

VARIABLES EN M13

ESTUDIO DE V41

Francisco A. Violat Bordonau
Toni Bennasar Andreu

violat@olanet.net

Presentamos los resultados obtenidos en el estudio de la estrella gigante roja V41, una variable descubierta en el año 2001 y seguida por nosotros a lo largo de 3 años.

El trabajo fotométrico más reciente sobre variables de M13 es el publicado por Kopacki *et al.* (2003) que presenta no sólo curvas de luz de nuevas variables gigantes rojas (como V41), SX Phe y RR Lyr, sino también de las cefeidas y RR Lyrae bien conocidas; estos resultados se obtuvieron trabajando con un telescopio reflector de 60 cm de abertura y CCD equipada con filtros V e Ic.

En SIMBAD* podemos encontrarla con distintas denominaciones: **L782** (Ludendorff, 1905), **BARN 196** (Barnard, 1931) o **KAD 491** (Kadla, 1966). De magnitud V 13.14 es miembro del cúmulo (Cudworth y Monet, 1979) siendo su posición exacta (2000.0) la siguiente:

A.R.: 16h 41m 45.67s Dec.: 36° 27' 57.4"

La figura 1, imagen digital en banda V tomada por Toni Bennasar, muestra la posición exacta de la variable con respecto al núcleo y resto de estrellas; hemos marcado cinco astros de comparación cuyas magnitudes estándar V fueron medidas por Osborn en el año 2000. Dichas estrellas han servido para calibrar el programa *AstroArt* a la hora de medir las magnitudes de las variables, presuntas variables y otras estrellas bajo estudio (hasta 30 en la campaña de 2003). La situación de la estrella, muy pegada al núcleo, ha dificultado bastante nuestras mediciones: esto se nota sobre todo en la dispersión de las curvas de luz.

Pese a disponer de sólo **23 noches** de observación durante los **170 días** que duró su campaña (del 27 de febrero al 1 de agosto de 2001, D.J. **51968.5436 al 52137.5080**) el grupo de Kopacki logró obtener una curva de luz bastante completa (figura 2), de la cual obtienen un período de **42.5 días** (es la única gigante roja de la que proporcionan un período fiable); de sus mediciones deducen una magnitud media V igual a **13.155** con una amplitud de sólo **0.11 magnitudes**.

Para determinar cuál es el comportamiento de la variable a lo largo del tiempo que ha estado bajo estudio, determinar mejor su período actual y

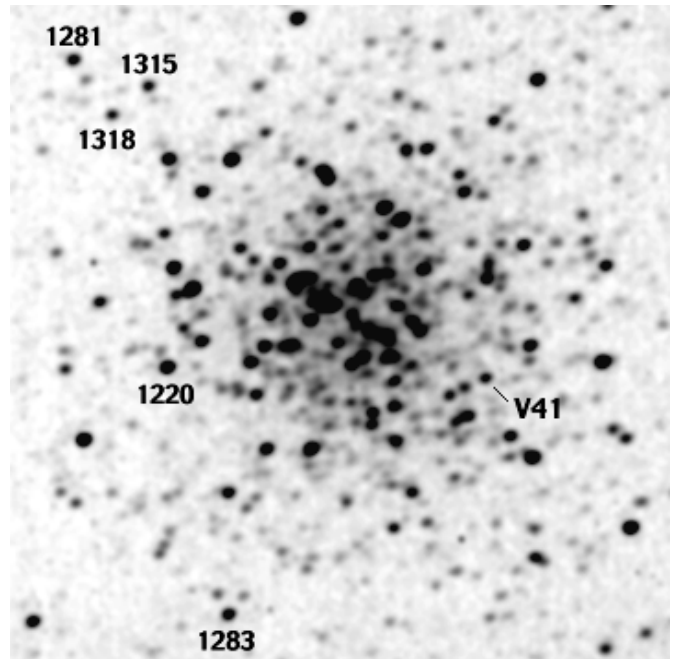


Figura 1. Fotografía CCD en banda V de M13: nos muestra la posición de la variable V41 y cinco astros de comparación fotométrica (Toni Bennasar Andreu, 2003).

comparar estos resultados con los nuestros hemos calculado este período de las mediciones originales de Kopacki: para ello accedimos a los datos depositados en el servidor VizieR¹ del CDS (*Centre de Données astronomiques de Strasbourg*): allí se encuentran disponibles en el fichero *VI light-curves of the variable stars in M13* (Kopacki+), 2003 (referencia *J/A+A/398/541/daovred*). Este fichero (aparece el cuarto de la lista) también puede encontrarse en la dirección:

<http://vizier.u-strasbg.fr/cgi-bin/VizieR-2?-kw.cat=33980541>

El archivo, una parte del cual puede verse en la Tabla 1, contiene los siguientes datos:

1. Nombre de la variable.
2. Fecha (DJ y fracción de día).
3. Medición del brillo (unidades arbitrarias).
4. Error de cada medición, en magnitudes.
5. La masa de aire.

Estas mediciones (342 en banda V) las hemos transformado en documento de texto para que fuesen legibles por el programa *A.V.E.* (Análisis de Variabilidad Estelar), del G.E.A. (Grupo de Estudios Astronómicos), buscando su período con distintos algoritmos matemáticos: más tarde estos mismos datos se han analizado con el programa *PerSea*² obteniendo resultados similares.

En la figura 3 presentamos la curva de luz tal como la genera *A.V.E.* y la comparamos con la original presentada en su trabajo (figura 2): se ha omitido la última noche de observación, tal como

*<http://simbad.u-strasbg.fr/sim-fid.pl>

1: <http://vizier.u-strasbg.fr/cgi-bin/VizieR>

2: http://www.astri.uni.torun.pl/~gm/index_down.html

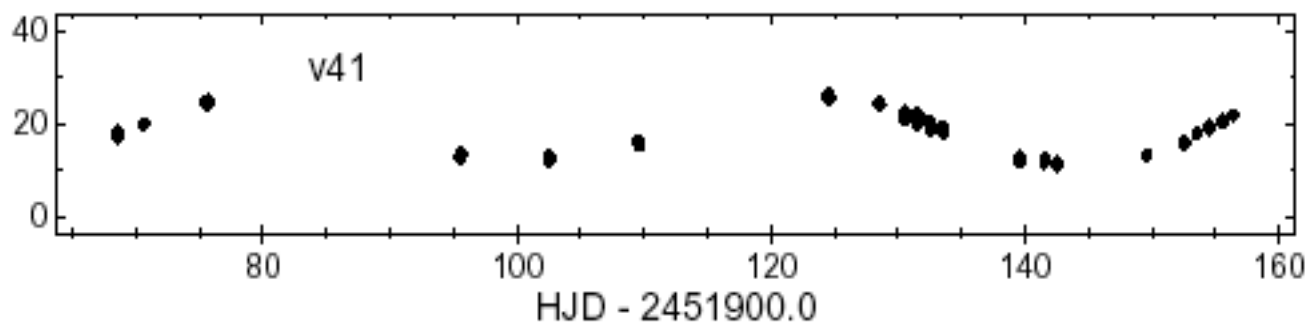


Figura 2. Curva de luz tomada del trabajo de Kopacki *et al.*: podemos ver que la ordenada está expresada en una escala arbitraria en vez de en magnitudes V; el máximo brillo se produjo el DJ 2.452.024.

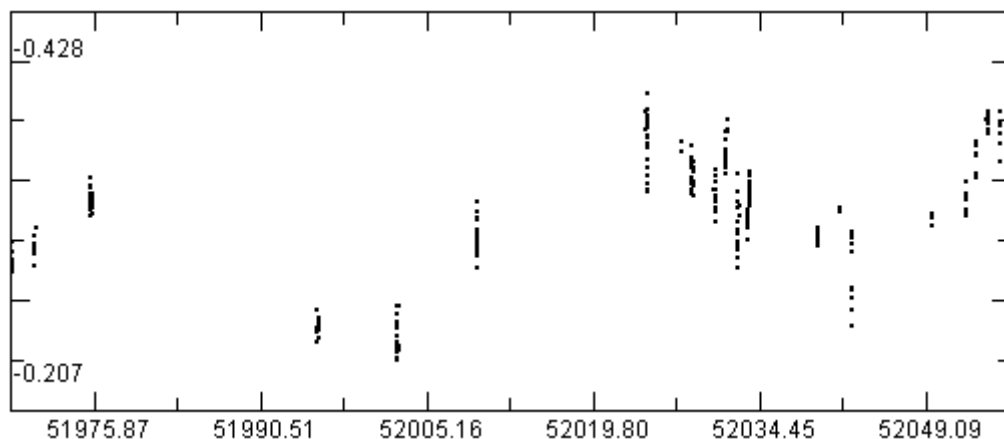


Figura 3. Curva de luz obtenida procesando las mediciones originales de Kopacki en banda V: falta la última noche de observación que hemos eliminado -como ellos- para igualar los períodos representados; nótese la dispersión de las mediciones y la no coincidencia en su brillo de noche en noche: se han representado 308 mediciones de 22 noches distintas.

ellos han hecho también, para que el aspecto de ambas curvas fuese lo más parecido posible a efectos de comparación y estudio. Analizando estas 316 observaciones comprobamos que el error medio es igual a 0.0066 magnitudes, la desviación estándar igual a 0.0018 magnitudes y la amplitud real sube a **0.221 unidades**, dato que no es fácil convertir en magnitudes.

Por otro lado al haber representado esta curva de luz en unidades arbitrarias (algo poco ortodoxo y que resta claridad) no es apreciable en ella la inconsistencia de los datos, ofreciendo un aspecto suave y homogénea en todo momento; además en su curva original parecen haberse capturado dos máximos de luz de brillo idéntico, cuando esto no es así como puede verse con claridad en la figura 3. Lo mismo podemos decir del mínimo de luz: la magnitud de la estrella en ese momento no coincide de un mínimo a otro, ni siquiera teniendo en cuenta el error al medir: da la impresión de que estamos ante un astro cuya curva de luz no ha sido capturada por completo...

v41	2451968.54361	-0.2935	0.0055	1.4014
v41	2451968.54994	-0.2859	0.0052	1.3686
v41	2451968.55626	-0.2802	0.0039	1.3381
v41	2451968.56261	-0.2709	0.0058	1.3095
v41	2451968.56895	-0.2810	0.0055	1.2830
v41	2451968.58202	-0.2762	0.0049	1.2340
v41	2451968.59551	-0.2753	0.0045	1.1906

Tabla 1. Las primeras 7 líneas de datos contenidas en el fichero de Kopacki (tomado de Vizier).

Tomando las mediciones hemos buscado el período en el intervalo 10-100 días con el programa A.V.E. (uso de dos algoritmos distintos) y *PerSea* (utilizando 5 armónicos) obteniendo:

40.05 a 40.06 días (Bloomfield)

39.27 a 39.29 días (Scargle)

40.55 a 40.62 días (*PerSea*)

El valor obtenido difiere en 2-3 días del facilitado por Kopacki lo que indica que el análisis ha sido bastante exitoso; sin embargo cuando representamos la curva de luz con cualquiera de estos resultados, incluso con el suyo propio (42.5 días) se obtiene un resultado un tanto extraño tal como podemos ver en la figura 4: las mediciones parecen dibujar **dos** secuencias distintas de datos con diferentes profundidades y amplitudes (lo mismo se deduce de sus mediciones en la figura 3), lo que puede hacernos pensar en una variable no tan regular como se deduce de la curva de luz original (figura 5).

De estos datos deducimos que estamos ante una estrella variable del tipo semirregular (SRD) cuyos máximos y mínimos de luz no son idénticos de ciclo a ciclo, como se desprende de las curvas de luz obtenidas usando los datos originales. Dado el período de oscilación (en torno a 40-43 días) durante una de nuestras campañas típica (mayo a noviembre) sería factible capturar de 3 a 4 ciclos completos, quizá 5 con mucha suerte y si se dispone de una buena climatología.

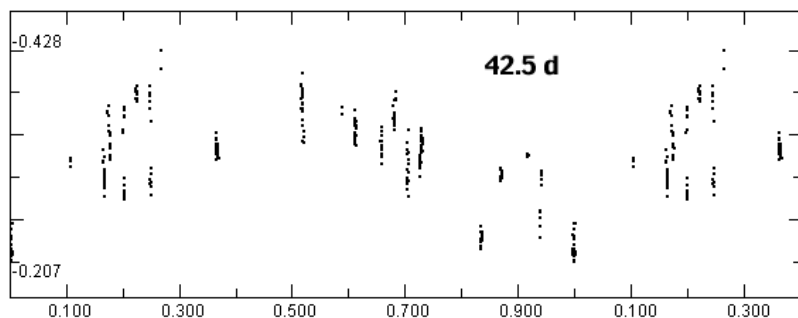


Figura 4. Curva de luz basada en 316 mediciones de Kopacki usando un período de 42.5 días: la curva obtenida muestra una gran dispersión en torno a la fase 0.2 a 0.25.

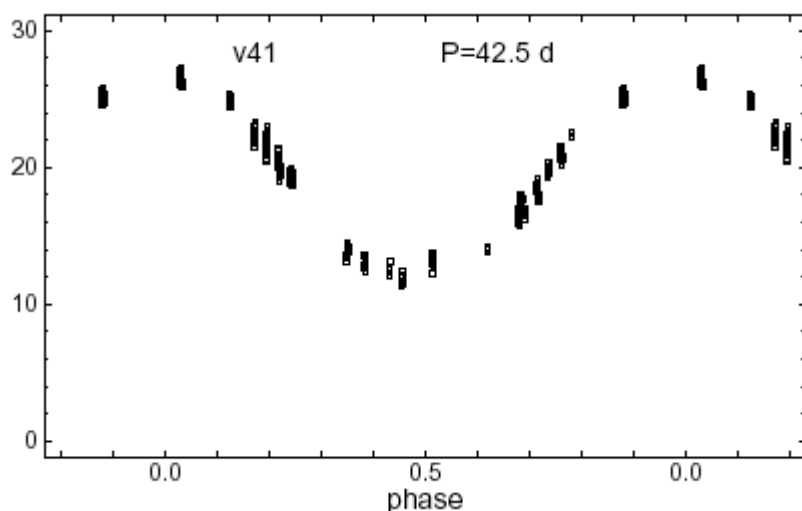


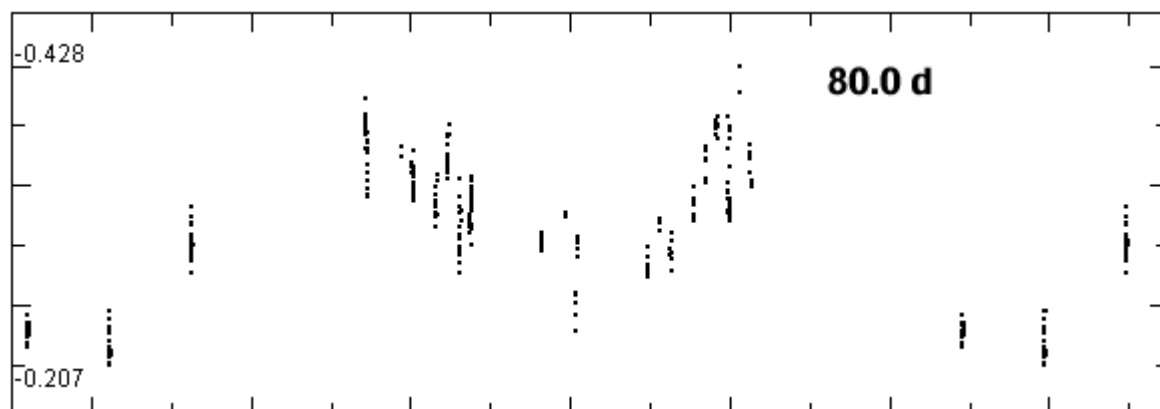
Figura 5. Curva de luz, en banda V, tomada del trabajo de Kopacki: las mediciones parecen consistentes con el período y muestran una dispersión muy baja; compárese este resultado con el obtenido por nosotros mostrado en la figura 4.

Sin embargo cabe otra posibilidad: que se trate de una binaria eclipsante con un período superior a los 42.5 días propuestos; en este caso las mediciones obtenidas representan parte de una órbita, pero en ningún caso el giro completo. De ser cierta esta hipótesis estaríamos ante un sistema binario con un período doble del indicado por Kopacki: en torno a los 80-85 días (el programa *Persea* encuentra otro posible período en el intervalo **76.39 a 76.46 días**).

Al representar las mediciones con un período doble al determinado por A.V.E. (es decir, poco más de 80 días) obtenemos una curva de luz bastante más consistente plasmada en la figura 6: la misma es muy similar a la de una variable del tipo binaria eclipsante; nótese la desigual profundidad de los eclipses que ocurren a intervalos de 40-42

días según estos resultados. Ateniéndonos a la forma de la misma sería una binaria eclipsante del tipo **EB** pero de largo período: una estrella similar es **HD 218179**, variable eclipsante de amplio período (35.93 días) descubierta por el G.E.A. analizando las mediciones del satélite HIPPARCOS y medida con sus equipos entre los años 1997 y 1999. (Sólo otras dos eclipsantes descubiertas por el G.E.A. poseen períodos más largos: una es una algólida con un período de 99.3 días y la otra es también una EB con un período de ¡199.8 días!, el más largo conocido hasta la fecha para una eclipsante de este tipo.)

Figura 6. Curva de luz basada en 316 mediciones de Kopacki pero usando ahora un período de 80.0 días: las mediciones son mucho más consistentes con el período.



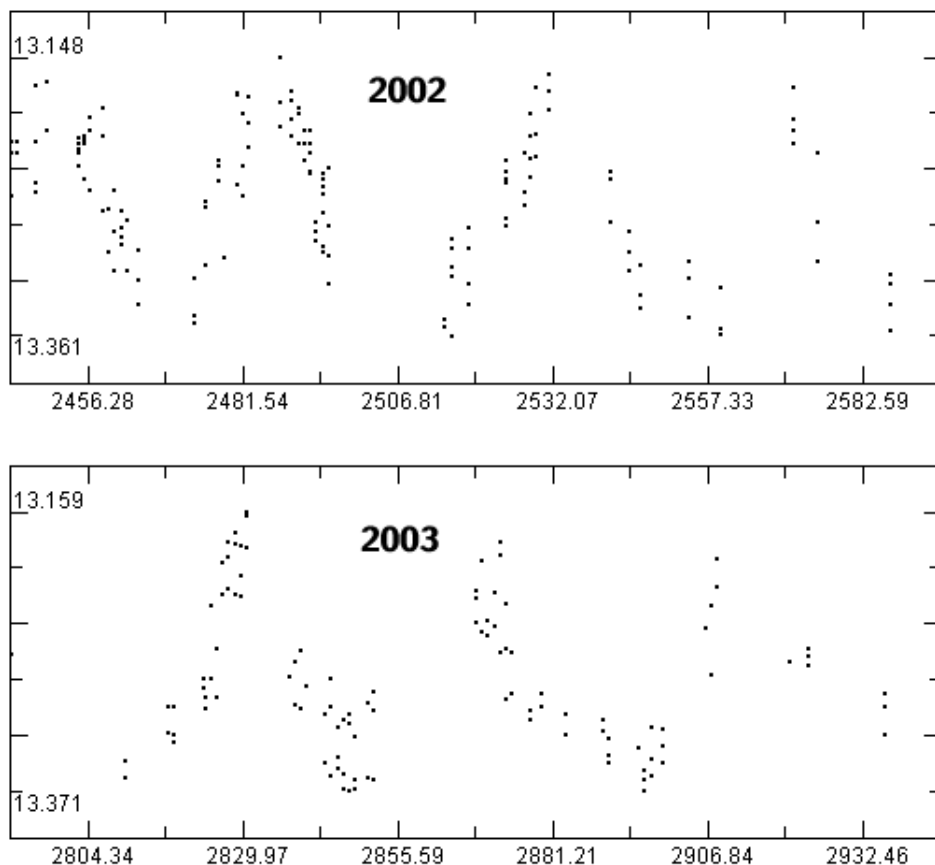


Figura 7. Curvas de luz obtenidas por nosotros a lo largo de las campañas de 2002 (arriba) y 2003 (abajo): las amplitudes medidas han sido 0.213 y 0.212 magnitudes respectivamente.

Recapitulando nos encontramos con dos posibilidades muy distintas: la primera es que V41 sea una estrella gigante roja de tipo pulsante con un período de 41-43 días; la segunda es que estamos ante un sistema binario eclipsante con un período de 80 a 86 días. Es preciso analizar nuestras propias observaciones para comprobar qué hipótesis es la correcta y qué resultados obtenemos.

Nosotros hemos estudiado el cúmulo durante tres campañas fotométricas entre mayo de 2001 y noviembre de 2003, empleando telescopios catadióptricos de 305 y 203 mm de abertura instalados en Palma de Mallorca (Islas Baleares) y Cáceres (España), respectivamente: las mediciones de los años 2002 y 2003 (mostradas en la figura 7) han sido realizadas con filtros V Johnson y cámaras CCD con electrónicas de 16 bits de la marca *Starlight Xpress* modelos MH916 (Mallorca) y MH516 (Cáceres); en un trabajo anterior* hemos comprobado que nuestras magnitudes instrumentales son muy próximas a las estándar.

En este trabajo hemos empleado las imágenes obtenidas en los años 2002 y 2003, ya que al haberse tomado con filtros V Johnson son más homogéneas y comparables con las estándar.

Hemos obtenido un total de **267 mediciones** de magnitud en banda V de las cuales **155** corresponden a la campaña de 2002 y **112** a la de 2003, ne-

cesariamente más reducida por cuestiones meteorológicas; al haber trabajado durante un amplio período hemos capturado 4 máximos en 2002 y 3 en 2003, lo que nos ha permitido no sólo determinar mejor su período y amplitud aparente (incluyendo el inevitable error aleatorio al medir) sino poder elaborar efemérides que comparar con las deducidas de los datos de Kopacki.

Estas mediciones las mostramos en la figura 7: en el eje vertical tenemos las magnitudes instrumentales V y en el eje horizontal el día juliano de las distintas campañas; el rango instrumental medido (o escala) difiere de un año a otro en 0.010 magnitudes en los mínimos y 0.011 magnitudes los máximos. En ambos casos la amplitud obtenida (0.213 y 0.212 magnitudes,) es igual al doble de la de Kopacki (0.11 magnitudes).

Al analizar las mediciones de modo separado y con dos algoritmos obtenemos distintos períodos:

año	Bloomfield	Scargle
2002	41.62	41.54
2003	40.58	41.51
ambos	42.59	42.46

notamos que los resultados obtenidos analizando campañas individuales oscilan entre 40.58 y 41.62 días, de uno a dos días más corto que el propuesto por Kopacki; sin embargo el análisis de los datos de modo conjunto (2002 + 2003) sí arroja valores idénticos a los suyos. Una manera de comprobar qué valor es el acertado consiste en representar la

*"Variables en M29", disponible en la dirección:

<http://personales.ya.com/casanchi/ast/m29.pdf>

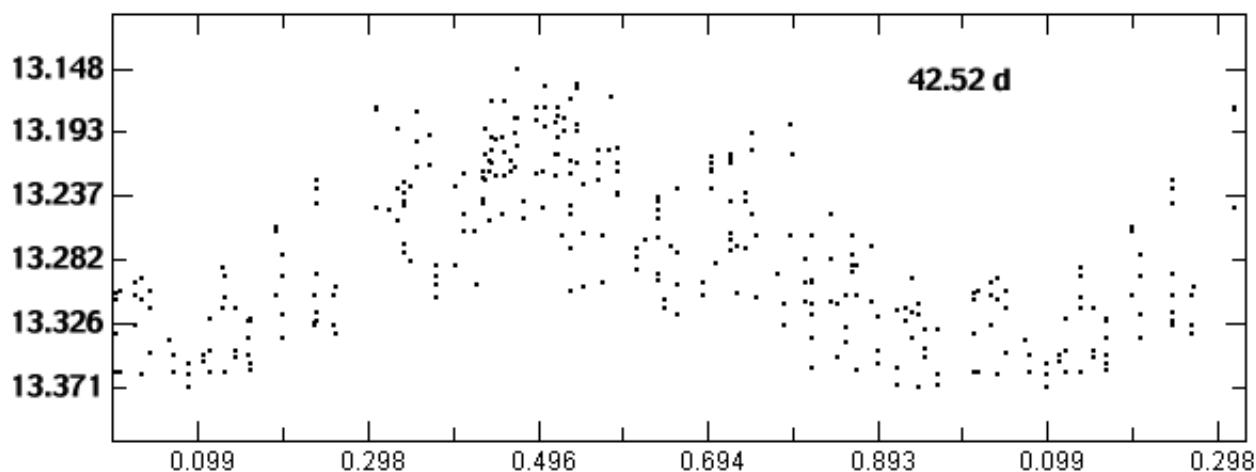


Figura 8. Curva de luz obtenida empleando las mediciones conjuntas de ambas campañas y usando un período de 42.52 días, la media de nuestros dos valores: el resultado es plenamente consistente con dicho período y con el valor de Kopacki.

curva de luz de los datos conjuntos con cada uno de los períodos obtenidos; el resultado será o no coherente y mostrará o no una buena curva de luz, lo que indicamos con **S** o **N**:

Período	coherencia
40.58	N
41.51	N
41.54	N
41.62	N
42.46	S
42.59	S

lo que demuestra que las mediciones conjuntas 2002 + 2003 sólo son consistentes con períodos muy similares a los de Kopacki: la figura 8 muestra la curva de luz obtenida empleando un período de 42.52 días, la media de los dos valores hallados por nosotros que difiere en 0.02 días (28.8 minutos) del valor propuesto por el equipo polaco.

Podemos apreciar que la curva de luz es consistente con este período aunque muestra una dispersión de 0.06-0.09 magnitudes en todo momento originada, como comentamos, no tanto por su debilidad (magnitud 13.15 V) sino por la cercanía al núcleo y el apiñamiento que ello origina a la hora de medir correctamente... Si comparamos esta curva de luz con la de Kopacki (figura 4) notaremos que la nuestra es, paradójicamente, de mayor calidad por su consistencia aunque presente una mayor dispersión en las mediciones.

Hemos empleado también el programa *PerSea* y buscado los posibles períodos a efectos de comparación: en este caso se ha trabajado en el intervalo 30-90 días empleando 5 armónicos; el resultado es igual a **42.520±0.415** días por un lado y **84.403±1.574** días por otro, muy similar al facilitado por A.V.E. Al representar las curvas de luz con ambos períodos se obtienen en ambos casos curvas de luz consistentes (figura 10) sin que nos sea posible decantarnos por una u otra como re-

presentación del período más probable.

Podemos calcular el período de otro modo: empleando sus máximos de luz; de las mediciones de Kopacki comprobamos que éste ocurrió el DJ 2.452.024 mientras que de nuestros datos podemos determinar incluso 6 (figura 7), al que añadimos uno bien registrado en julio del año 2001 (no representado en ninguna gráfica y medido expresamente para este cálculo). Tomando como origen el dato de Kopacki y sabiendo que el período vale 42.5 días podemos determinar unas sencillas efemérides (Tabla 2) en donde **D** es el número de días transcurridos entre ellos, **E** (abreviatura de Época) representa el número de ciclos completos cubiertos y Δ la diferencia (en días) entre el máximo teórico y el observado por nosotros:

Tabla 2

Máximo (DJ)	D	E	Δ
52024.537	---	---	---
52109.700	85	2	0.12
52487.557	463	11	-4.48
52531.443	507	12	-3.09
52571.327	547	13	-5.71
52830.637	806	19	-1.40
52872.516	848	20	-2.02
52908.397	884	21	-8.64

notemos dos cosas: la primera de ellas es que la diferencia entre el máximo calculado (C) menos el observado (O) es de 8.6 días como mucho y la segunda es que el ciclo de 42.5 días es consistente con los máximos observados. Por otro lado la enorme diferencia O-C (de 1 a 8 días) se debe no a una irregularidad de su ciclo, sino a que nuestras observaciones no siempre se han efectuado la noche del máximo y son valores muy aproximados (ver figura 7) pero no siempre correctos, excepto el primer máximo -julio de 2001- capturado por completo y por ello bien medido (el no haber

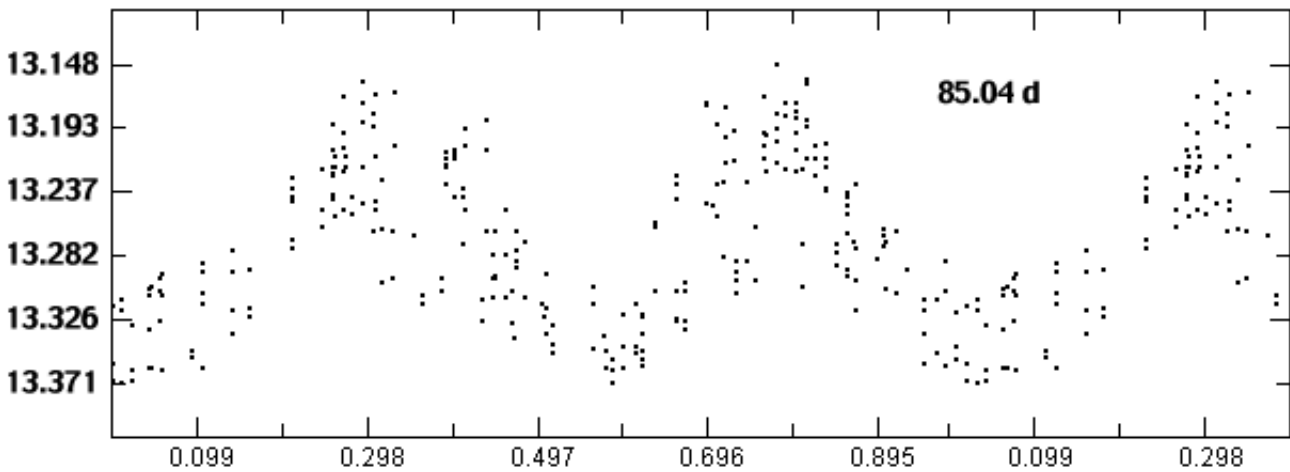


Figura 9. Curva de luz obtenida empleando las mediciones conjuntas de ambas campañas y usando un período de 85.04 días, la media de nuestros dos valores: el resultado está de acuerdo con dicho período y con el valor de Kopacki *et al.*

usado el filtro V Johnson ese año no impide haber registrado el instante del máximo, sino sólo comparar las magnitudes fotométricas entre sí).

¿Es V41 una gigante roja pulsante o una binaria eclipsante?; a favor de la primera hipótesis está el que varias variables rojas de M13 presentan períodos similares, pero en contra el que todas ellas están situadas en la cima de la *rama de las gigantes rojas* siendo muy luminosas pero a la vez muy frías: en un trabajo fotométrico reciente ("*Estrellas no variables en M13*"*) hemos comprobado que 12 brillantes gigantes rojas del cúmulo cuyo índice de color B-V es inferior a 1.45

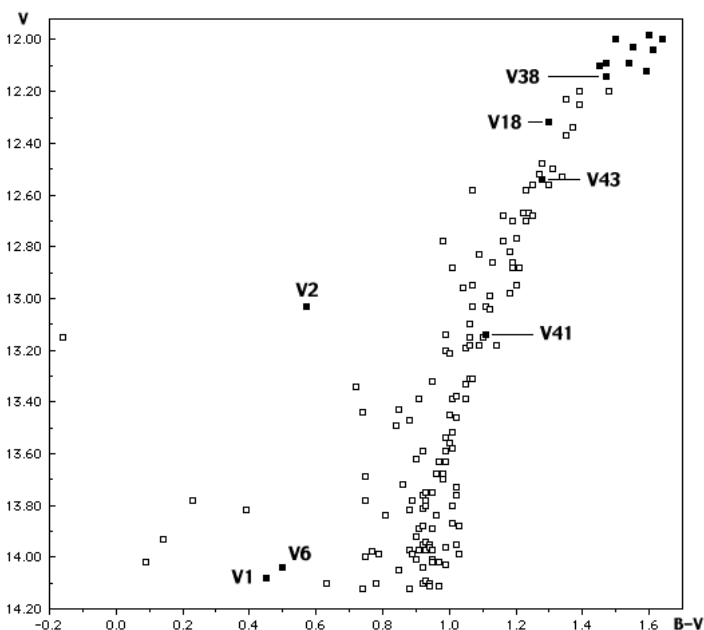
no son variables. V41 posee un índice de color B-V= 1.11 (Cudworth y Monet, 1979) siendo por ello demasiado *caliente* como para ser variable pulsante gigante roja... (según nuestras conclusiones V43 tampoco debería ser variable: es levemente más fría pero todavía demasiado *caliente* como para ser también una pulsante).

Para comprobarlo nos hemos tomado el trabajo de elaborar un diagrama color-magnitud de 150 estrellas (hasta la magnitud 14.10) partiendo de los datos originales de Cudworth y Monet; la figura 10 muestra su posición en el digrama: como podemos ver está demasiado alejada de la zona de variables gigantes rojas (cuadros negros) como para ser variable (V2, V1 y V6 son cefeidas). Incluso V43, nueva variable según Kopacki, es bastante más fría (B-V= 1.27) por lo cual podemos considerarla como la última estrella gigante roja que todavía es variable pulsante.

Esto mismo lo comprobó Welty (1985): no hay variables rojas por debajo de la magnitud 12.8-13.0 en los 6 cúmulos globulares que estudió.

A favor de la segunda hipótesis tenemos el trabajo de Hut *et al.* (1992) en el cual citan a L782 (ahora V41) como candidata a sistema binario en base a su velocidad radial, la cual oscila en un rango de nada menos que 36 km/s según los trabajos de Lupton *et al.* (1987). En este trabajo aparece un sencillo modelo que casi podemos aplicar a este caso: una binaria con astros de 0.8 y 0.4 masas solares separadas por una distancia de 0.25 UA que cubrirían su órbita en **42 días**; si la órbita fuese circular la estrella menor se movería a una velocidad de 22 km/s, que puede compararse con la medida por el equipo de Lupton; una órbita excéntrica podría explicar esta mayor velocidad así como la no coincidencia de los mínimos con la fase 0.5 (figura 9). En este caso el brillo real de cada estrella, supuestas de tamaño y luminosidad parecida, rondaría la magnitud 13.9 (la magnitud conjunta del sistema es 13.15 V)

Figura 10. Diagrama color-magnitud hasta la magnitud 14.10^a V: las variables aparecen con cuadrados negros; nótese la posición de V41 lejos del resto de las variables rojas.



*<http://personales.ya.com/casanchi/ast/varm1301.htm>

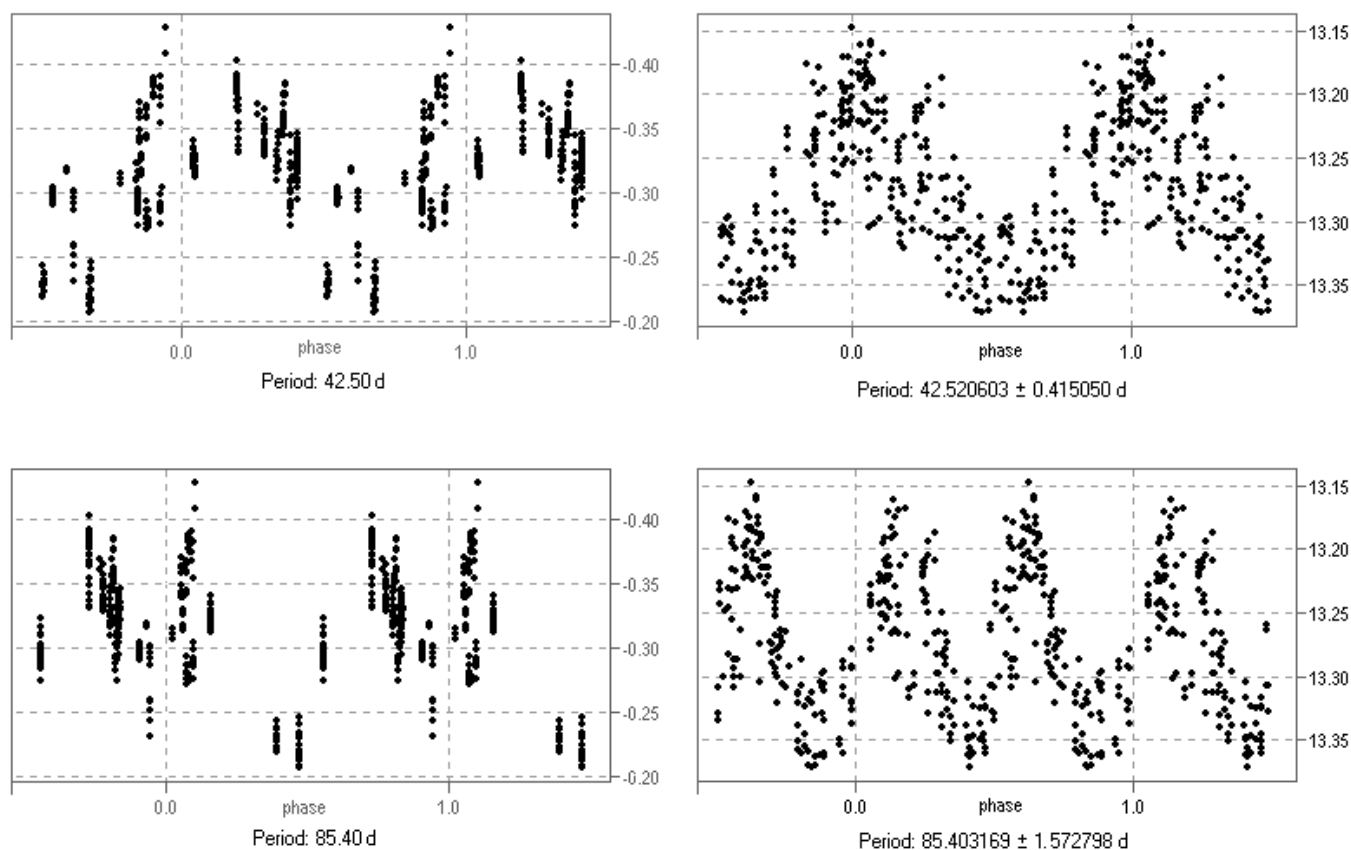


Figura 11. Curvas de luz empleando un período de 42.52 días (arriba) y 85.40 días (abajo), elaboradas por medio del programa *PerSea*: las figuras de la izquierda corresponden a los datos de Kopacki, los de la derecha a nuestros datos; puede notarse la similitud de ambas curvas de brillo, aunque las nuestras (pese a tener menos puntos) aparecen más completas y con una mejor cobertura temporal de su fase.

Nuestras observaciones, pese a ser menores en número y calidad ofrecen, sin embargo, una mejor cobertura temporal de su fase al haber observado un mayor número de ciclos: la figura 11 muestra las curvas de luz tal como las representa el software *PerSea* empleando los datos de Kopacki (izquierda) y nuestros (derecha) utilizando períodos de 42.5 y 85.4 días; la diferencia salta a la vista: nuestras mediciones son plenamente consistentes con dichos períodos y dibujan bastante bien sus oscilaciones lumínicas pese a la excesiva dispersión que presentan.

Tanto las mediciones del grupo polaco como las nuestras no son todavía lo suficientemente abundantes ni precisas como para decantarnos por una hipótesis u otra: necesitamos nuevas observaciones de mayor precisión en la campaña del año 2004 para resolver esta difícil cuestión.

Observatorio Astronómico de Cáceres, 14 de abril de 2004.

REFERENCIAS

- Barnard, E. E.: 1931, Public. Yerkes Observatory 6, 1
- Cudworth, K. M. y Monet, D. G.: 1979, AJ 84, 774
- Hut, P., McMillan, S., Goodman, J., Mateo, M. *et al.*: 1992, PASP, 104, 981
- Kadla, Z. I.: 1966, Iz. Pulkovo 181, 93
- Kopacki, G., Kolaczowski, Z. y Pigulski, A.: 2003, A&A 398, 541
- Ludendorff, H.: 1905, Public. Ast. Observ. Postdam, vol 15, No. 50
- Lupton R., Gunn, J. E. y Griffin, R. F.: 1987, AJ 93, 1114
- Osborn, W.: 2000, AJ 119, 2902
- Violat Bordonau, F. A. y Violat Martín, V.: *Variables en M29* (Web Casanchi), febrero de 2004:
<http://personales.ya.com/casanchi/ast/m29.pdf>
- Violat Bordonau, F. A. y Bennasar Andreu, T.: *Astros no variables en M13* (Web Casanchi), diciembre de 2003:
<http://personales.ya.com/casanchi/ast/varm1301.htm>
- Welty, D. E.: 1985, AJ 90, 255