

VARIABLES EN M13

PERÍODO DE V43

Francisco A. Violat Bordonau
Teófilo Arranz Heras
Alberto Díez Gago

En un artículo anterior (enero de 2003) ofrecimos el período provisional de la nueva estrella variable V43 que ahora refinamos ($P = 97$ días) en base a nuestras mediciones fotométricas obtenidas en el período 2001-2005, las de Kopacki et al. (2003) y doce velocidades radiales tomadas de diversos trabajos espectroscópicos.

Al comienzo de nuestra campaña fotométrica de 2001 nos pusimos como meta medir los parámetros (amplitud y período) de las variables del cúmulo M13, pero también intentar buscar nuevas estrellas variables con nuestras imágenes.

Para llevar a cabo esta búsqueda elegimos muy cuidadosamente 6 estrellas del cúmulo (más tarde ampliadas a 8), solitarias si era posible —para que no fuesen afectadas por el brillo de astros vecinos— y situadas lejos del núcleo; para referirnos a ellas usamos la letra **S** (de Sospechosa) seguida del número de orden: de este modo la estrella L96 (Ludendorff, 1905) pasó a denominarse **S4** en nuestro estudio.

L96 (α : 16h 41m 27.11s δ : +36° 28' 00.3") es una estrella del tipo "gigante roja" y espectro G5Ib (Popper, 1947), tan amarilla como el Sol pero supergigante de elevado brillo con una masa próxima a 0.86 de la solar, que pertenece al cúmulo por su velocidad radial, movimiento propio y posición en el diagrama Color-Magnitud (Cudworth y Monet, 1979): aparece situada en la Rama de las Gigantes Rojas entre los astros más brillantes del cúmulo, pero extrañamente no en la cima como las demás variables rojas; hasta el momento es la variable de este tipo —un astro de baja masa pero grande y frío— más "caliente" de todas las conocidas: su temperatura superficial se cifra en unos 4350 K y es casi 400 K más caliente que las demás variables rojas.

En la base de datos astronómicos SIMBAD aparece como un astro de magnitud 12.52 V y 13.79 B de donde el índice de color B-V= 1.27.

Las primeras mediciones fotométricas de Ludendorff (1905) la registraron con magnitud 12.5 sin especificar más; las de Shapley (1915) la mostraron con magnitud 12.54 V y 13.70 B de donde extrajo un índice de color B-V igual a 1.16. Años más tarde Baum (1954) determinó su brillo midiendo su magnitud V igual a 12.43 y el índice de color B-V igual a 1.22 (magnitud B= 13.65): esta discrepancia de 0.11 magnitudes en V y 0.05 en B podía ser achacada a que los primeros trabajos de

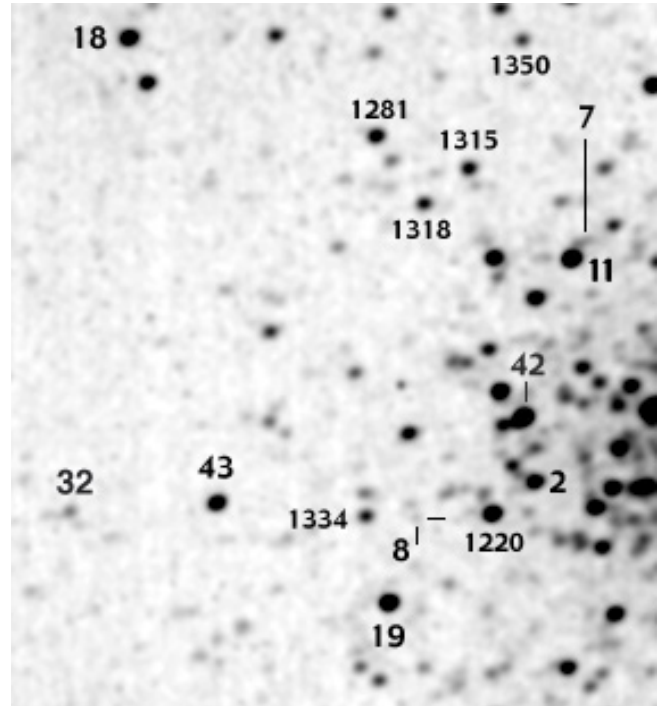


Figura 1. Imagen digital de M13 mostrando la situación de V43, así como seis estrellas de comparación que hemos empleado en nuestros trabajos fotométricos.

Shapley eran de menor calidad, y esto parecía confirmarse con el nuevo estudio fotométrico de Brown (1955), más preciso que el de Shapley para muchas estrellas comunes, quien la encontró con magnitud 12.43 V y 13.69 B e índice de color B-V igual a 1.26. Es evidente que había una diferencia no muy notable entre ellos (0.11 magnitudes en V pero sólo 0.01 en B) que podía achacarse, nuevamente, a minúsculos errores sistemáticos debido a la imprecisión de las mediciones más antiguas. En esa misma época Arp (1955) realizó mediciones fotoeléctricas detectándola con magnitudes 12.40 V y 13.64 B (B-V= 1.24): volvía a aparecer otra vez la discrepancia que ascendía a 0.14 magnitudes en V pero sólo 0.06 en B. Kadla (1966) la midió con magnitud V igual a 12.51 e índice de color B-V igual a 1.26 (magnitud B= 13.77) que confirmaba, extrañamente, el viejo resultado de Shapley (salvo una pequeña diferencia de 0.03 magnitudes en banda V) y volvía a ofrecer un valor distinto. Nuevas observaciones de Cathey (1974) la encontraron de magnitud 12.52 V e índice de color B-V igual a 1.27 (magnitud B= 13.79), arrojando valores similares a los de Shapley del año 1915; de todos modos el propio Cathey se extrañó de las discrepancias observadas entre los valores de su fotometría V y los fotoeléctricos (m_{pv} , magnitud fotovisual) de Arp. Finalmente Cudworth y Monet (1979) obtuvieron un nuevo valor más preciso encontrándola de magnitud 12.52 V con índice de color B-V igual a 1.27 (magnitud B= 13.79) consistente con el resultado de Shapley, Kadla y Cathey, pero no con los estudios fotoeléctricos de Baum, Brown o Arp de los años 1954 y 1955. El trabajo más reciente

sobre fotometría de M13 es del verano de 2004 (David, Jaureguiberry y Rondi, 2004): elaborado con el telescopio T60 (600 mm de abertura) de Pic du Midi con un chip Audine KAF-401E y filtros B, V y R, mostró a V43 de magnitud 12.40 V e índice de color B-V= 1.22 (B= 13.62), en total concordancia con los antiguos datos fotoeléctricos de Arp del año 1955*.

A la vista de estos valores el lector podría pensar que los resultados fotométricos obtenidos por Baum, Brown y Arp habían sido peores para L96 por pura casualidad, pese a que es una estrella alejada del núcleo y sin astros cercanos que influyan con su presencia. Sin embargo cabe otra posibilidad verdaderamente interesante: que la estrella fuese una variable no reconocida como tal y que haya sido medida en épocas muy distintas obteniendo, por ello, valores no muy dispares pero siempre distintos: dejemos esta hipótesis para más adelante por el momento.

Welty (1985) midió el cúmulo en 64 placas fotográficas tomadas con un conjunto film + filtro próximo al sistema B utilizando el reflector de 1 metro del Observatorio Yerkes: 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 datos de ella.

Lupton et al. (1987) midieron 3 velocidades radiales de L96 en los años 1971 (mayo), 1972 (mayo) y 1980 (junio) encontrando valores iguales a 7.81, 8.80 y 9.33 km s⁻¹ con respecto a la velocidad media del cúmulo; según su trabajo esta estrella presentaba una diferencia máxima de sólo 1.52 km s⁻¹ y una probabilidad χ^2 de ser variable igual a 1.74: prácticamente despreciable si la comparamos con los valores χ^2 de V11 (12.85), V20 (19.53), V18 (40.74), V19 (58.49), V24 (88.97), V38 (110.52) o V41 (226.0). De ninguna manera cabía pensar que fuese variable...

Osborn (2000) publicó magnitudes B y V así como posiciones de 104 estrellas del cúmulo empleando fotografías tomadas en el Observatorio Lowell en los años 1983 (19 noches) y 1991 (4 noches) con telescopios de 78.7 a 182.9 centímetros: por desgracia no la incluyó en este estudio.

Finalmente Kopacki et al. (2003), trabajando con un reflector de 60 cm durante 23 noches en el año 2001, demostraron que realmente era una variable de baja amplitud (sólo 0.07 magnitudes en banda V), encontrándola con magnitud media igual a 12.470, aunque sin llegar a determinar su período debido a su reducida cobertura temporal. De su trabajo (Tabla 1) se extrae que su magnitud en banda V oscila entre dos valores: **12.435** en su máximo y **12.505** en su mínimo (12.470 ± 0.035). El máximo es similar a la magnitud medida por

TABLA 1

PARÁMETROS FOTOMÉTRICOS

Magnitud media:	12.470
Amplitud:	0.07
Mag. máxima:	12.435
Mag. mínima:	12.505

Baum o Brown (12.43) aunque difiere en 0.03 magnitudes de la determinada por Arp (12.40); el mínimo es muy similar a la magnitud medida por Shapley (12.54), Kadla (12.51), también con una diferencia de 0.03 magnitudes, Cathey (12.52) o Cudworth y Monet (12.52). A la vista de estos valores, todos ellos consistentes con las magnitudes obtenidas por el equipo polaco, podemos comprobar que estos observadores realmente habían medido sus oscilaciones de brillo sin saberlo...

En 2001 comprobamos que la estrella llamada por nosotros S4 presentaba oscilaciones de brillo de período medio (en torno a 53 días); en enero de 2003 publicamos un estudio* que analizaba las mediciones de los años 2001 y 2002 de este astro (imágenes calibradas con el programa IRIS, de Christian Buil, abandonado ese mismo año por su menor precisión): según nuestro estudio la amplitud fotométrica medida era de 0.100 a 0.105 magnitudes incluyendo el error estadístico (± 0.02 mag.), por lo cual las oscilaciones de brillo reales bajaban a 0.045-0.050 magnitudes sobre o bajo la magnitud media (12.50 V según nuestros datos: 0.03 magnitudes por encima del valor dado por el equipo polaco), presentando una amplitud real en banda V —obtenida por ajuste matemático— de 0.09 magnitudes y un período igual a 53.12 días.

En 2005 diversas ocupaciones académicas nos impidieron analizar adecuadamente las mediciones de la campaña de 2004 de modo que, aunque disponíamos de abundante material de esta estrella obtenido por dos instrumentos distintos, no determinamos sus parámetros con estas nuevas medidas; todos los datos de las campañas de 2004 y 2005 aparecen reflejados en la Tabla 2.

Dado que acabábamos de publicar dos trabajos sobre el período, amplitud y curva de luz de V38, uno de ellos (enero de 2006) basado en 13 velocidades radiales, intentamos un curioso experimento que no habíamos realizado antes: determinar el período de V43 de las mediciones de velocidad radial publicadas en la bibliografía profesional. Después de rebuscar en todos los trabajos publicados (existen más, pero los posteriores a 2000 no son accesibles sin clave y contraseña) logramos reunir un total de ocho velocidades de las cuales una de ellas, la única incluida en el trabajo "A Catalog of Radial Velocities in Galactic Globular

<http://www.astrosurf.com/rondi/racalenillor2/hr/hr.htm><http://personales.ya.com/casanchi/ast/19601.htm>

3
TABLA 2

Autor	Mediciones (DJM)	Días	Medidas	Rango (banda V)	Amplitud (mag.)	Mag. media (banda V)	Período (días)
Arranz	53221—53301	81	76	12.330—12.455	0.125	12.39	117.7
Violat	53169—53311	143	195	12.348—12.488	0.140	12.42	95.8
Arranz	53536—53647	112	227	12.360—12.463	0.103	12.41	96.9
Díez	53546—53622	77	70	12.379—12.561	0.182	12.47	>77
Violat	53526—53652	127	218	12.367—12.505	0.138	12.44	86.7

Desglose de los cinco conjuntos de mediciones fotométricas propias utilizadas en este estudio: los dos primeros corresponden a la campaña de 2004, los tres últimos a la de 2005. Los valores en cursiva son sólo aproximados.

Clusters" (Webbink, 1981), no era válida por discrepar de las demás en casi 15 km s^{-1} y otra carecía de fecha. Antes de descartar esta última por completo nos pusimos en contacto con la Dra. Judith Cohen, co-autora de este trabajo, para solicitarle el dato: nos contestó amablemente situando la medición temporalmente (26 de junio de 2003) con lo que pudimos disponer de un dato más, lo que aumentaba el total a siete mediciones; las mismas están reflejadas en la Tabla 3. 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: Shetrone, 1994; c: Soderberg et al., 1999; d: Pilachowski et al., 2000 y e: Cohen y Meléndez, 2004). La única medición localizada en el trabajo recopilatorio de Webbink que trata, precisamente, de mediciones de velocidades radiales de estrellas de cúmulos globulares, era excesivamente baja (-226 km s^{-1}) y carecía de fecha por lo que no era útil: incluida en el trabajo de Norris y Zinn (1977) podría habernos servido para muestrear mejor el conjunto de datos, todos ellos representados en la Figura 2.

Mecanizadas y analizadas con el programa "Análisis de Variabilidad Estelar" (A.V.E.), empleado en otros trabajos anteriores por su potencia y facilidad de uso, encontramos dos posibles períodos: uno corto igual a **76.79 días** y otro largo igual a **97.1 días**; era el momento de acudir a nuestras mediciones fotométricas para determinar de ellas el período, ya que el pequeño número de velocidades disponibles (ocho, reducidas en reali-

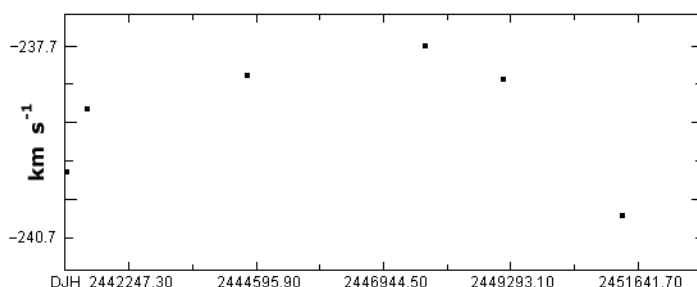


Figura 2. Las siete mediciones de velocidad radial tomadas de la bibliografía descargada de Internet; el rango de oscilaciones detectado es igual a 3 km s^{-1} .

dad a siete) no otorgaba mucho peso al resultado obtenido en este experimento.

En la campaña de 2005 han sido tres los telescopios utilizados: el catadióptrico de 203 mm instalado en Cáceres (Violat), el de 355 mm de Navas de Oro, Segovia (Arranz) y el catadióptrico de 203 mm instalado en San Fernando, Cádiz (Díez): el equipamiento de los dos primeros es muy similar al contar con cámaras Starlight Xpress, una SBIG ST-7 en el caso de Díez, siendo los filtros (V Johnson) y el programa de análisis de imagen (*AstroArt*) el mismo: esto ha permitido obtener imágenes y resultados muy similares entre sí.

Recibidas y analizadas todas las mediciones procedimos al examen de las mismas. La *amplitud instrumental* (suma de la amplitud real más el error aleatorio) medida por Arranz era igual a **0.103 magnitudes** en el rango 12.360-12.463, la de Díez no estaba bien registrada al haber sufrido un error sistemático de origen desconocido al final de la campaña (el valor medido era igual a 0.182 magnitudes en el rango 12.379-12.561), mientras que las de Violat ofrecían un valor igual a **0.138 magnitudes** en el rango 12.367-12.505: podemos comprobar que el instrumento de mayor apertura se aproxima más a la amplitud real (0.07 magnitudes según el equipo polaco, 0.103 según Arranz pero 0.102 según los datos originales de Kopacki et al.) mientras que el telescopio menor midió un valor mayor (casi 0.14 magnitudes).

Las 70 medidas de Díez (Figura 3, arriba) sólo cubrían un período de 77 días (Días Julianos Modificados 53546 al 53622) aunque mostraban cla-

TABLA 3
VELOCIDADES RADIALES DE V43

DJH	V (km s^{-1})	Referencia
2.441.073,	-239.69 ± 1.10	a
2.441.461,	-238.70 ± 1.20	a
2.444.416,	-238.17 ± 0.68	a
2.447.689,754	-237.7 ± 0.5	b
2.449.139,	-238.23 ± 0.56	c
2.451.330,861	-240.36 ± 0.43	d
2.452.816,	$-240.7 \pm \text{---}$	e

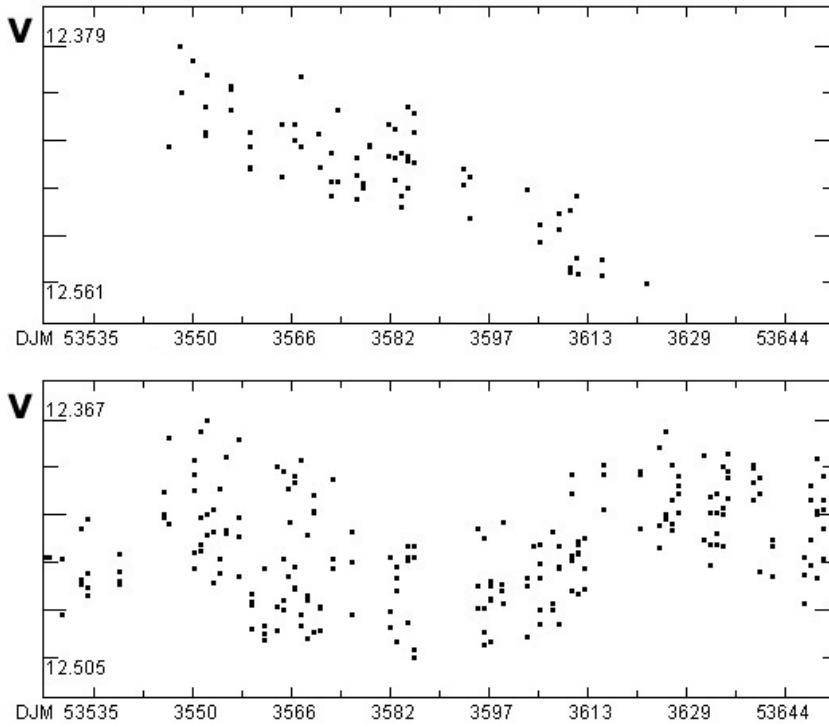


Figura 3. Curvas de luz de V43: han sido obtenidas utilizando las 70 mediciones de Díez (arriba) y 218 de Violat (abajo). Para que fuesen comparables entre sí las de Díez se han representado en el mismo intervalo que las de Violat: entre los Días Julianos Modificados 53526 y 53652. Puede apreciarse el máximo en ambos conjuntos de mediciones, la caída y el mínimo en torno al DJM 53587, aunque el resto de las mediciones del primer observador se han visto afectadas por algún tipo de error sistemático desconocido.

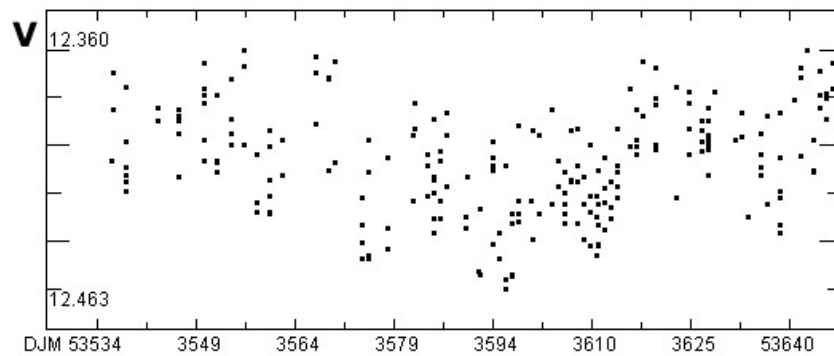


Figura 4. Curva de luz de V43 obtenida por Arranz a lo largo de la campaña de 2005; al igual que las dos curvas de luz anteriores ha sido representada entre los DJM 53526 y 53652 para poder compararla con ellas.

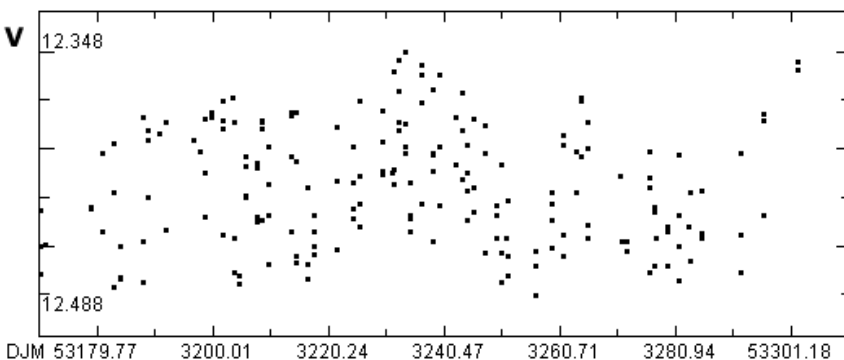
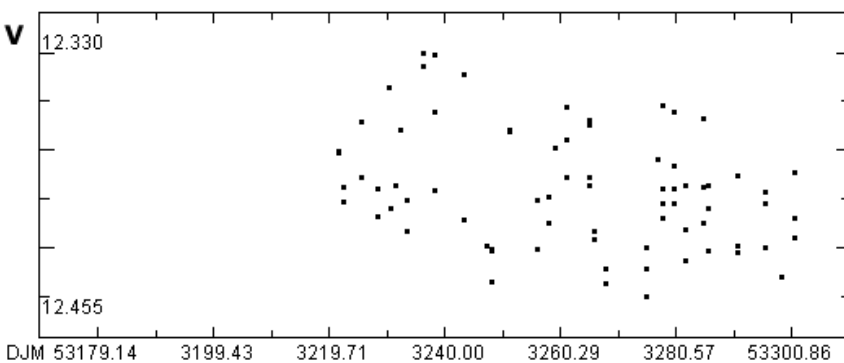


Figura 5. Curvas de luz de V43 obtenidas en la campaña de 2004 de las mediciones fotométricas de Arranz (arriba) y Violat (abajo); ambas se han representado entre los DJM 53169 y 53311 para poder compararlas entre sí. Puede verse que el máximo de brillo, que ocurre en torno al DJM 53234, aparece claramente representado en ambos conjuntos de datos así como la caída de brillo posterior.

ramente una caída de brillo sostenida desde la primera noche a la última; las 218 mediciones de Violat (DJM 53526 al 53652) mostraban (Figura 3, abajo) también la caída, un mínimo y una recuperación de brillo mientras que las 227 mediciones de brillo de Arranz (Figura 4) tomadas a lo largo de 112 noches (entre el DJM 53536 y el 53647) mostraban claramente una caída, un mínimo y una recuperación de brillo que la situó cerca del máximo hacia el final de la campaña. Los tres mínimos registrados por los tres observadores eran coincidentes; el período de la estrella debía ser, forzosamente, próximo a la longitud del período estudiado aunque nunca igual al período determinado con anterioridad en otro artículo (53.12 días) que resultaba ser muy corto.

Al igual que en años anteriores las mediciones tomadas desde Cáceres se han usado como "modelo" del comportamiento de la estrella, para dar continuidad a las observaciones que se iniciaron en el año 2001, con respecto a las cuales se analizan y comparan las demás pese a que (al tener una menor abertura y focal) el error aleatorio es mayor y la calidad final algo menor: el telescopio de Segovia se ha usado como *test* independiente para comprobar la calidad de las medidas de los instrumentos más pequeños. Este procedimiento permite verificar que el comportamiento apreciado en las variables ha sido real y no se ha debido a errores aleatorios durante el proceso de calibración, medición o a la dispar climatología de los demás observatorios y equipos utilizados.

Las mediciones de Díez, forzosamente de menor calidad por ser su primera campaña fotométrica, mostraban claramente que el período era superior a 77 días aunque sin poder precisar más; de las mediciones de Arranz se extraía un único período igual a **117.1 días** que sospechosamente casi coincidía con el tiempo observado (112 días) y que, por consiguiente, era falso (*período espúreo estacional*); no obstante analizadas con otro algoritmo distinto (Scargle en vez de Bloomfield) proporcionaron un período único igual a **96.9 días**. Las de Violat podían ser empleadas sin temor ya que habían cubierto un ciclo de pulsación por completo: analizadas con el mismo algoritmo arrojaron un período igual a **86.7 días** que era, extrañamente, 10 días más corto que el obtenido de los datos de Arranz. (V43, como también V38, presenta una amplitud extremadamente reducida igual a 0.07 magnitudes: por ello no es de extrañar que no sea fácil de estudiar con pequeños telescopios como los nuestros.)

Al acudir a las mediciones de 2004, sin analizar en el caso de esta estrella, obtuvimos de las 79 medidas fotométricas de Arranz (Figura 5, arriba) un período demasiado largo igual a 117 días mientras que de las 195 medidas de Violat (figura 5, abajo) se obtenía un período igual a **95.8 días** que era similar al de Arranz de 2005. Ambos eran muy parecidos al obtenido previamente de las ve-

locidades radiales (97.1 días) de modo que parecían ser bastante buenos o incluso correctos.

Era hora de analizar nuestras mediciones fotométricas obtenidas en el período 2001-2005 para ver si, uniendo todas ellas en grupos homogéneos (por observador), los períodos determinados con anterioridad eran válidos o teníamos que descartarlos al obtener otros completamente distintos.

Los dos conjuntos de datos de mayor calidad y mejor cobertura, dentro de la modestia de su abertura (203 mm), eran los de Violat de los años 2004 y 2005; el análisis de las 413 mediciones de brillo arrojó un valor igual a **103.1 días** para su período: 6 días más largo que los obtenidos anteriormente. Este período producía una buena curva de luz (Figura 6, arriba) con una dispersión menor que si se utilizaba un período igual a 97.1 días, tal como se deducía de las velocidades radiales. Analizadas las 303 mediciones de Arranz de ambas campañas (2004 y 2005) se obtuvo un período igual a **99.4 días**: sólo 2 días mayor que el obtenido anteriormente y 3.7 días más corto que el de Violat (Figura 6, abajo).

No satisfechos con esta coincidencia, una prueba quizá demasiado débil según nuestro propio criterio, procedimos a analizar las 289 mediciones fotométricas de Kopacki et al. obtenidas con filtro V (Figura 7), necesariamente de mayor calidad y precisión por tratarse de un equipo profesional. Al trabajar en el rango 10-200 días obtuvimos dos posibles períodos iguales a **73.4** y **97.34 días**; el más largo era, nuevamente, muy similar al calculado de las velocidades radiales y a los deducidos de nuestras propias mediciones fotométricas de los años 2004 y 2005, tanto utilizándolas en forma de conjuntos de datos independientes (Arranz, Díez o Violat) como al usarlas agrupadas entre sí de modo homogéneo (Arranz 2004 + 2005 o Violat 2004 + 2005).

Al representar las curvas de luz con ambos períodos comprobamos con satisfacción que sólo el más largo (97.34 días) producía un buen resultado, representado en la Figura 8, con una reducida dispersión (muy pocas centésimas de magnitud) en su máximo brillo: esta dispersión no era inherente al ajuste o a los cálculos, sino que realmente se encontraba en las propias mediciones del equipo polaco y podía verse en ellas sin ninguna dificultad (Figura 7).

Los números actuales volvían a ser iguales a los anteriores: estaba claro que V43 pulsaba con un período próximo a los 97 días, valor obtenido tanto de las velocidades radiales como de nuestros datos fotométricos (tratados de modo independiente o agrupados) y corroborado ahora por las mediciones del equipo polaco.

Volvimos a las mediciones de velocidad radial: al representar las curvas de velocidades con los dos períodos encontrados comprobamos que el primero (76.79 días) no era bueno mientras que el

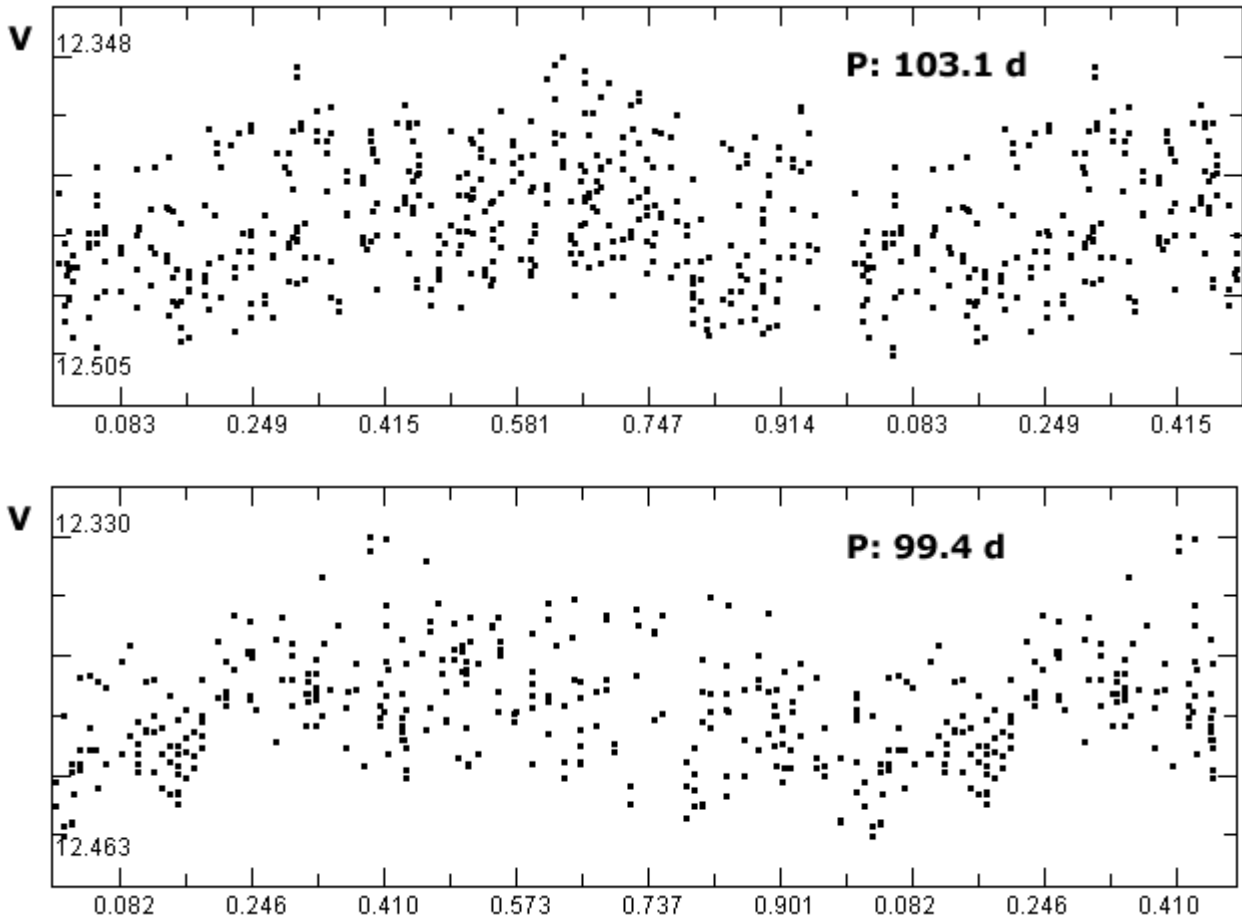


Figura 6. Curvas de luz de V43 obtenidas durante la campaña fotométrica del año 2004: los datos representados en las curvas de luz corresponden al período de 103.1 días obtenido de los datos de Violat (arriba) y 99.4 días de las mediciones de Arranz (abajo); ambas curvas de luz son similares pese a la dificultad para registrar oscilaciones de brillo tan reducidas.

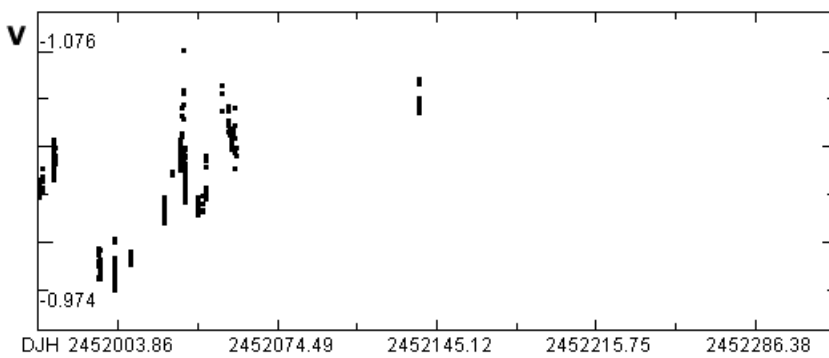


Figura 7. Curva de luz de V43 obtenida por Kopacki et al. a lo largo de 23 noches en la campaña fotométrica del año 2001; amplitud medida: 0.102 magnitudes.

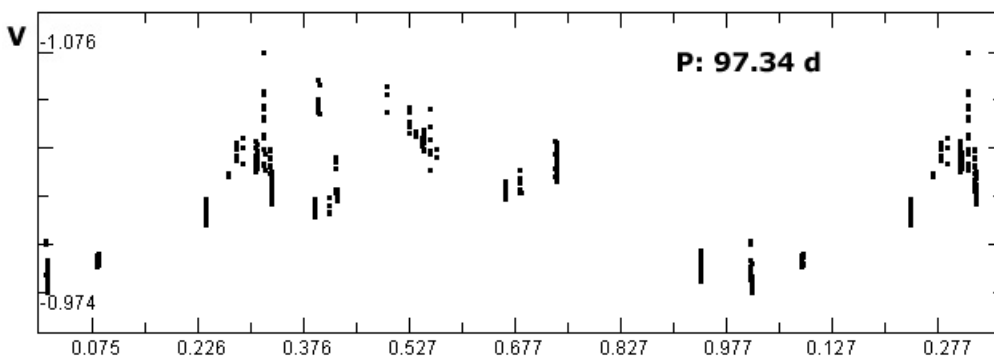


Figura 8. Curva de luz de V43 obtenida utilizando las mediciones originales de Kopacki et al. con un período de 97.34 días; la amplitud registrada es de 0.102 magnitudes.

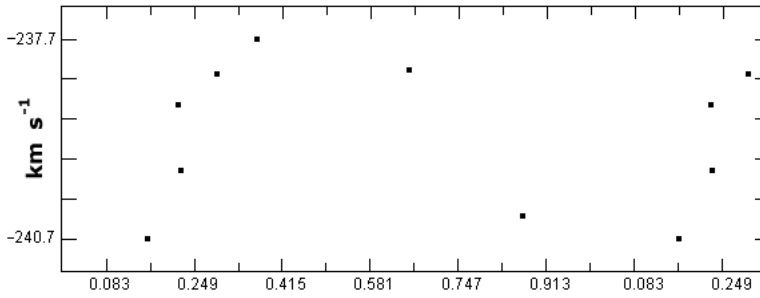


Figura 9. Curva de velocidades radiales de V43 obtenida utilizando siete mediciones con un período igual a 97.1 días. Pese a que el número de datos es demasiado reducido la curva obtenida es consistente con dicho período.

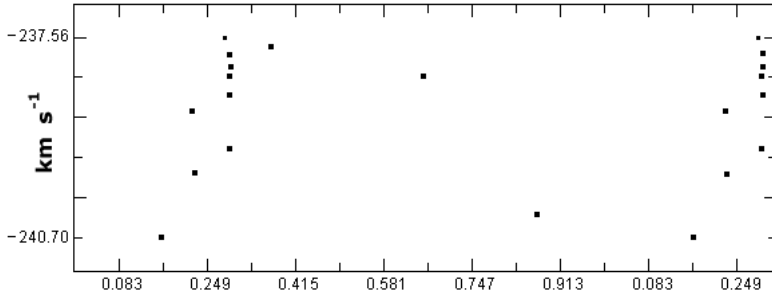


Figura 10. Curva de velocidades radiales de V43 obtenida utilizando doce mediciones con un período igual a 97.1 días. Aunque las nuevas mediciones incorporadas presentan una alta dispersión, la curva obtenida sigue siendo consistente con dicho período.

segundo (97.1 días), similar al obtenido de Kopacki y colaboradores, originaba una curva de velocidades radiales bastante buena (Figura 9) en la cual la diferencia entre sus valores extremos ascendía a 3 km s⁻¹.

Una vez obtenidos estos resultados y a punto de concluir este artículo, topamos en SIMBAD con los datos espectroscópicos contenidos en el estudio de Soderberg et al. (1999): mientras que la edición en papel mostraba un único dato para L96 (una velocidad media igual a -238.23 ± 0.56 km s⁻¹) este fichero contaba nada menos que con seis velocidades distintas tomadas en dos noches consecutivas; gracias a ellas el número de datos a utilizar aumentó de repente a doce (Tabla 4). El análisis de estas nuevas mediciones produjo el mismo período ya indicado: 97.1 días; al representar la curva de velocidades radiales (Figura 10) comprobamos que pese a la dispersión de las mediciones y a que un punto (-237.55 km s⁻¹, representado con un tamaño menor) discrepaba de los

demás, la curva seguía siendo consistente con el período determinado con anterioridad.

La conclusión que podemos extraer es clara: el período de pulsación de la variable V43 es igual a 97 días; los valores obtenidos del análisis de los diferentes grupos de mediciones (97.1 días de las velocidades radiales, 97.34 días de las mediciones de Kopacki y en torno a 97 días de nuestras imágenes) eran prácticamente idénticos, dentro del margen de error de los mismos. La representación de las diferentes mediciones con un período próximo o igual a 97 días produce buenas curvas, bien sean de velocidades radiales o mediciones fotométricas, por lo que el valor obtenido es correcto en todos los casos. Es una lástima no poder contar con las fechas en las que se tomaron las mediciones de brillo históricas (Shapley, Arp, Brown, etc.) porque, seguramente, de ellas podríamos obtener una nueva curva de luz cuyo período sería (probablemente) similar al ya citado.

Ahora nos surge una pregunta: ¿Por qué V43 es variable pulsante cuando es más caliente que las restantes gigantes rojas? O en otras palabras, ¿por qué está situada en el diagrama Color-Magnitud más abajo de la cima de las gigantes rojas (es casi 0.5 magnitudes más débil que las demás) y en una posición en donde no hay más variables de este tipo?, ¿quizá es anómala en algún sentido y por eso pulsa lentamente?

Para contestar esta pregunta hemos acudido a diversos estudios espectroscópicos de estrellas gigantes rojas de M13, algunos de ellos con las velocidades radiales que hemos utilizado, para comprobar si realmente V43 es distinta a las demás en algún sentido (aparte de su temperatura superficial más elevada y su menor brillo).

En el trabajo de Kraft et al. (1992) se analiza la composición química de 13 estrellas de M13, una de ellas V43, estudiando la abundancia de hierro,

TABLA 4

VELOCIDADES RADIALES DE V43

DJH	V (km s ⁻¹)	Referencia
2.441.073,	-239.69 ± 1.10	a
2.441.461,	-238.70 ± 1.20	a
2.444.416,	-238.17 ± 0.68	a
2.447.689,754	-237.7 ± 0.5	b
2.449.137,9412	$-237.55 \pm ---$	c
2.449.138,6744	$-238.16 \pm ---$	c
2.449.138,7191	$-239.31 \pm ---$	c
2.449.138,7705	$-237.83 \pm ---$	c
2.449.138,8151	$-238.04 \pm ---$	c
2.449.138,8699	$-238.47 \pm ---$	c
2.451.330,861	-240.36 ± 0.43	d
2.452.816,	$-240.7 \pm ---$	e

escandio, vanadio, oxígeno y sodio en estos astros. V43 resulta ser anómala por su alta abundancia de escandio (0.03 dex*, similar al valor de V20) en comparación con el resto de las estrellas analizadas (de 0.00 a -0.21), anómala por su bajo contenido en vanadio (-0.11, similar nuevamente al valor de V20) cuando el resto de las estrellas son ricas en vanadio (de -0.09 a 0.10), anómala nuevamente por su abundancia en oxígeno (0.46: el valor más alto de la muestra) cuando las restantes estrellas son pobres en este elemento (de -0.87 en las gigantes rojas frías a 0.36 en las calientes, astros con una temperatura superficial similar a la de V43), mientras que resulta ser deficiente en sodio (-0.24) cuando el resto de las estrellas es rico en este elemento (desde -0.03 en astros calientes a 0.37 en el caso de las estrellas más frías).

En el trabajo espectroscópico de Kraft et al. (1993), que analiza la anticorrelación del oxígeno con el sodio en nada menos que 22 estrellas gigantes rojas del cúmulo, vuelve a destacar como el astro más abundante en oxígeno (0.46) por delante de estrellas de su misma temperatura superficial (0.36 en L745, 0.34 en V18 ó 0.32 en L252), el más deficiente en sodio (-0.34) seguido de lejos por estrellas de similar temperatura (-0.23 en L745 ó -0.04 en V18) y el tercero más rico en titanio (0.40) detrás de L261 (0.52) y L252 (0.50), ambos astros de similar temperatura superficial, pero muy lejos de las demás estrella rojas frías. También se comprueba que su abundancia de níquel es prácticamente idéntica a la de las estrellas más frías del cúmulo.

En el trabajo de Armosky et al. (1994) se mide la abundancia de oxígeno, sodio, itrio, bario, cerio y neodimio; se confirma su sobreabundancia en oxígeno y la gran deficiencia de sodio (es la más alta y baja, respectivamente, de las 20 estrellas estudiadas), su deficiencia en itrio (-0.15) es idéntica a la de las estrellas variables más frías (pero no a la de las estrellas de similar temperatura) mientras que presenta una abundancia de bario (-0.14) idéntica a la de las gigantes rojas frías (hasta 4100 K, representada por V38).

Finalmente en el estudio de Pilachowski et al. (1996) destaca por su bajísima abundancia de sodio (-0.31) pese a que presenta una abundancia de magnesio (0.20) similar a la mayoría de las restantes estrellas gigantes rojas.

Un estudio espectroscópico más amplio y profundo con tablas, gráficos y diversas hipótesis sobre su pulsación, puede verse en un trabajo anterior (Violat y Bennasar, 2003)

A la vista de estos resultados podemos suponer que V43 pulsa porque su composición superficial (y presumiblemente la profunda también) es distinta a la de las demás estrellas de su misma tem-

peratura, mostrando claros indicios de ser muy similar a las gigantes rojas frías en cuanto a la abundancia de ciertos elementos químicos tales como el bario, calcio, itrio, etc. (aunque no oxígeno y sodio), indicio de que en su interior ocurren procesos físicos (quizá rápida rotación, quizá mezclado eficiente, quizá ascenso de productos de nucleosíntesis por corrientes de convección muy fuertes) que originan un principio de inestabilidad: esta inestabilidad interna se refleja externamente en las lentas pulsaciones radiales de la estrella. Suponemos que estas oscilaciones de brillo se irán acentuando, incrementando, creciendo en amplitud a medida que la estrella evolucione, queme su combustible en el núcleo y ascienda hacia la cima de las gigantes rojas ganando brillo y perdiendo masa.

CONCLUSIONES

Del análisis de 12 mediciones radiales recopiladas de la bibliografía profesional (localizadas en SIMBAD y NASA ADS) obtenemos un período de pulsación igual a **97.1 días** para V43. El estudio de nuestras mediciones fotométricas obtenidas en las campañas de 2004 (con dos telescopios) y 2005 (tres telescopios) arroja un valor igual a **96.9 días** (Arranz, 2005) y **95.8 días** (Violat, 2004) para las oscilaciones de brillo que resultan ser levemente inferiores a 0.1 magnitudes en banda V. Por otro lado el análisis de las mediciones de Kopacki et al. del año 2001 produce un período igual a **97.34 días** que es muy similar al determinado de los otros conjuntos de datos, siendo su amplitud igual a 0.07 magnitudes en banda V.

De todos ellos podemos deducir que **la variable V43 tiene un período muy próximo a los 97 días**; este dato se ve corroborado por nuestras mediciones fotométricas conjuntas de los años 2004 y 2005 de las cuales extraemos un período de **entre 95.8 y 99.4 días según el observador** (período promedio: 97.6 días). Ambas curvas de luz son plenamente consistentes con los períodos indicados, pero también coinciden con el período de 97 días ya citado aunque con una menor exactitud y una mayor dispersión, probablemente debido a la dificultad para medir una amplitud tan reducida con instrumentos de 30.5 a 20.3 cm de abertura.

Pese a que está situada en el diagrama Color-Magnitud en una posición en la cual no aparecen otras variables de este tipo, lejos de la cima de las gigantes rojas, creemos que la anómala composición química medida espectroscópicamente (anormalmente rica en escandio y oxígeno aunque muy pobre en sodio, níquel y vanadio) podría explicar ciertos procesos nucleares profundos, que desconocemos, que darían origen a la inestabilidad observada y que se reflejan en lentas pulsaciones radiales: V43 resulta ser la variable con el período

*Valores referidos a la abundancia de estos elementos químicos comparados con los del Sol.

de oscilación más largo medido hasta la fecha (97 días), después de los casi 92 días de V11.

Finalmente queda mencionar como anécdota, sin comprobar debido a la ausencia de fechas de las observaciones, que probablemente el carácter de variable podría deducirse de las mediciones fotométricas históricas que, desde 1915, han venido obteniendo magnitudes en banda V dispares precisamente con los valores máximos o mínimos (rango de oscilación) que se extrae de la fotometría de Kopacki et al. Quizá hubiese bastado analizar estas mediciones para comprobar su carácter de astro variable de baja amplitud, carácter que también podría extraerse de las distintas velocidades radiales medidas por diferentes equipos.

Observatorio Astronómico de Cáceres. Cáceres (España), 22 de febrero de 2006.

NOTA SOBRE V38

Tras finalizar nuestro artículo sobre el período de V38 basado en 14 velocidades radiales (enero de 2006), hemos encontrado en Internet los valores medidos por Soderberg et al. (1999), algunos de ellos utilizados en este artículo para completar la curva de velocidades radiales de V43.

Este trabajo contiene cinco datos distintos para V38 en vez de una velocidad media ($-238.99 \pm 0.44 \text{ km s}^{-1}$) como aparecía reflejada en la edición en papel, con lo cual el número de mediciones disponibles ascienden ahora a 18 (aunque sólo 17 son válidas: la duodécima es discordante y no se ha utilizado), las cuales aparecen en la Tabla 5: como podemos ver la dispersión de estos nuevos cinco datos es realmente pequeña.

Las referencias utilizadas son las siguientes: a) Lupton et al., 1987; b) Shetrone, 1994; c) Lyons et al., 1996; d) Soderberg et al., 1999 y e) Pilachowski et al., 2000).

TABLA 5

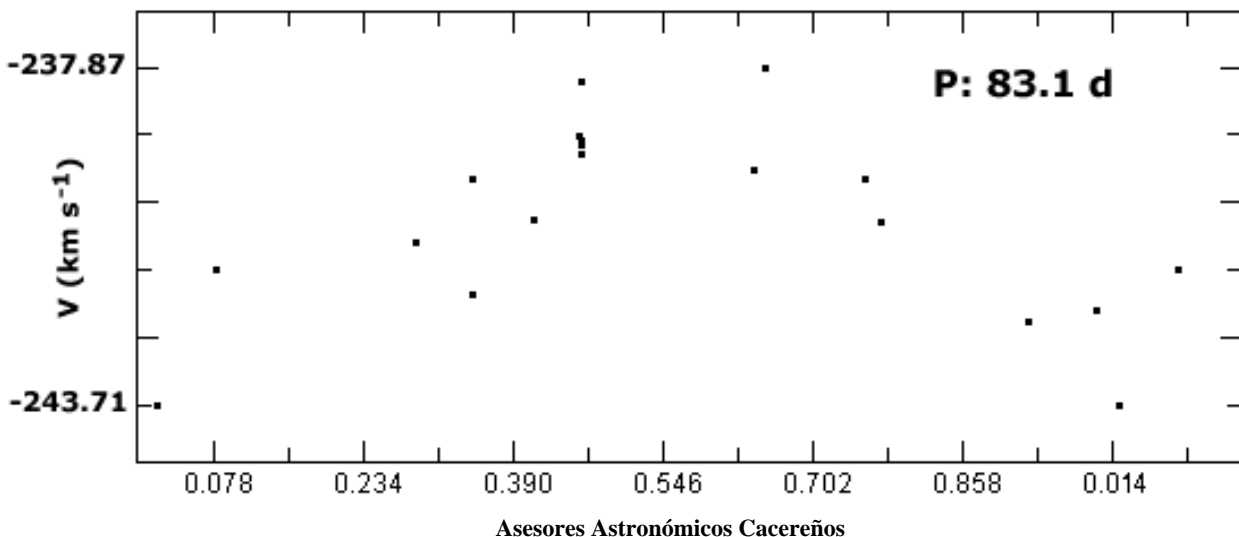
VELOCIDADES RADIALES DE V38

DJH	VR (km s^{-1})	Referencia
2.441.073,	-240.50 ± 1.10	a
2.441.103,	-240.57 ± 0.80	a
2.441.461,	-241.38 ± 0.97	a
2.442.196,	-242.27 ± 0.76	a
2.444.030,	-242.07 ± 0.46	a
2.444.032,	-243.71 ± 0.45	a
2.444.416,	-239.64 ± 0.49	a
2.444.417,	-237.87 ± 0.45	a
2.448.458,724	-240.9 ± 0.4	b
2.448.795,954	-239.8 ± 0.7	b
2.448.795,954	-241.8 ± 0.1	b
2.449.028,	-223.0 ± 1.4	c
2.449.137,7813	$-239.22 \pm \text{---}$	d
2.449.137,8327	$-239.16 \pm \text{---}$	d
2.449.137,8774	$-238.13 \pm \text{---}$	d
2.449.137,6848	$-239.05 \pm \text{---}$	d
2.449.137,7363	$-239.37 \pm \text{---}$	d
2.451.322,783	-239.81 ± 0.39	e

Al analizarlos nuevamente con el programa A.V.E. encontramos un único valor igual a 83.1 días, similar al obtenido con anterioridad, que dibuja una curva de luz perfectamente coherente con todos ellos (Figura 11).

Este resultado es idéntico al expuesto con anterioridad ($P = 83$ días), completa levemente la cobertura de la curva de luz y sirve para demostrar que el valor obtenido en nuestro anterior estudio sobre V38 realmente era correcto, a la vez que refuerza nuestro interés por trabajar con este tipo de mediciones radiales: este sistema nos permite comprobar la validez de nuestros resultados contrastándolos con mediciones completamente distintas a las obtenidas de la fotometría CCD.

Figura 11. Curva de velocidades radiales de V38 obtenida empleando 17 mediciones con un período igual a 83.1 días.



REFERENCIAS

EN INTERNET

Armosky, B. J., Sneden, C., Langer, G. E., Kraft, R., 1994, AJ, 108, 1364

Arp, H. C., 1955, AJ, 60, 317

Baum, W. A., 1954, AJ, 59, 422

Bloomfield, P., 1976, "Fourier analysis of time series: an introduction", publicado en "Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics", New York.

Brown, A., 1955, ApJ, 122, 146

Cathey, L. R., 1974, AJ, 79, 1370

Cohen, J. G., Melendez, J., 2005, AJ, 129, 303

Cudworth, K. M., Monet, D. G., 1979, AJ, 84, 774

David, B., Jaureguiberry, A., Rondi, S., 2004:
<http://www.astrosurf.com/rondi/racalenillor2/hr/hr.htm>

Kadla, Z. I., 1966, Iz. Pul. 181, 93

Kopacki, G., Kolaczowski, Z., Pigulski, A., 2003, A&A, 398, 541

Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, G. E., Prosser, C. F., 1992, AJ, 104, 645

Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, Shetrone, M. D., 1993, AJ, 106, 1490

Ludendorff, H., 1905, Public. Astron. Observ. Postdam, vol 15, No. 50

Lupton, R. H., Gunn, J. E., Griffin, R. F., 1987, AJ, 93, 1114

Lyons, M. A., Kemp, S. N., Bates, B., Shaw, C. R., 1996, MNRAS, 280, 835

Norris, J., Zinn, J., 1977, ApJ, 215, 74

Osborn, W., 2000, AJ, 119, 2902

Pilachowski, C. A., Sneden, C., Kraft, 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

Popper, D. M., 1974, ApJ., 105, 204

Shapley, H., 1915, Mt. Wilson Contr., 6, N° 116, 223

Shetrone, M. D., 1994, PASP, 106, 161

Soderberg, A. M., Pilachowski, C. A., Barden, S. C., Willmath, D., Sneden, C., 1999, PASP, 111, 1233

Violat Bordonau, F. A., Bennasar Andreu, T., 2003, enero:
<http://personales.ya.com/casanchi/ast/19601.htm>

Webbink, R. F., 1981, ApJS, 45, 259

Welty, D. E., 1985, AJ, 90, 2555

Base de datos astronómicos SIMBAD:

<http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>

Búsqueda de bibliografía en NASA ADS:

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

Identificación de V43 en SIMBAD:

CI* NGC 6205 SAW V43

Mediciones originales de Kopacki et al:

<http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/398/541>