

## VARIABLES EN M13

# ESTUDIO DE L938

Francisco A. Violat Bordonau  
Teófilo Arranz Heras

fviolat@yahoo.es

Presentamos un sencillo estudio de L938, una estrella del cúmulo M13 aparentemente sin ninguna particularidad pero que, a partir de un análisis de sus velocidades radiales, parece ser variable. Mediciones fotométricas de uno de los autores a lo largo de dos campañas fotométricas (2005 y 2006) ponen de manifiesto que, dentro de la precisión de los equipos, no es variable pese a que dibujan una curva de luz que se ajusta a un período igual a 8.6 días.

La estrella L938 en el catálogo de Ludendorff (1905), K529 en el catálogo de Kadla (1966), es un astro que pertenece al cúmulo M13 por su velocidad radial (Kadla, 1966, Cudworth y Monet, 1979). En la base de datos SIMBAD aparece como un astro de magnitud 13.84 *B* y 12.68 *V* con un índice de color *B-V* igual a 1.16.

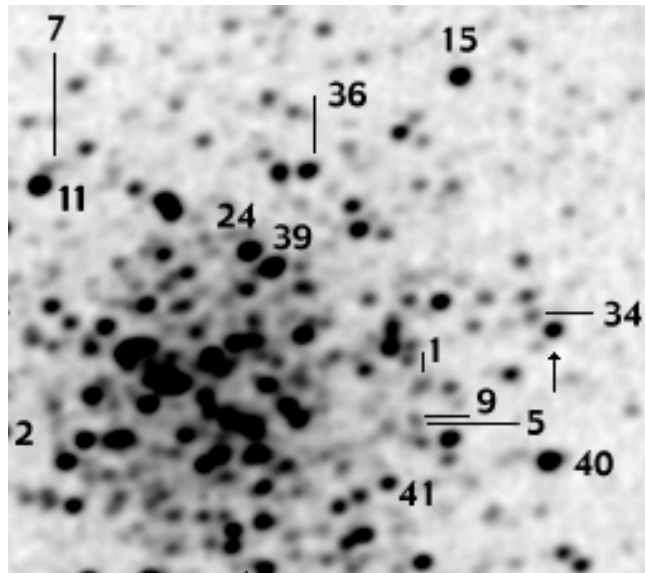
Su magnitud absoluta  $M_v$  se estima en -1.6 con una temperatura efectiva  $T_{\text{eff}}$  igual a 4400 K (Pilachowski et al., 1996); según estos investigadores es muy deficiente en sodio (-0.29 dex, similar al valor de V43 [-0.31]) pero tan rica en magnesio (0.30) o incluso más que las variables de tipo gigante roja más brillantes (V38 y V39: 0.30, V24 y V19: 0.25, V11: 0.20 y V15: 0.10). Al igual que el resto de las estrellas más brillantes de M13 se calcula su masa en 0.85-0.86 del Sol.

Situada en la zona oriental del cúmulo al final de un arco de estremitas de menor brillo (una de ellas la nueva variable de tipo RR Lyrae V34), no aparece en los primeros estudios fotométricos del cúmulo efectuados a inicios del siglo XX: de este modo está ausente en el trabajo de Shapley (1915) o en el de Van Maanen (1925) sobre movimientos propios internos y distancia de M13.

Estudiada fotométricamente por Arp (1955) bajo la denominación IV-53 la encontró con magnitudes 13.70 *B* y 12.54 *V* e índice de color *B-V* = 1.16: en el diagrama H-R podía situarse claramente en el brazo de las Gigantes Rojas aunque no en su cima, donde aparecen los astros más brillantes.

Brown (1955) también la estudió fotométricamente aunque sus datos discrepaban de los de Arp: la magnitud fotográfica  $m_{pg}$  era igual a la 13.89, la fotovisual  $m_{pv}$  la 12.78 con un índice de color  $m_{pg} - m_{pv}$  igual a 1.11.

Kadla (1966) la midió -con la denominación K529- en su estudio fotométrico de M13 encontrándola, por su movimiento propio, como miembro del cúmulo con magnitudes 13.84 *B*, 12.68 *V* e índice de color *B-V* = 1.16.



**Figura 1.** Imagen CCD de M13 que muestra la situación de L938 (marcada con una flecha) al lado de V34, en la parte oriental del cúmulo, así como algunas de las estrellas variables que han sido estudiadas por nosotros.

Cathey (1974) determinó las magnitudes de distintas estrellas del cúmulo pero, sin embargo, la omitió en su trabajo.

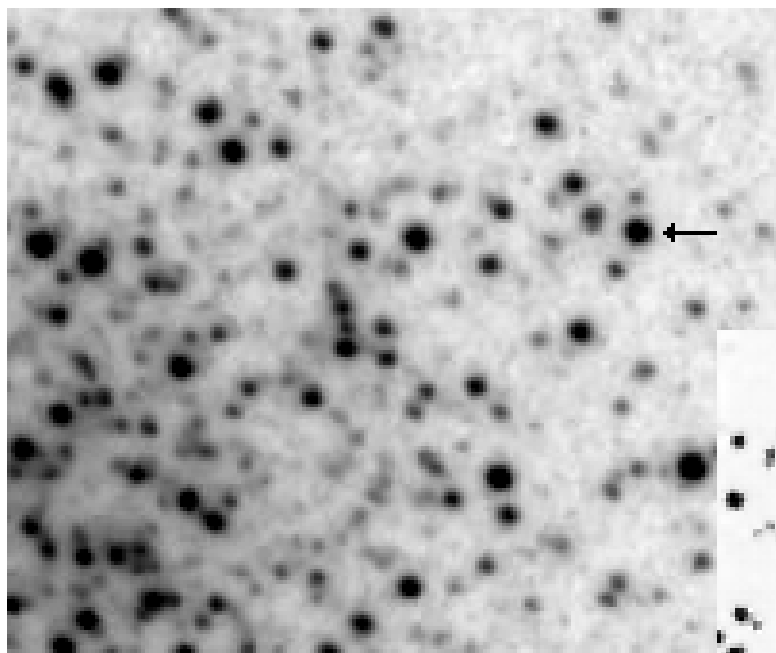
En la fotometría de Cudworth y Monet (1979) aparece con magnitud 13.84 *B*, 12.68 *V* e índice de color *B-V* = 1.16, probablemente al ser una simple copia de los valores obtenidos por Kadla.

Welty (1985) midió el cúmulo en 64 placas fotográficas tomadas con un conjunto film + filtro próximo al sistema *B*: en su trabajo no aparece dicha estrella (aunque obtuvo mediciones de muchos astros sólo disponibles en forma de microfichas, no accesibles a través de Internet) por lo cual no tenemos ningún dato de ella.

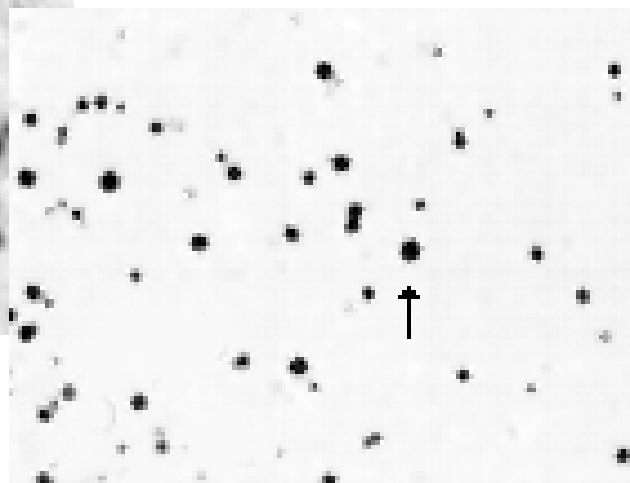
No aparece tampoco en el completo estudio fotométrico de Osborn (2000) de modo que los valores para sus magnitudes en bandas *B* y *V* continúan siendo los citados por Cudworth y Monet que provienen, a su vez, de Kadla (1966).

Comparando los valores de su magnitud *V* ya citados notamos una diferencia de 0.24 magnitudes entre los datos de Arp y Brown, 0.14 magnitudes entre Arp y Kadla y 0.10 magnitudes entre Brown y Kadla; la diferencia en los índices de color *B-V* es igual a 0.05 magnitudes (Brown con Arp o Kadla) pero se reduce a cero en el caso de comparar el de Arp con el de Kadla.

Por su magnitud aparente en banda *V* e índice de color *B-V* parece que es una estrella normal, con una masa próxima a 0.86 masas solares, situada en la rama de las Gigantes Rojas, que no destaca en nada de las demás: en la figura 2 aparece una ampliación de una de nuestras imágenes (Bennasar, 2002), en donde L938 está identificada por una flecha, mientras que en la figura 3 aparece una segunda ampliación de una imagen profesional (Osborn, 1973) en donde podemos compro-



**Figura 2.** Ampliación de una buena imagen de M13 (Toni Bennasar, 2002) mostrando la posición de L938 marcada con una flecha: aparece escoltada por débiles estrellitas.



**Figura 3.** Ampliación de una imagen profesional del cúmulo (Osborn, 1973) en la que hemos marcado también la posición de L938.

bar el campo estelar que la rodea: sus vecinas se encuentran en un radio de 4" a 8" de ella.

Cuando en otros artículos anteriores analizamos las velocidades radiales de diversas estrellas gigantes rojas del cúmulo con intención de obtener sus períodos de estos datos, comprobamos extrañados que los valores de L938 presentaban una dispersión demasiado grande como si estuviésemos ante una estrella variable (la velocidad media de M13 es igual a  $-245.5 \pm 0.3 \text{ km s}^{-1}$ , Soderberg et al., 1999): en este caso las distintas velocidades radiales podrían corresponder a movimientos en sus capas más externas, como si pulsase, lo cual nos indicaría que la estrella es realmente variable y se comporta como otros astros similares. La duda nos movió a medirla durante, al menos, dos campañas fotométricas distintas: de este modo podríamos estar seguros de los resultados obtenidos.

En el trabajo de Lupton et al. (1987) sobre movimientos dinámicos de M13 basado en velocidades radiales, se tabula el valor  $\chi^2$  de las distintas estrellas estudiadas: este operador matemático indica la probabilidad de que el astro estudiado sea variable en función de las distintas mediciones obtenidas y de los grados de libertad existentes (número de mediciones menos una). Pues bien, el valor tabulado para L938 es igual a 32.00: este número en un principio no aporta ninguna información útil, pero si lo comparamos con los distintos resultados obtenidos para las variables estudiadas veremos que le encontramos más sentido.

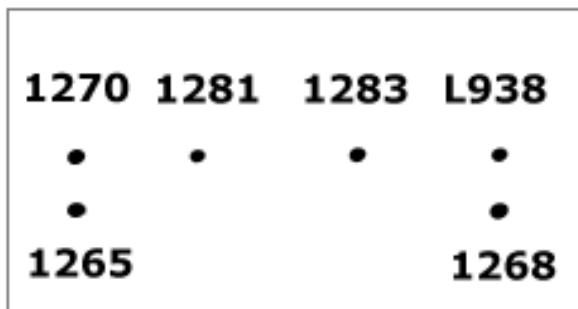
En la Tabla I tabulamos los datos de cada estrella; éstas aparecen ordenadas por su denominación Ludendorff (algo lógico, ya que algunas de ellas no han sido confirmadas como variables hasta el año 2003 por Kopacki et al.), la probabilidad  $\chi^2$  y el número de mediciones disponibles para cada una de los astros estudiados.

Tabla I

Nombre	$\chi^2$	datos
L70 (V20)	19.53	6
L72 (V18)	40.74	6
L96 (V43)	1.74	3
L194 (V19)	58.49	7
L324 (V11)	12.85	5
L414 (V38)	110.52	8
L598 (V24)	88.97	13
L629 (V39)	26.81	12
L782 (V41)	226.0	2
L835 (V15)	37.07	7
<b>L938</b>	<b>32.00</b>	<b>6</b>
L940 (V40)	4.62	3
L954 (V33)	29.59	8
L973 (V17)	85.43	10

Tal como podemos ver existen discrepancias entre los distintos valores obtenidos e incluso aparentes anomalías: de este modo L96 (V43) no debería ser variable ya que el valor  $\chi^2$  es muy reducido; sin embargo al comprobar el número de mediciones disponibles (sólo tres) comprendemos que este resultado negativo, erróneo, se debe sólo al reducido número de mediciones y no a que la estrella no sea realmente variable. Esto mismo puede aplicarse a L940 (V40), variable sospechosa en el artículo publicado por Osborn en junio de 2000 que sería confirmada por nosotros (independientemente de Kopacki et al.) durante el verano de 2000: hay muy pocas mediciones de velocidad y con tan pocos datos no parece variable.

Si examinamos detenidamente los valores  $\chi^2$  de las distintas variables confirmadas, el número



**Figura 4.** Determinación, a ojo, de la magnitud  $V$  de L938 comparando los tamaños de distintos astros de brillo bien medido: la magnitud aparente de la estrella está levemente por debajo de la 12.83  $V$  y difiere, sin duda alguna, de su magnitud estándar (12.68  $V$ ) ya que es más pequeña que la estrella de este brillo situada inmediatamente debajo.

de mediciones de cada una de ellas y los comparamos con los de la estrella L938 (marcada en negrilla) comprobamos que ésta indudablemente debería ser variable: es muy superior al de V11 (12.85 con 5 mediciones), mayor que el de la variable V20 (19.53 con 6 mediciones), superior al de V39 (26.81 con 12 mediciones), comparable al de V33 (29.59 y 8 mediciones) y un poco menor que el de V15 (37.07 con 7 mediciones).

Según estos datos no cabe la menor duda: L938 es una estrella con un valor  $\chi^2$  no muy distinto al de las demás variables por lo que debería serlo también. Lo extraño es que ningún observador haya comentado absolutamente nada sobre oscilaciones fotométricas pese a los estudios realizados: parece como si no fuese variable, algo que contradice completamente los resultados obtenidos a partir de las velocidades radiales.

Ante la duda decidimos incluirla en nuestro trabajo añadiéndola a los astros a medir: bastaba con reservar una casilla en los partes que empleamos, incluirla en el "recorrido ergonómico" (trayectoria óptima que permite medir el brillo de las distintas estrellas minimizando el recorrido a efectuar sobre cada imagen) que efectuamos rutinariamente y anotar, noche a noche, las distintas magnitudes encontradas.

Nada más comenzar a medir las imágenes notamos una notable discrepancia entre su magnitud estándar (12.68  $V$ ) y la obtenida por nosotros: en todos los casos obteníamos un resultado próximo a la magnitud (media) 12.85 que era casi 0.20 magnitudes menor que el valor esperado; incluso en el caso de dar por buena la fotometría de Brown (magnitud 12.78  $V$ ) todavía existía una diferencia igual a 0.07-0.08 magnitudes que no podíamos explicar fácilmente.

Era posible que la presencia de débiles estrellitas compañeras (entre 3 y 4, según el poder resolutorio del instrumento empleado), situadas de ella entre 4" y 8" aproximadamente, afectase al proceso de medición *falseando* el resultado final. Lo que no era posible es que, visualmente, el ojo resultara afectado debido al apiñamiento estelar por

lo que tomando una buena imagen del cúmulo procedimos del siguiente modo: capturamos "recortes" de estrellas de brillo bien medido y elaboramos un dibujo comparativo en el que, observando el tamaño aparente (grosor) de cada astro, podríamos medir a ojo su magnitud. El resultado puede apreciarse en la figura 4. En la parte superior hemos situado cuatro estrellas: tres de ellas de brillos bien medidos tomados de la fotometría de Cudworth y Monet o de Osborn con magnitudes decrecientes, mientras que la cuarta es L938. En la línea inferior, por su parte, hemos colocado dos estrellas cuyos brillos y tamaños aparentes deberían ser similares a la magnitud estándar de la estrella (12.68  $V$ ).

El ojo nota enseguida que el *tamaño aparente* de L938 no es similar al de la estrella de magnitud 12.68 que hemos colocado debajo, pero sí es muy parecido al de las estrellas de magnitud 12.83 y 12.81 aunque, sin duda alguna, este tamaño es menor que el de las estrellas de magnitud 12.65 y 12.68 situadas a ambos extremos de la figura, en la parte inferior, colocadas ahí *ex profeso* para comparar su magnitud tanto con una estrella de brillo similar (magnitud 12.70, situada sobre ella) como L938 con la estrella de magnitud 12.68 que, en teoría, debería tener el mismo tamaño y aspecto visual pero no lo tiene.

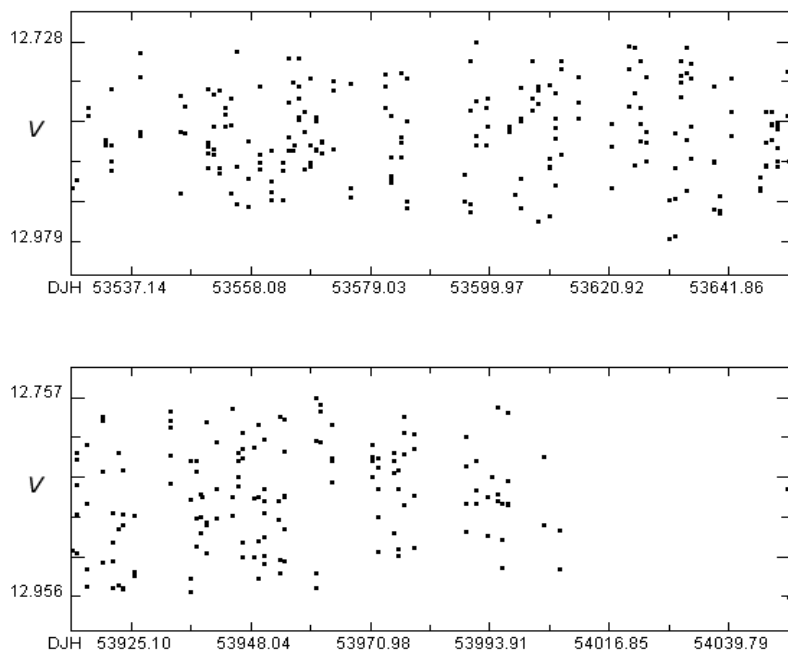
Dado que el tamaño de L938 es muy distinto al de estrellas de magnitud 12.65, 12.68, 12.70 e incluso 12.81 no tenemos la menor duda de que su magnitud estándar es errónea: en la actualidad (años 2001 a 2006) su brillo ronda (a ojo) la magnitud 12.85-12.86  $V$  sin duda alguna.

Una diferencia de 0.20 magnitudes sólo puede explicarse por un cambio de brillo intrínseco en la estrella o por un error bastante notable al determinar este valor: sin embargo es extraño que tanto Arp como Brown y Kadla, tres observadores independientes con equipos muy distintos, hayan cometido semejante error al medirla.

Nuestros datos fotométricos, por su parte, una vez analizados con el programa A.V.E. muestran los resultados que hemos reflejado en la Tabla 2 en la cual la primera columna es la campaña, la segunda el número de mediciones y la tercera la magnitud  $V$  media con el error:

Tabla II		
año	puntos	$V$
2005	218	$12.85 \pm 0.06$
2006	155	$12.86 \pm 0.05$

Podemos comprobar que en la última campaña la magnitud media ha aumentado muy levemente a la par que el error se ha reducido; mientras que en el año 2005 nunca se ha mostrado por encima de la magnitud 12.73 en 2006 no ha rebasado la magnitud 12.76 en ningún momento.



**Figura 5.** Curvas de luz de L938 obtenidas por Violat en las campañas de 2005 (arriba) y 2006 (abajo): podemos notar que la amplitud instrumental ficticia se ha reducido de una campaña a otra; el ojo no aprecia periodicidad alguna en ninguno de los conjuntos de datos.

Con la idea de evitar en todo lo posible errores, especialmente debido a la corta focal empleada por Violat (2000 mm) hemos medido, al azar, cuatro imágenes tomadas por Arranz en la campaña de 2004; dado que su abertura es mayor (355 mm) y su focal más amplia (3550 mm) el poder resolutivo práctico es mayor, llegando a desdoblarse las variables V5 y V9 separadas por apenas 3". Una vez calibradas con la secuencia fotométrica que utilizamos habitualmente obtuvimos los resultados mostrados en la Tabla III, en la que la primera columna tabula la fecha de cada una y la segunda la magnitud V:

Tabla III

Fecha	V
16-09-2004	12.85
19-09-2004	12.88
26-09-2004	12.85
03-10-2004	12.87

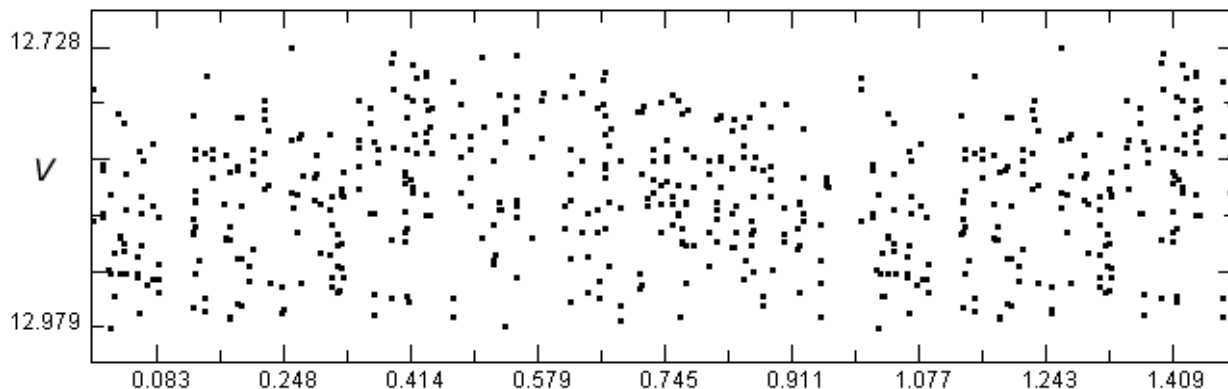
Pese a que el chip era de mayor calidad, la abertura más amplia y la focal más larga los resultados fotométricos son completamente similares a los de Violat: L938 aparecía con magnitud 12.85-

12.88 con una dispersión muy reducida (0.02 a 0.03 magnitudes como media).

Las dos curvas de luz obtenidas en estas campañas (2005 y 2006), que representamos en la figura 5, la han mostrado entre las magnitudes 12.73-12.98 en la primera y 12.76-12.96 en la segunda: la *amplitud instrumental ficticia* (suma de una posible amplitud real con los errores aleatorios al medir) fue igual a 0.25 magnitudes en 2005 pero 0.20 magnitudes en 2006.

La búsqueda del período utilizando diversos algoritmos (Bloomfield, Scargle, etc.) sobre el archivo del año 2005 mostró un período corto muy marcado en el intervalo 8.64-8.68 días, que producía una curva de luz bastante buena (aunque con mucha dispersión) y otros ya menos marcados que no originaban resultados válidos. El análisis del archivo del 2006, por su parte, aunque produjo hasta cinco períodos posibles no permitió obtener ninguna curva de luz válida. La suma de los dos ficheros volvió a producir un período muy

**Figura 6.** Curva de luz de L938 obtenida utilizando las 373 mediciones de las campañas de 2005 y 2006 empleando un período igual a 8.60 días: la amplitud máxima incluyendo el error aleatorio es igual a 0.25 magnitudes.



marcado en el intervalo 8.605-8.612 días que dibujaba una curva de luz (figura 6), aunque ésta no era de gran calidad.

Sin embargo el examen de distintas imágenes de Arranz tomadas en 2004, una vez calibradas adecuadamente, la muestran entre la magnitud 12.84 y la 12.88  $V$  por lo cual, si es variable, su amplitud fotométrica no podría ser nunca superior a 0.05 magnitudes. La conclusión es clara: dentro de la precisión de nuestros equipos no apreciamos variabilidad alguna en la estrella L938.

Si estamos en lo cierto y la estrella no es variable, ¿por qué las velocidades radiales apuntan hacia una posible variabilidad? La respuesta la encontramos al investigar más profundamente la cuestión y revisar los datos disponibles.

Cuando hemos recopilado todas las velocidades radiales existen en la bibliografía (hasta 12), que recogemos en la Tabla IV, comprobamos que las mediciones (que en un primer momento apuntaban hacia variabilidad) no muestran tal.

La información contenida es la siguiente: Día Juliano Heliocéntrico de la observación (con fracción de día si está bien determinada en la bibliografía), velocidad radial con el error en la determinación de dicha velocidad y referencia de la que ha sido tomada (a: Lupton et al., 1987; b: Sonderberg et al., 1999 y c: Pilachowski et al., 2000).

Comenzamos nuestra investigación al topár, casualmente, con seis velocidades radiales tabuladas en el trabajo de Lupton et al., ya citado: la probabilidad  $\chi^2$  obtenida por estos autores apuntaba hacia una clara variabilidad sólo debido a que el primer valor ( $-246.55 \text{ km s}^{-1}$ ) discrepaba casi  $5 \text{ km s}^{-1}$  de los restantes, ya que el siguiente valor más extremo ( $-238.65 \text{ km s}^{-1}$ ) apenas difería de los demás  $3 \text{ km s}^{-1}$ . La amplitud de sus oscilaciones según estos datos sería entonces igual a  $7.9 \text{ km s}^{-1}$ : de  $-238.65 \text{ km s}^{-1}$  como mínimo a  $-246.55 \text{ km s}^{-1}$  como máximo.

Notemos que el error estimado por los autores para el primer valor es bastante grande ( $\pm 1.10 \text{ km s}^{-1}$ ) lo que nos hace pensar que esta medición es de baja calidad; al eliminarla la amplitud decrece a sólo  $3.47 \text{ km s}^{-1}$ : de  $-238.65 \text{ km s}^{-1}$  como mínimo a  $-242.12 \text{ km s}^{-1}$  como máximo. La nueva amplitud es lo suficientemente reducida como para pensar que la estrella no es variable, ya que los errores estimados oscilan entre  $\pm 0.82 \text{ km s}^{-1}$  y  $\pm 0.30 \text{ km s}^{-1}$ .

Si de las once mediciones restantes eliminamos la que presenta el error mayor ( $-238.65 \pm 0.82 \text{ km s}^{-1}$ ) notamos que todas ellas quedan comprendidas entre los  $-240.63 \text{ km s}^{-1}$  como mínimo y  $-242.12 \text{ km s}^{-1}$  como máximo: la amplitud se reduce drásticamente hasta apenas  $1.49 \text{ km s}^{-1}$ . Podemos dudar, con razón, de su variabilidad.

El análisis de las doce velocidades radiales con el programa A.V.E. no proporcionó ningún perío-

Tabla IV

DJH	V ( $\text{km s}^{-1}$ )	
2 441 103.	$-246.55 \pm 1.10$	a
2 442 558.	$-240.63 \pm 0.75$	a
2 442 968.	$-241.06 \pm 0.73$	a
2 444 030.	$-238.65 \pm 0.82$	a
2 444 032.	$-241.63 \pm 0.67$	a
2 444 416.	$-241.05 \pm 0.71$	a
2 449 137.6848	$-241.65 \pm 0.30$	b
2 449 137.7363	$-241.47 \pm 0.30$	b
2 449 137.7813	$-241.66 \pm 0.30$	b
2 449 137.8327	$-241.32 \pm 0.30$	b
2 449 137.8774	$-240.84 \pm 0.30$	b
2 451 330.8613	$-242.12 \pm 0.47$	c

do probable; incluso eliminando primero una medición y más tarde la otra no obtuvimos tampoco ningún resultado. La conclusión es contundente: de sus velocidades radiales no se obtiene periodicidad alguna.

Si al resultado, negativo, obtenido del análisis de las velocidades radiales sumamos el resultado, también negativo, obtenido del análisis de las mediciones fotométricas de dos campañas distintas obtenemos un único resultado consistente con el primero: la estrella no es variable en absoluto. Un caso similar es el de L240, un astro de magnitud 12.34  $V$  situado en la parte noroeste del cúmulo: pese a que existían sospechas de que podía ser variable (algo no confirmado por la fotometría de Osborn de 2000) de sus velocidades radiales no se obtiene indicio alguno de variabilidad ( $\chi^2=10.89$  con cinco mediciones); nuestras mediciones fotométricas descartan tal oscilación lumínica.

## CONCLUSIONES

Al recopilar distintas mediciones de velocidades radiales aparecidas en diversos trabajos (localizadas en SIMBAD y NASA ADS) comprobamos que la estrella L938 parece ser un astro variable, ya que la diferencia entre sus valores extremos es igual  $7.9 \text{ km s}^{-1}$  entre los  $-238.65 \text{ km s}^{-1}$  y  $-246.55 \text{ km s}^{-1}$ . Una amplitud tan elevada sólo se aprecia entre estrellas cuyas capas exteriores se mueven, como es el caso de las variables pulsantes gigantes rojas de M13.

El estudio de las mediciones fotométricas obtenidas por Violat en las campañas de 2005 y 2006, así como el análisis de las imágenes de Arranz tomadas en 2004, pone de manifiesto tres cosas:

a) La magnitud de la estrella es igual a  $12.85 \pm 0.05$  en banda  $V$  (lejos de la magnitud estándar: 12.68  $V$ ); este resultado es idéntico al obtenido de las imágenes de Arranz:  $12.86 \pm 0.02$ .

b) No existe oscilación alguna de brillo: el análisis de 373 mediciones (218 en 2005 y 155 en 2006) apunta a diversos posibles períodos, cortos

o largos, ninguno de los cuales produce una buena curva de luz: sólo uno de los cortos, igual a 8.60 días, origina un resultado de baja calidad que podría parecer debido a una variabilidad real.

c) La magnitud de L938 obtenida a partir de distintas imágenes de Arranz, tomadas al azar, se ha mantenido siempre en el intervalo 12.84-12.88 V: si existe alguna variabilidad ésta es inferior a 0.05 magnitudes (Kopacki et al., que estudiaron la zona durante parte del año 2000 con su más precisa fotometría, no encontraron ningún indicio de variabilidad en ella o al menos no mencionaron absolutamente nada en su estudio).

Al analizar cuidadosamente las 12 mediciones de velocidad radial disponibles en la bibliografía comprobamos que una de ellas es probablemente errónea, no sólo por discrepar demasiado de las demás sino por su baja precisión: al descartarla la amplitud de oscilación desciende desde los 7.9 km s<sup>-1</sup> a sólo 3.47 km s<sup>-1</sup>; la eliminación de una segunda velocidad también posiblemente errónea, con una incertidumbre en la medición bastante alta, reduce a sólo 1.49 km s<sup>-1</sup> el posible rango de oscilación de las capas exteriores de la estrella.

Las distintas pruebas presentadas demuestran que la estrella L938, hasta la precisión de nuestros equipos, no parece ser variable.

Observatorio Astronómico de Cáceres. Cáceres (España), 25 de diciembre de 2006.

## REFERENCIAS

- Arp, H. C., 1955, AJ, 60, 317.
- Brown, A., 1955, ApJ, 122, 146.
- Cathey, L. R., 1974, AJ, 79, 1370.
- Cudworth, K. M., Monet, D. G., 1979, AJ, 84, 774.
- Kadla, Z. I., 1966, Iz. Pul., 181, 93.
- Kopacki, G., Kolaczowski, Z., Pigulski, A., 2003, A&A, 398, 541.
- Ludendorff, H., 1905, Public. Astron. Observ. Postdam, vol 15, No. 50.
- Lupton, R. H., Gunn, J. E., Griffin, R. F., 1987, AJ, 93, 1114.
- Osborn, W., 1973, ApJ, 186, 725.
- Osborn, W., 2000, AJ, 119, 2902.
- Pilachowski, C. A., Sneden, C., R. P., Langer, G. E., 1996, AJ, 112, 545.
- Pilachowski, C. A., Sneden, C., Kraft, R. P., Harmer, D. Willmath, D., 2000, AJ, 119, 2901.
- Shapley, H., 1915, Mt. Wilson Contr., 6, N° 116, 223.
- Soderberg, A. M., Pilachowski, C. A., Barden, S. C., Willmarth, D., Sneden, C., 1999, PASP, 111, 1233.
- Van Maanen, A., 1925, ApJ, 61, 130.
- Welty, D. E., 1985, AJ, 90, 2555.