M13. Tatiana Russeva y Ruscho Russev (Information Bulletin on Variable Stars n° **1534**, 1979 January).  
 Semi-regular variable star V11 in M13. Tatiana Russeva y Ruscho Russev (IBVS n° **1624**, 1979 June).  
 Three new red variable stars in M13 (L72, L194 y L70). Tatiana Russeva y Ruscho Russev (IBVS n° **1769**, 1980 April).  
 Two new variable stars in M13 (L66 y L598). Tatiana Russeva, Lubomir Iliev y Ruscho Russev (IBVS n° **2223**, 1982 November).  
 Catalog of parameters for Milky Way globular clusters. William E. Harris (AJ **112**, 1487, 1999).