

VARIABLES EN M13

ESTUDIO DE V11

(2001-2005)

Francisco A. Violat Bordonau
Teófilo Arranz Heras
Alberto Díez Gago

En este nuevo trabajo presentamos curvas de luz y períodos de oscilación de la estrella V11 en base a las mediciones fotométricas que hemos obtenido en el intervalo 2001-2005, las de Osborn y Fuenmayor (1977), las de Kopacki et al. (2001) y otros datos diversos recopilados de NASA ADS y SIMBAD. Encontramos que su amplitud en banda V es próxima a 0.5 magnitudes, mientras que el período de pulsación está en el rango 91-93 días según la campaña estudiada (período medio en el intervalo 2001-2005: 90.91 días); sin embargo analizando 20 velocidades radiales este valor resulta ser levemente superior a los 96 días.

V11 (α : 16h 41m 36.66s δ : +36° 26' 35.5", 2000.0) también conocida como L324 (Ludendorff, 1905) o KAD 426 (Kadla, 1966), es un astro que pertenece al cúmulo M13 por su movimiento propio (Kadla, 1966, Cudworth y Monet, 1979); es de tipo espectral K0Ib (Popper, 1947) por lo que aparece como un brillante astro ambarrino que por su luminosidad resulta ser una supergigante de menor brillo. La temperatura efectiva $T_{\text{eff}} = 4050$ K (Armoski et al., 1994), su magnitud bolométrica $M_{\text{bol}} = -3.21$ (Shetrone, 1994) mientras que su magnitud absoluta $M_0 = -2.3$ (Pilachowski et al., 1996): situada a 10 pc de la Tierra brillaría más que Sirio aunque de color dorado.

Con magnitud V 12.15 e índice de color B-V = 1.44 (Osborn y Fuenmayor, 1977) y B-V = 1.45 (Osborn, 2000) resulta ser uno de los astros más brillantes del cúmulo (Figura 1), apareciendo en el diagrama color-magnitud en la cima de la Rama de las Gigantes Rojas: en este lugar se localizan las variables pulsantes del tipo "gigante roja", de las que se conocen casi una docena en M13 (V11, V15, V17, V18, V20, V24, etc.).

Pese a que sus oscilaciones de brillo son fáciles de seguir incluso con telescopios medianos, debido a su proximidad al núcleo no sería descubierta como nueva variable hasta el año 1940 (Sawyer, 1940), siendo clasificada dos años más tarde como de tipo irregular (Sawyer, 1942).

Joy (1949) analizó ocho espectrogramas encontrándola entre los tipos G2—K0Ib y clasificándola, de paso, en el grupo de estrellas cuyos períodos oscilan entre los 65 y 106 días (astros semirregulares); en este trabajo incluyó ocho velocidades radiales en el rango -234 a -290 kms⁻¹. Midió una amplitud de 0.9 magnitudes (magnitudes fotográficas, m_{pg}) encontrándola entre m_{pg} 12.9 en el máximo y m_{pg} 13.8 en el mínimo.

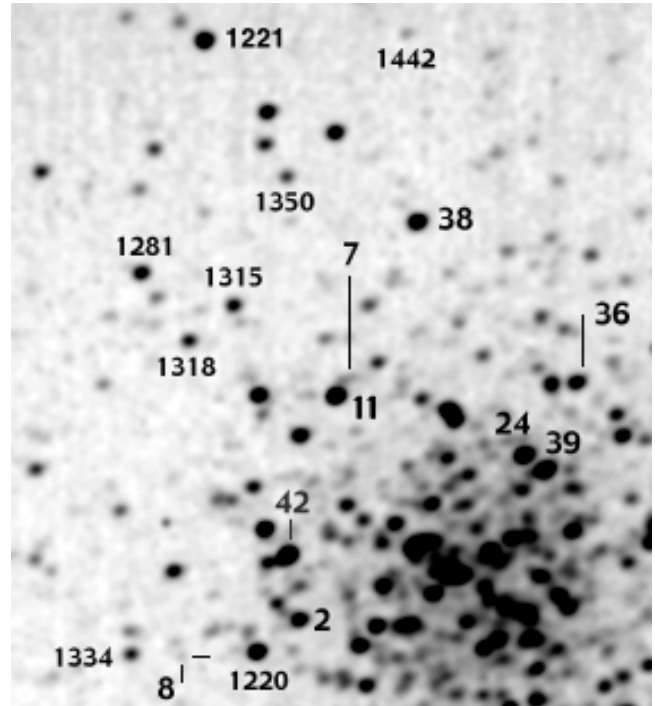


Figura 1. Imagen digital de M13 mostrando la situación de V11, así como algunas de las estrellas de comparación que hemos empleado en nuestros trabajos fotométricos.

En la actualización del *Catálogo de Estrellas Variables en Cúmulos Globulares* de 1955 (Sawyer, 1955) aparece ya con un período igual a 92.5 días determinado poco antes por Arp.

V11 es un astro muy frío por lo cual es un fuerte emisor de luz roja e infrarroja: por ello aparece brillante con filtro V (verde), más brillante con el R (rojo) pero muy destacado con el I (infrarrojo); la magnitud determinada por Russev (en 1974) fue I = 9.97 presentando un índice de color B-V = 1.54 y V-I = 1.69, pero B-I = 3.23 (es decir, brilla algo más de tres magnitudes menos en luz azul que en infrarrojo). En esa época era la estrella más brillante del cúmulo medida a través del filtro I.

Demers (1971) midió imágenes del año 1967 ofreciendo una sencilla curva de luz que parecía cuadrar bien con sus doce mediciones de brillo en el rango 11.64—11.90 V (amplitud medida: 0.26 magnitudes, magnitud media: 11.76) utilizando el período de 92.5 días determinado por Arp; la amplitud medida en banda B fue igual a 0.44 magnitudes en el rango 13.16—13.60.

Estudiada por Russev (1973) este investigador estableció que su período de pulsación era igual a 91.77 días.

Pocos años más tarde Osborn y Fuenmayor (1977) midieron 59 placas fotográficas tomadas por el reflector astrométrico del USNO en los años 1967, 1968 y 1969 con una combinación de película y filtro cuya transmisión era similar al sistema B (casi equivalente a haber trabajado con el filtro azul B Johnson). El análisis de sus 56 mediciones proporcionó una amplitud máxima de 0.67 magnitudes en el rango 13.10—13.77 B y un

Figura 2. Curva de luz de V11 obtenida por Osborn y Fuenmayor en 1967 en luz azul: se aprecia un ciclo corto (máximo de menor brillo), una recuperación muy lenta y el inicio de un ciclo largo que presenta un máximo de mucho mayor brillo.

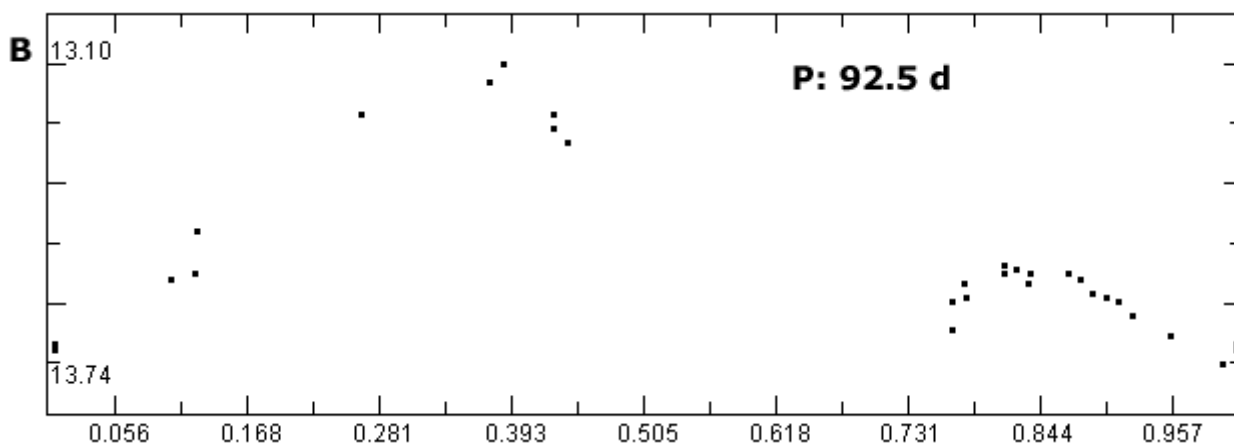
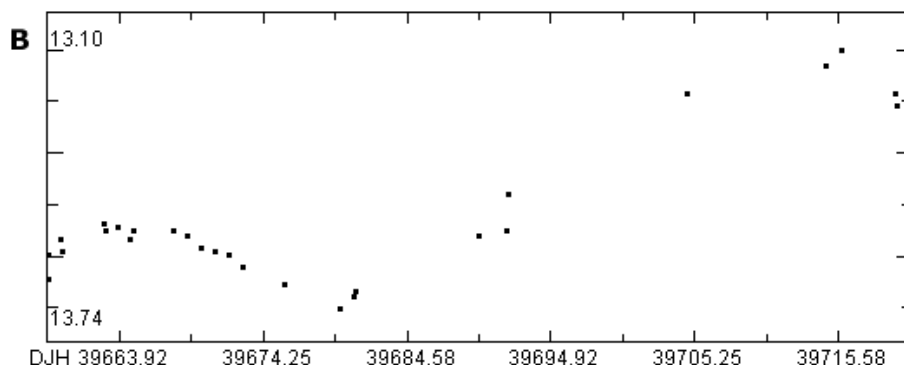


Figura 3. Las mismas 28 mediciones pero representadas ahora con un período igual a 92.5 días: es notorio el máximo secundario, o de menor brillo, poco antes de alcanzarse el mínimo.

período de pulsación igual a 92.42 días, valor próximo a los hallados por otros investigadores, mostrando las clásicas irregularidades en el período y forma (por ejemplo *chichones*) propio de las estrellas semirregulares. Según estos investigadores su magnitud media $V = 11.9$ y su amplitud era igual a sólo 0.2 magnitudes con este filtro.

En el trabajo fotométrico de Pike y Meston (1977) sólo aparecen seis fotométricas, siendo su magnitud media $V = 11.94$ en el rango 11.88—12.02 (amplitud: 0.14 magnitudes).

Para determinar los posibles períodos y representar las curvas de luz hemos analizado las distintas mediciones con el programa A.V.E. (Análisis de Variabilidad Estelar) elaborado por Rafael Barberá, miembro del G.E.A. (Grupo de Estudios Astronómicos), empleado con éxito en otros estudios anteriores.

Al mecanizar las 28 mediciones de Osborn y Fuenmayor del año 1967, la campaña más completa, y analizarlas con este programa podemos apreciar (figura 2) que capturaron un máximo de menor brillo (ciclo corto) el DJH 2439663, un mínimo (DJH 2439679), una recuperación de brillo muy lenta y el inicio de un ciclo largo que la llevaría hasta un máximo de gran brillo (DJH 2439715) exactamente 36 días después del mínimo y 52 días después del máximo anterior de menor brillo. Al representar estas mismas mediciones con un período igual a 92.5 días (figura 3)

vemos que la curva de luz resultante presenta un curioso "máximo de menor brillo" poco antes de alcanzar de nuevo el mínimo: parece como si realmente se hubiesen producido dos pulsaciones en este período de tiempo en vez de únicamente una, como podríamos haber esperado.

Russev y Russeva (1979) volvieron a investigar sus oscilaciones de brillo concluyendo que de la forma de su curva de luz se podía decir que estaba sujeta a cambios cíclicos; el período determinado con anterioridad (91.77 días) correspondía en realidad al período fundamental, mientras que en su curva de luz podía verse el intercambio de roles entre los mínimos primario y secundario con un período de 2070 días (69 meses).

Welty (1985) midió el cúmulo en 64 placas fotográficas tomadas con un conjunto film + filtro próximo al sistema B y encontró que su período era igual a 41.55 días: prácticamente la mitad del medido por otros observadores anteriores; probablemente el reducido número de datos disponibles originó este resultado tan diferente de los demás.

Osborn (2000) publicó magnitudes B y V así como posiciones de 104 estrellas del cúmulo; en su fotometría la magnitud de esta estrella era igual a 11.95 V y 13.54 B, presentando un índice de color $B-V = 1.59$.

Kopacki et al. (2003) trabajaron con un reflector de 60 cm durante 23 noches en el año 2001 y obtuvieron una curva de luz (figura 4, arriba) con

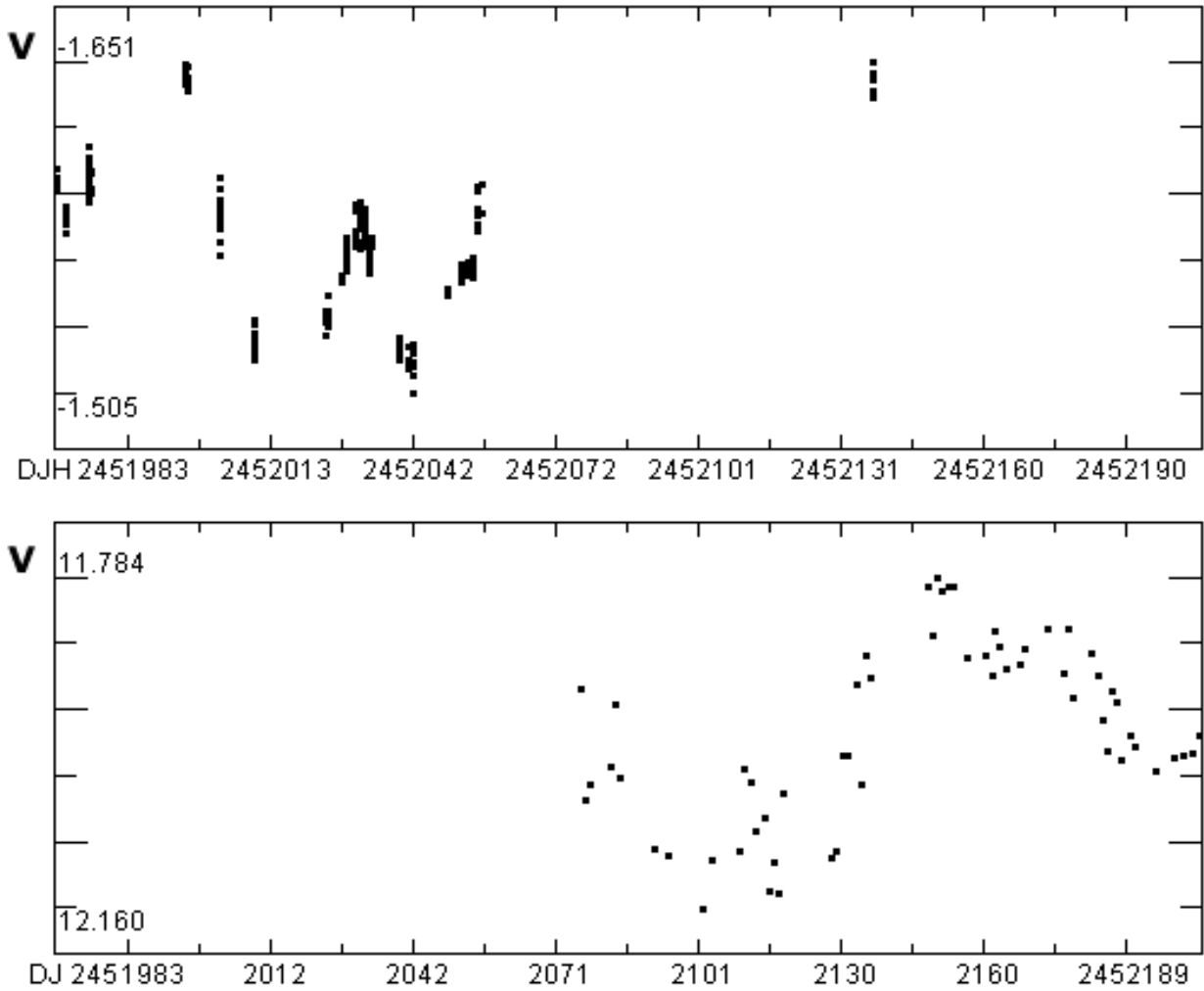
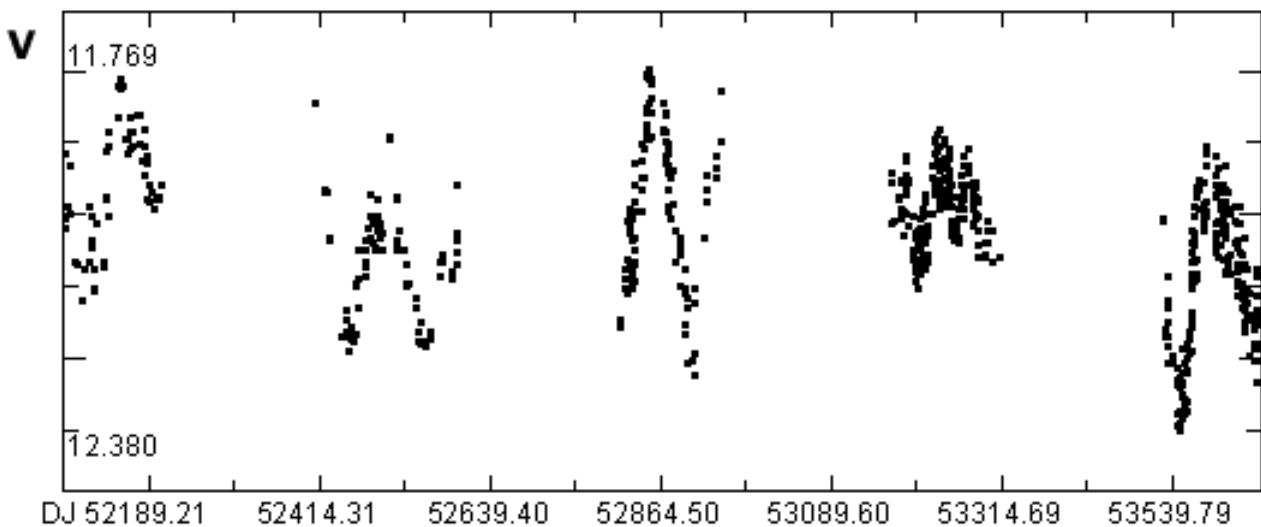


Figura 4. Curvas de luz obtenidas por Kopacki et al. (arriba) y Violat (abajo) en 2001: para poder compararlas han sido representadas en el mismo intervalo temporal (DJH 51968-52204); puede comprobarse que nuestras mediciones se iniciaron al final de la campaña de los observadores polacos. Pese a que nuestras magnitudes son instrumentales y las suyas magnitudes diferenciales (ambas en banda V), podemos notar que las observaciones de su última noche coinciden con las nuestras, y reflejan el ascenso de brillo de la estrella rumbo a un nuevo máximo. La curva de Violat es bastante parecida a la obtenida por Osborn y Fuenmayor en el año 1967.

Figura 5. Curva de luz de V11 obtenida de las 666 mediciones de Violat entre los años 2001 (izquierda) y 2005 (derecha): se aprecia claramente que en sus máximos no alcanza el mismo brillo y que la forma de la misma cambia de año en año.



652 mediciones en la cual registraron dos máximos: el primero de ellos, el DJ 51995, de mayor brillo que el segundo que midieron en torno al DJ 52031; de un mínimo al otro transcurrieron aproximadamente 37 días. Según estos investigadores su magnitud media fue igual a 11.928 V con una amplitud de sólo 0.13 magnitudes en banda V (aunque de sus mediciones originales se deduce una amplitud igual a 0.146 magnitudes).

Según sus resultados fotométricos osciló entre las magnitudes 11.863 y 11.993 (11.928 ± 0.065): de las 14 gigantes rojas medidas resultó tener el brillo medio más alto situándose por delante de V42 (11.940), V17 (11.976) o V39 (11.980).

El trabajo más reciente sobre fotometría de M13 es de 2004 (David, Jaureguiberry y Rondi, 2004): elaborado con el telescopio T60 (600 mm de abertura) de Pic du Midi y filtros B, V y R, la midieron con magnitud 11.92 V e índice de color $B-V = 1.53$ ($B = 13.45$).

A la vista de estos resultados podemos comprobar que V11 es muy especial e interesante: resulta ser la única variable roja del cúmulo con fuertes irregularidades en su curva de luz y máximos de distinta intensidad, lo que puede darnos información sobre los fenómenos nucleares y la fuerte inestabilidad que ocurre en su interior: ¿es posible que existan dos capas distintas, a diferente profundidad, que pulsen independientemente y produzcan la modulación observada?

Si la hipótesis de los Russev es cierta se preciaría una base observacional muy larga (en torno a 2100 días de fotometría, 70 meses) para apreciar claramente el cambio de los máximos, determinar correctamente la longitud de sus períodos de oscilación, comprobar la amplitud fotométrica máxima, registrar las modificaciones en la curva de luz y otros datos de interés. Esto obligaría a estudiar el cúmulo algo más de cinco años y medio con las únicas interrupciones impuestas por su proximidad al sol y posterior invisibilidad estacional: es evidente que este tipo de trabajo sólo puede ser realizado por observadores que dispongan de mucho tiempo, instrumental propio y un proyecto fotométrico de bastante o amplia duración.

Habiendo iniciado nuestro estudio en junio de 2001 (DJ 2.452.076) será el 15 de febrero de 2007 (DJ 2.454.146) cuando habremos cubierto este período de 2070 días, aunque será preciso esperar al final de esa campaña para poder extraer las primeras conclusiones válidas. En la figura 4, abajo, se representa la curva de luz obtenida en nuestra primera campaña fotométrica (2001) mientras que en la figura 5 podemos apreciar la forma de su curva de luz a lo largo de los años 2001, 2002, 2003, 2004 y 2005, tal como ha sido obtenida por Violat con 666 mediciones: podemos apreciar la cambiante forma de su curva de luz, la alternancia de sus máximos brillantes y menos brillantes (pese al período no observado por su proximidad al Sol o

a la meteorología local) así como la diferente longitud de sus pulsaciones. Al no disponer de un conjunto de datos similar (ningún otro observador ha trabajado durante tanto tiempo: Bennasar obtuvo mediciones en el período 2001-2002, Arranz en 2004-2005 y Díez sólo en 2005) no nos es posible comparar entre sí las curvas de luz obtenidas por más observadores.

La magnitud instrumental media que se extrae de estas mediciones —en el período 2001-2005— es igual a la 12.074; la diferencia con el valor obtenido por el grupo polaco es excesivamente grande: 0.146 magnitudes. Sin embargo cuando analizamos sólo los datos de la campaña de 2001, período en el que trabajaron también Kopacki y colaboradores, la magnitud instrumental media es ahora igual a la 11.972 (rango: 11.784—12.160) y la diferencia igual a 0.044 magnitudes: excelente resultado para ser nuestra primera campaña y carecer de experiencia fotométrica.

La figura 4 presenta las observaciones realizadas por ambos equipos: la curva superior (fotometría diferencial) corresponde a Kopacki y la inferior a Violat. Para que ambas fuesen comparables se han representado entre el DJH 51968 —inicio de la campaña de los astrónomos polacos— y el DJH 52204, que corresponde a la última noche observada por Violat; sólo hay una jornada en común (DJH 52137) por lo cual no podemos verificar del todo la exactitud de nuestras observaciones, aunque parece deducirse que las mediciones de esa noche apuntar a un incremento en su brillo: según nuestros datos la encontramos en un nuevo máximo once días más tarde.

Con la idea de medir y determinar los parámetros de V11 en nuestros primeros estudios (2001-2002) seguimos la estrella durante un período de 521 días (del DJ 2.452.076 al 2.452.596), y durante los mismos obtuvimos imágenes a lo largo de 129 noches (DJ 2.452.076 a 52.204) en 2001, en luz integral sin filtrar, y otras 189 noches (DJ 2.452.408 a 52.596) en la campaña de 2002 con filtros V Johnson. Estas primeras mediciones nos permitieron obtener sendas curvas de luz encontrando su período igual a 113.61 días (año 2001) y 108.31 días (2002), bastante mayor que el oficial. El valor obtenido utilizando conjuntamente todas las mediciones (2001 y 2002) fue igual a 114.184 días: totalmente inconsistente con el oficial; sí comprobamos fácilmente que el brillo de la estrella en sus máximos era distinto alternándose entre máximos brillantes y máximos de menor brillo: también notamos que el período transcurrido entre los mínimos tenía una duración distinta según el máximo fuese brillante o menos brillante. Para nosotros este comportamiento tan extraño podía explicarse de un modo muy sencillo: la estrella presentaba su menor brillo (mínimo) cuando se mostraba en su "estado de reposo" presentando entonces un radio (tamaño) mínimo; a medida que se hinchaba comenzaba a subir de brillo y alcan-

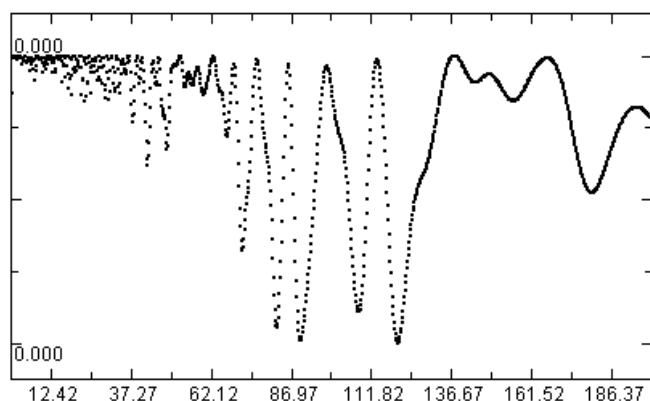


Figura 6. Periodograma de V11 obtenido utilizando 666 mediciones de Violat y trabajando en el intervalo 1-200 días: según el programa A.V.E. los dos períodos más probables son iguales a 90.9 y 121.1 días.

zaba un máximo cuando presentaba un tamaño mayor, volviendo a descender de brillo a medida que se reducía su diámetro. Cuanto mayor era el crecimiento (máximo de gran brillo) más tiempo necesitaba para volver al estado de reposo y viceversa: pulsaciones menores (máximo de menor brillo) presentaban períodos más cortos debido a que el crecimiento había sido más reducido.

Esta alternancia de máximo brillantes y menos brillantes, o alternancia del incremento del radio, podría explicarse por la superposición de dos períodos de pulsación distintos debidos a algún fenómeno físico interno (Violat, 2003).

Al analizar las 666 mediciones de Violat el periodograma obtenido en el intervalo 1-200 días (figura 6) apunta a dos períodos posibles: 90.91 y 120.14 días; sólo el primero de ellos es lo suficientemente próximo al oficial (91.77 días es el período de pulsación fundamental determinado por los Russev) como para poder considerarlo bueno, siendo la diferencia entre ellos igual a 0.86 días. Una prueba adicional para comprobar si es correcto o no es dibujar la curva de luz: al hacerlo así (figura 7) observamos que el resultado obtenido es bastante bueno, aunque al ser una estrella semirregular con máximos de distinto brillo se produce una gran dispersión en todo momento; pese a todo el conjunto de datos es coherente: el

período obtenido es correcto dentro de la precisión de nuestros equipos, técnicas y experiencias.

Como ya indicamos el análisis de las mediciones de Violat de las campañas de 2001 y 2002 ofrecieron valores algo mayores para su período: 113.61 días el primero y 108.31 días el segundo; los números obtenidos son similares a la longitud del período observado por lo cual es fácil deducir que el error se debe al "efecto estacional": la duración del período observado ha permitido cubrir apenas un ciclo de pulsación completo, lo que desorienta al software de análisis de datos.

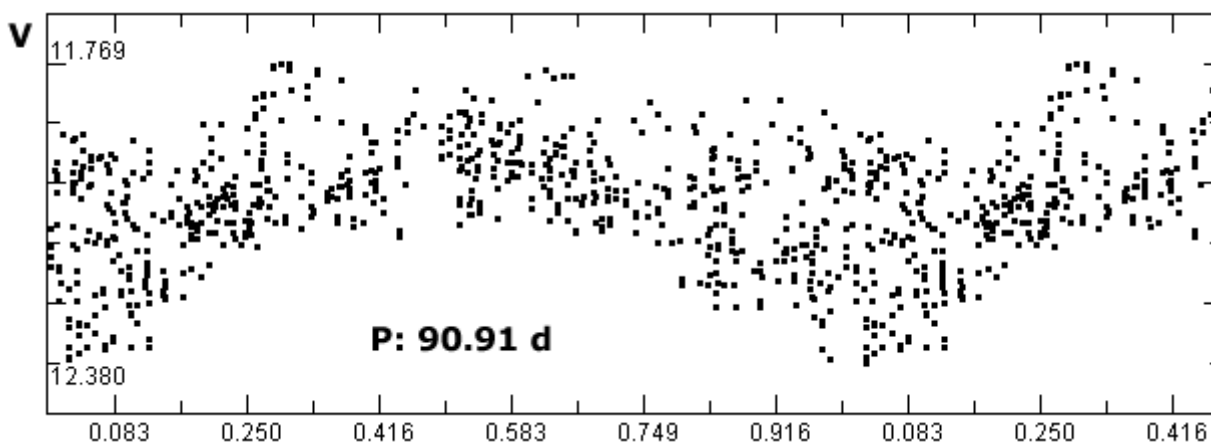
Si buscamos el período en el intervalo 1-2000 días se obtienen otros valores (por ejemplo 553 días), ninguno de los cuales llega a producir una curva de luz tan coherente como la que se obtiene con 90.91 días. Utilizando otros períodos (1/3, 1/4 ó 1/2 de 2070 días) no se obtiene ninguna curva de luz mínimamente buena: el valor determinado por los Russev no coincide con este conjunto de observaciones (aunque el período observado por Violat es inferior a 2070 días).

De nuestras medidas deducimos que su amplitud instrumental ha sido igual a de 0.611 magnitudes en banda V en el rango 11.769—12.380 como límites extremos, incluyendo el error aleatorio inherente a las medidas: excepto en una única campaña (2005), cuando Violat llegó a medirla en la magnitud 12.38, el resto del tiempo ha bajado como mucho hasta la magnitud 12.29 siendo su amplitud instrumental igual a 0.51 magnitudes.

Un tercer conjunto de datos analizados ha sido el de Kopacki et al., descargado de Internet; consta de un total de 652 mediciones en banda V representadas en una escala lumínica arbitraria.

El análisis de las mismas nos proporcionó dos períodos muy desiguales: uno corto igual a 51.22 días (que pudiera corresponder al ciclo de pulsación de menor duración) y otro largo igual a 81.5 días que, aunque se aproxima al período oficial, resulta ser en torno a 10 días más breve. Repre-

Figura 7. Curva de luz de V11 obtenida utilizando las mediciones de Violat ente los años 2001 y 2005 con un período de 90.91 días: el resultado es bastante bueno pese a la dispersión de las mediciones en sus máximos.



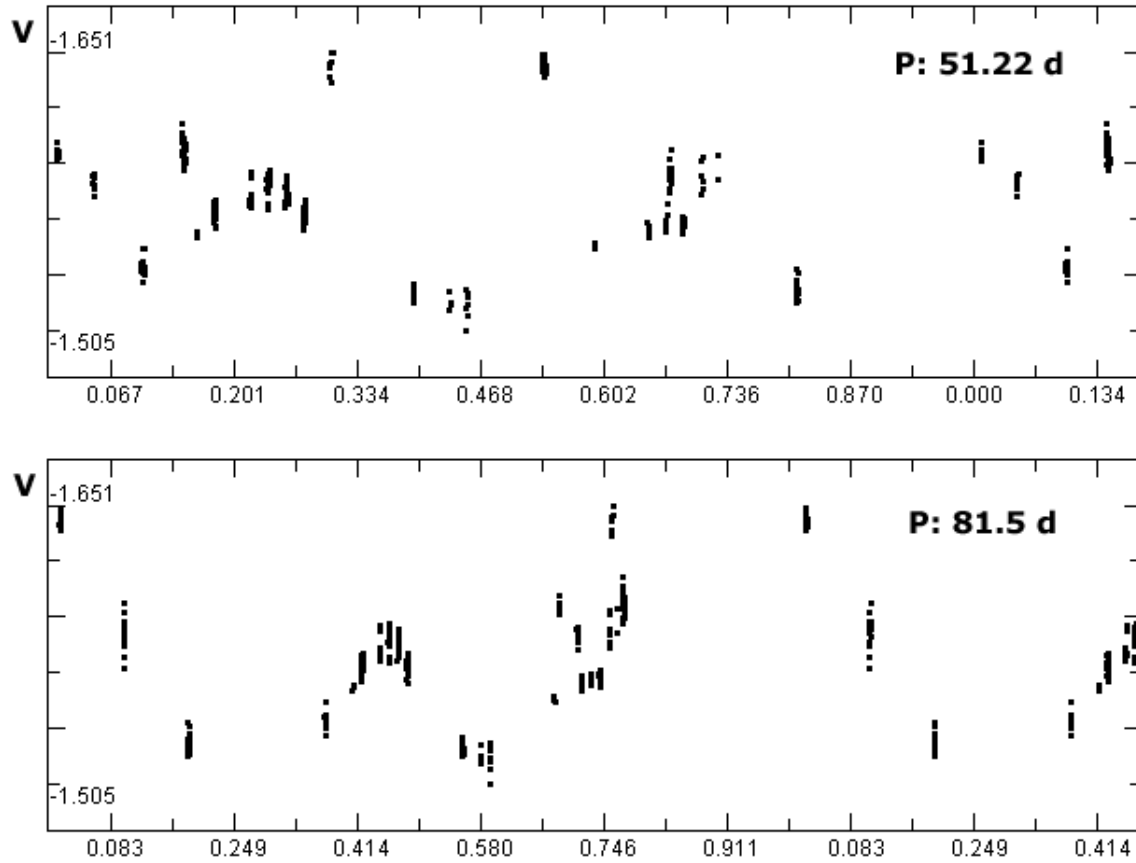


Figura 8. Curvas de luz de V11 obtenidas empleando las mediciones de Kopacki et al. de 2001 con un período igual a 51.22 días (arriba) y 81.5 días (abajo): puede comprobarse que mientras la superior no es demasiado coherente y presenta varios grupos de mediciones (tres noches) muy diferentes de las demás, la segunda es mucho más consistente en su conjunto.

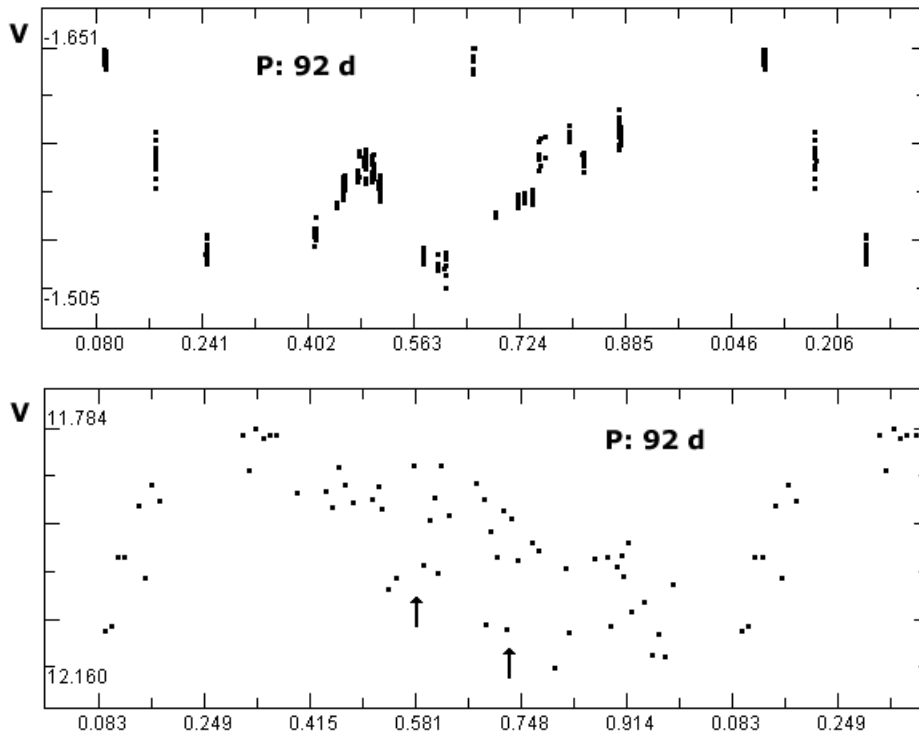


Figura 9. Curva de luz de V11 obtenida empleando las mediciones de Kopacki et al. de 2001 con un período de 92 días: hemos desplazado el origen de la misma para que el mínimo secundario caiga en la fase 0.5. Salvo las observaciones de una única noche, en torno a la fase 0.61, el resto de las mediciones son consistentes con este período. Puede apreciarse que aparecen dos máximos: uno de mayor brillo (no capturado, fase 0.0) y otro de menor brillo en torno a la fase 0.5 perfectamente representado a lo largo de siete noches de observación.

Figura 10. Curva de luz de V11 obtenida empleando las mediciones de Violat de 2001 con un período de 92 días: aunque la misma es bastante buena puede apreciarse el inicio de un segundo ciclo, marcado con flechas, que "corre" paralelo al resto de las mediciones. Al revés que en el caso anterior la recuperación de brillo es más rápida que la caída.

sentadas las curvas de luz con ambos (figura 8) comprobamos que ninguno de ellos producía un resultado aceptable ni con el período corto (figura 8, arriba) ni con el largo (figura 8, abajo). Al utilizar un período igual a 92 días (figura 9) se obtiene una curva de luz mucho más normal en la cual la dispersión es mínima: salvo una única noche (en torno a la fase 0.61) el resto de los datos son muy coherentes y presentan una dispersión muy reducida; con este período podemos apreciar dos máximos: el primero (no capturado) en la fase 0.0 y el segundo en la fase 0.5, capturado y representado perfectamente por las observaciones de siete noches consecutivas.

Es fácil deducir que V11 ha presentado, al menos durante el período observado, dos máximos de distinto brillo y diferente longitud; también podemos apreciar la asimetría de la curva de luz entre la fase 0.6 (que corresponde a un mínimo) y el máximo siguiente (fase 0.0): mientras que la caída de brillo fue rápida en su primer máximo (fase 0.0 a 0.3 aproximadamente) la recuperación desde el segundo mínimo (próximo a la fase 0.6) ha sido mucho más lenta. Sin embargo al comparar su nueva curva de luz ($P = 92$ días, figura 9) con la obtenida de los datos de Violat con el mismo período (figura 10) vemos que la recuperación de brillo tras el mínimo ha sido muy lenta para los polacos pero, contrariamente, extraordinariamente rápida para Violat y viceversa: la brusca caída de brillo tras el máximo capturada por Kopacki es completamente diferente a la lenta caída de magnitud registrada por Violat. Incluso con observaciones tan próximas en el tiempo (aunque no iguales ni comparables del todo por corresponder a máximos distintos), V11 mostró un comportamiento bastante anormal.

A inicios del año 2004 se nos unió al estudio

del cúmulo Teófilo Arranz Heras: instalado en Navas de Oro (Segovia), trabajó con un equipo similar al de Cáceres aunque de mayor abertura y focal (un catadióptrico de 355 mm, $f/10$) con una cámara Starlight Xpress y filtro V Jonhson. Al estudiar dos grupos de datos independientes podemos comparar la formas de las curvas de luz, la fecha de los máximos y mínimos así como amplitudes y períodos determinados de ellas.

En la figura 11 mostramos las curvas obtenidas por Violat (arriba) y Arranz (abajo) en 2004. Como en casos anteriores ambas se han representado en el mismo período temporal para que el lector pueda compararlas: las dos comienzan el DJ 53169 y terminan el DJ 53310, inicio y final de la campaña fotométrica por parte de Violat; al hacerlo así podemos comprobar que el máximo primario (o de mayor brillo) ha sido registrado en las mismas fechas aunque con magnitudes ligeramente distintas (11.87 y 11.73 respectivamente), seguido de una caída de brillo que conduce a un mínimo de poca profundidad y corta duración. Tras este breve bajón la variable inició una nueva recuperación en su magnitud que la condujo a un máximo secundario (de menor brillo) y poca duración, a partir del cual perdió intensidad calmadamente para alcanzar un mínimo menos profundo (12.09 y 12.06 respectivamente) casi al final de la campaña: las observaciones de Arranz muestran muy bien la recuperación inmediata tras este mínimo, algo que apenas se llega a adivinar en las de Violat y que apuntan a un nuevo máximo de brillo fuera ya del período observado.

Esta campaña fue verdaderamente interesante: a lo largo del período observado pudimos comprobar que la forma de la curva de luz no fue tan "regular" como podríamos esperar, mostrando un leve bajón después del máximo, una recuperación

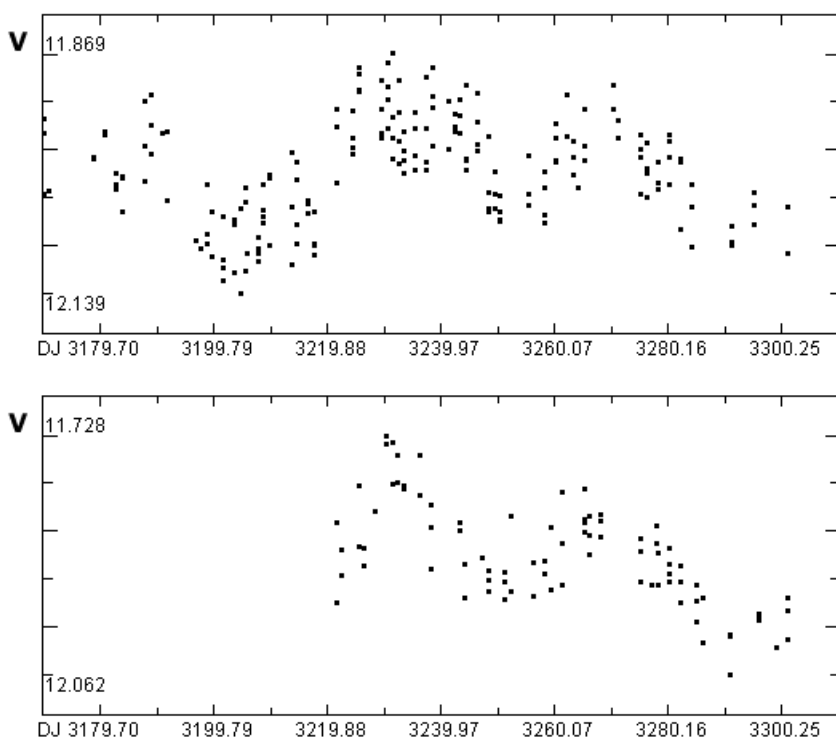


Figura 11. Curvas de luz de V11 obtenidas por Violat (arriba) y Arranz (abajo) durante la campaña fotométrica de 2004: para que sean comparables entre sí ambas comienzan el DJ 53169 y terminan el DJ 53310, inicio y final de la campaña fotométrica por parte de Violat. En la de este observador podemos apreciar una caída de brillo, un mínimo de gran profundidad (casi hasta la magnitud 12.14), una recuperación hasta el máximo (magnitud 11.89) y una nueva caída de brillo que la llevó a un mínimo de menor profundidad -del que se recuperó pronto- para subir a un máximo de menor brillo y corta duración, a partir de cual cae de nuevo de brillo hasta lo que parece un mínimo y el atisbo de una recuperación de brillo. La curva de Arranz, mucho más detallada en todo momento, registra perfectamente el máximo (magnitud 11.73), la caída hasta el mínimo de poca profundidad, la recuperación de brillo y la caída de brillo en la misma época que Violat, así como el inicio de la recuperación de brillo que se aprecia claramente al final.

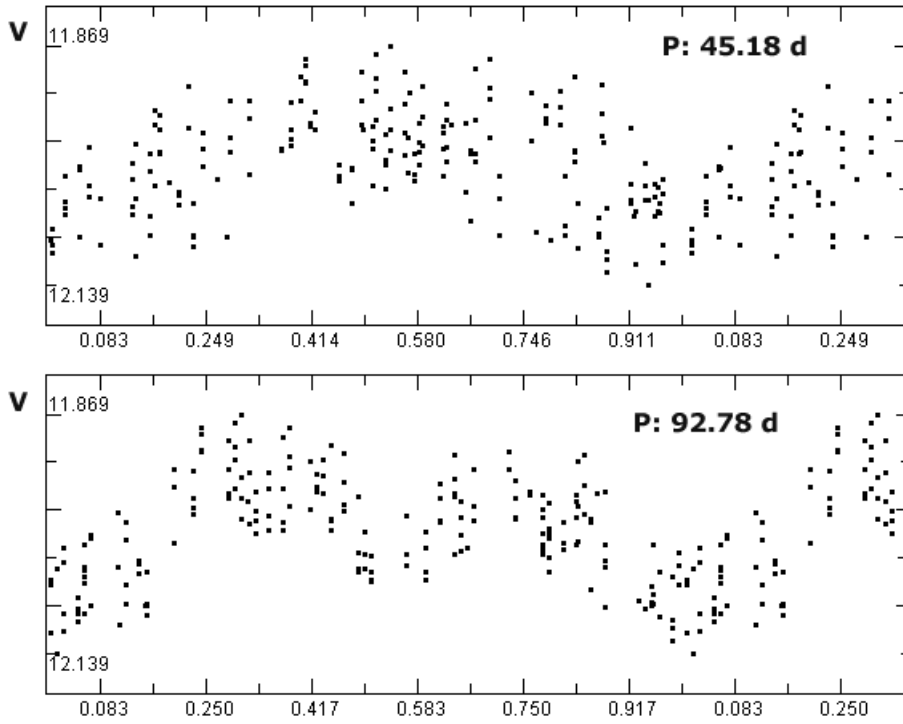


Figura 12. Curvas de luz obtenidas de las mediciones de Violat (año 2004) utilizando un período igual a 45.18 días (arriba) y 92.78 días (abajo): la curva superior, bastante buena, puede representar el período de pulsación más corto que es el que origina la modulación y los cambios en la forma de la misma; la curva inferior, de mayor calidad, es similar a la obtenida por Kopacki en 2001 y muestras dos máximos (aunque de distinta intensidad) durante una única campaña fotométrica.

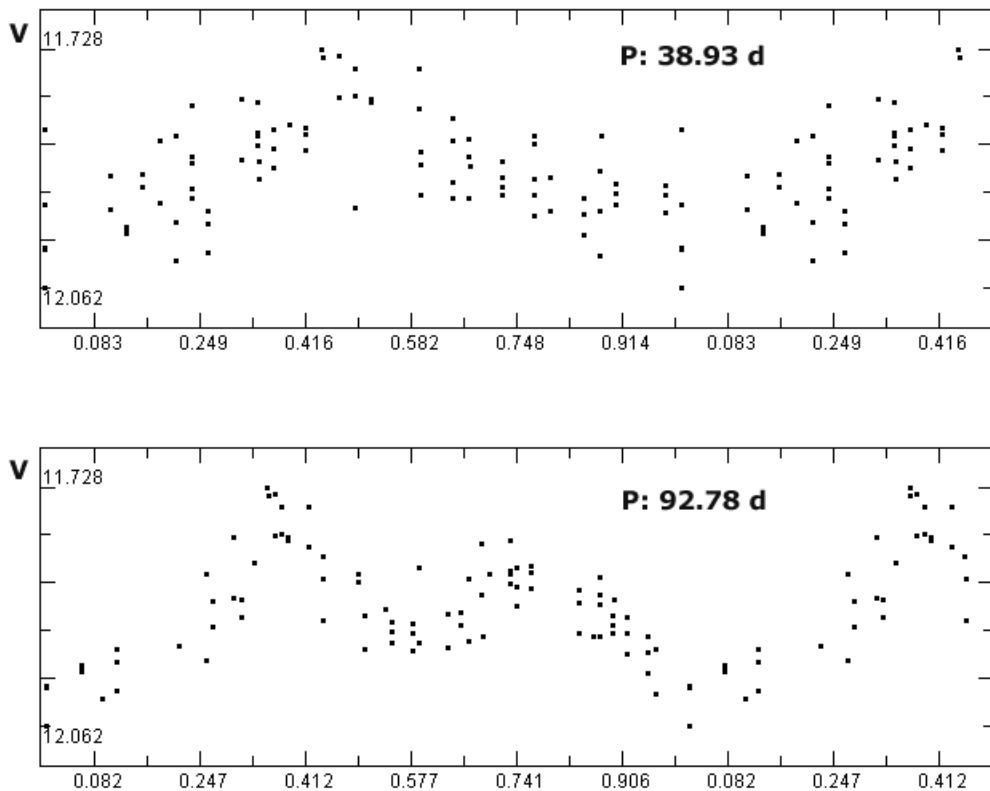


Figura 13. Curvas de luz obtenidas de las mediciones de Arranz (año 2004) utilizando un período igual a 38.93 días (arriba) y 92.78 días (abajo): en la curva superior, de buena calidad, sólo tres o cuatro puntos destacan por ser discordantes con el resto; la curva inferior, dibujada utilizando el mismo período que la de Violat, presenta una dispersión muy reducida y refleja perfectamente el comportamiento lumínico de la estrella (períodos levemente mayores o menores no muestran diferencia alguna). Puede comprobarse que ambas son prácticamente idénticas a las mostradas en la figura 12.

de brillo de menor fuerza y una pérdida de magnitud que la condujo a un mínimo menos profundo que el anterior.

El análisis de las mediciones nos permitió obtener todos los posibles períodos de oscilación: en el caso de Violat sus 195 puntos produjeron un valor muy marcado igual a 45.18 días que resultó ser demasiado corto, pero curiosamente similar al determinado por Welty en el año 1985 (41.55 días); la curva de brillo obtenida era medianamente buena pero mostraba una gran dispersión. El segundo período era igual a 92.78 días y producía una curva de luz (figura 12) de buena calidad en la cual podía apreciarse, como ocurrió en la curva de luz de los polacos (figura 9), el máximo de menor intensidad.

De las 88 mediciones de Arranz se extraía un único período igual a 38.93 días que, pese a cualquier suposición lógica (por ser demasiado corto), producía una buena curva de luz en la que únicamente tres o cuatro puntos destacaban de los demás por su dispersión. Representados estos datos con el mismo período que el determinado de los datos de Violat (92.78 días) comprobamos que producían una curva de luz prácticamente idéntica con una dispersión muy reducida; otros valores levemente mayores o menores no afectaban demasiado a su forma y precisión.

En la campaña de 2005 fueron tres los telescopios catadióptricos utilizados: el de 355 mm de Navas de Oro (Segovia), el de 203 mm instalado en Cáceres y el de 203 mm perteneciente a Alberto Díez Gago instalado en San Fernando (Cádiz): el equipamiento de los dos primeros fue similar al haber usado 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; todo esto ha permitido obtener resultados comparables muy similares.

En total se han computado 576 mediciones de brillo desglosadas así: 282 desde Segovia, 215 desde Cáceres y 79 desde Cádiz; en el primer caso se tomaron imágenes entre los Días Julianos 53534 y 53647 (114 noches), en el segundo entre el 53526 y 53652 (127 noches) y en el tercero entre el 53546 y el 53622 (77 noches).

La amplitud instrumental (suma de la amplitud real más el error aleatorio) medida por Arranz es igual a 0.630 magnitudes en el rango 11.716—12.346, la medida por Violat es igual a 0.483 magnitudes en el rango 11.897—12.380 y 0.575 magnitudes, en el rango 11.749—12.324, según Díez: en todos los casos la amplitud registrada ha sido muy superior a las 0.13 magnitudes medida por Kopacki y colaboradores en 2001. Pese a que el brillo en su máximo no aparece con igual intensidad (magnitudes 11.72, 11.90 y 11.75 según el observador) en su mínimo se ha registrado con brillos muy parecidos: magnitudes 12.35, 12.38 y 12.32 respectivamente; la magnitud media ha sido

igual a 12.03, 12.14 y 12.04 según Arranz, Violat y Díez en este orden.

La figura 14 presenta y compara entre sí las tres curvas de brillo obtenidas en la campaña: en esta ocasión hemos asistido a un único máximo, registrado perfectamente hacia la mitad de la campaña, seguido de una lenta caída de brillo que parece haber sido homogénea para Violat pero con una pequeña recuperación de brillo (*chichón*) para Arranz; un *micromínimo* puede apreciarse con claridad tras el máximo en las mediciones de este observador, fenómeno que está ausente (por no haber mediciones) en la curva de Violat* pero que parece adivinarse en la de Díez.

La mayor dispersión en las mediciones de Violat a partir del máximo se debió al mal funcionamiento de la montura, que terminó por fallar del todo al final de la campaña; en el caso de Díez este fenómeno se originó por la luz parásita reflejada en un muro próximo al telescopio.

El análisis de los distintos conjuntos de mediciones buscando el período en el intervalo 1-200 días dio como resultado los siguientes valores: 45.18 y 121.25 días (Arranz), 45.35 y 134.75 días (Violat) y 42.99 y 95.39 días (Díez). De estos resultados podemos extraer dos conclusiones muy claras: la primera de ellas es que vuelve a aparecer un período de pulsación corto en torno a los 43-45 días y la segunda es que en los datos de los observatorios con períodos de observación largos (Arranz y Violat) se produce el "error estacional" ya mencionado con anterioridad: donde deberíamos encontrar un período próximo a los 90 días encontramos un valor demasiado largo.

¿Es válido el período corto?: la respuesta es no; al representar las curvas de luz con ellos se obtienen dos curvas superpuestas, independientes la una de la otra, que evolucionan cada una por su lado y reflejan comportamientos distintos; esto ocurre con los tres conjuntos de datos y, por tanto, este período no puede ser correcto.

Al utilizar los períodos largos se obtienen curvas de luz totalmente coherentes que reflejan el comportamiento de la estrella a lo largo de todo el tiempo observado, pero no muestran la verdadera curva de luz con los puntos en fase. Nótese que los períodos largos determinados son muy próximo al número de noches observadas: 121.25 días Arranz (114 noches), 134.75 días Violat (127 noches) y 95.39 días Díez (88 noches observadas); la diferencia es de siete días en todos los casos.

¿Podemos determinar el período de la pulsación registrada por los observadores en 2005?, y si es así, ¿cuántos días ha durado? Una inspección visual a la curva de Díez nos muestra que el mínimo ocurrió en torno al DJ 53553 pero no hay datos del segundo mínimo, en la curva de Violat

*En esas fechas ambos observadores, Arranz y Violat, trabajaron conjuntamente en el observatorio de Segovia.

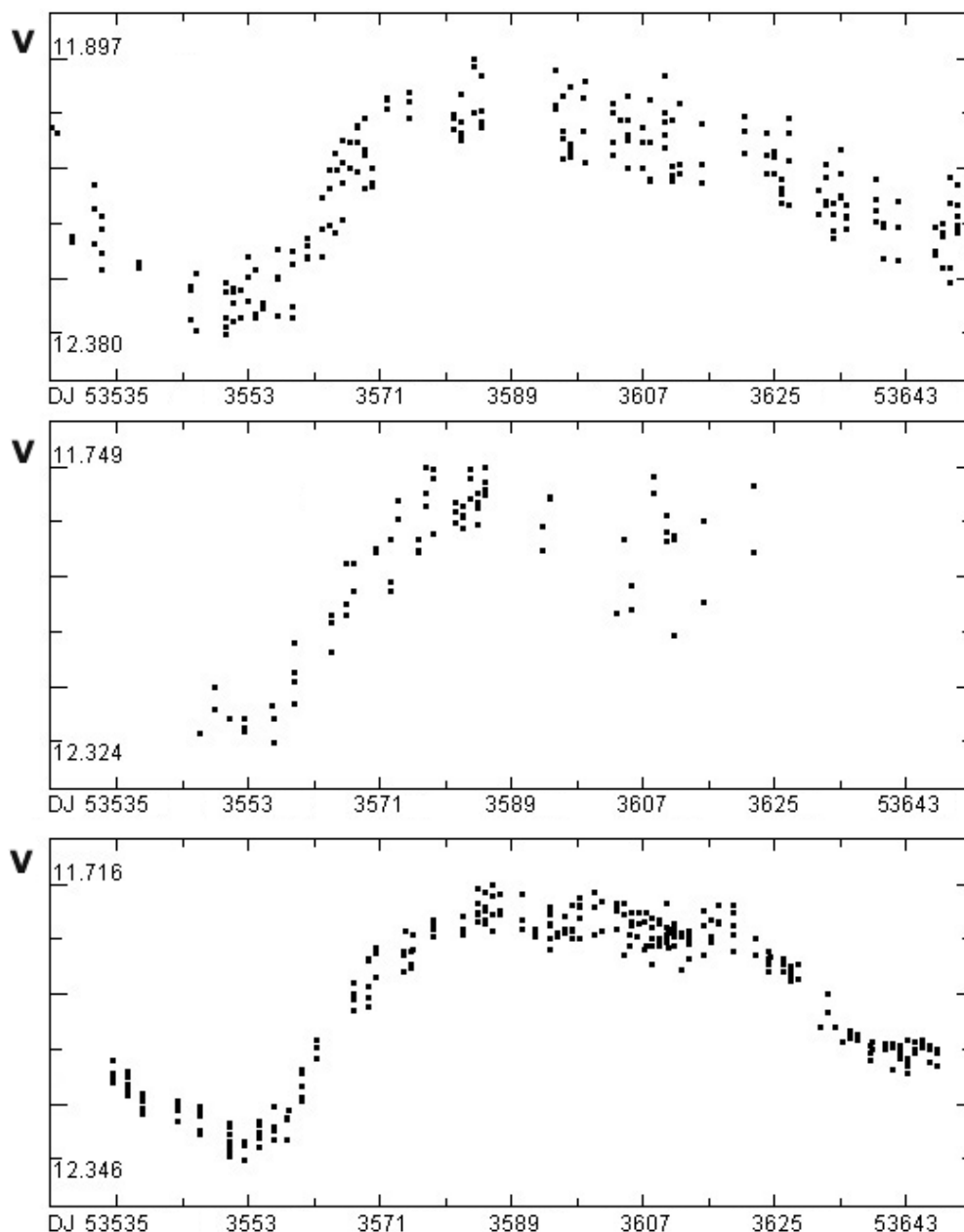


Figura 14. Curvas de luz obtenidas por Violat (arriba), Díez (centro) y Arranz (abajo) en la campaña fotométrica del año 2005: al igual que las anteriores las tres han sido representadas en el mismo intervalo temporal (DJ 53526 al 53652) para poder ser comparadas adecuadamente. Podemos comprobar que el mínimo (DJ 53553) coincide en los tres casos, el máximo está bien registrado por los observadores pero sólo uno de ellos (Arranz) ha podido medir un *micromínimo* en torno al DJ 53592, así como la posterior recuperación antes de la caída de brillo después del DJ 53615. La dispersión visible en la parte final de la curva de Violat se debió al mal funcionamiento (y posterior fallo) de la montura, mientras que en el caso de Díez estuvo originada por la presencia de un muro cercano que contaminó las imágenes con su luz dispersa.

se aprecia el mínimo casi en la misma época (DJ 53552) mientras que el siguiente mínimo, apenas marcado, aparece en torno al DJ 53646; finalmente en la precisa curva de Arranz se nota el mínimo primario el DJ 53552 y el siguiente mínimo (de menor profundidad) hacia el DJ 53643.

A la vista de estos datos podemos calcular de modo aproximado el tiempo que ha transcurrido entre ellos: 94 días según los datos de Violat y 91 según los de Arranz; ambos valores son muy similares al período oficial. Naturalmente la mitad de ambos números ($1/2 P$) es igual a 47 y 45 días, respectivamente, valores prácticamente idénticos

a los "períodos cortos" encontrado por el programa A.V.E. en ambos conjuntos de datos (45.18 y 45.35 días respectivamente).

¿Qué sucede si representamos las curvas de luz con un período igual a 92 días? El resultado lo tenemos en la figura 15: la curva superior, obtenida con las mediciones de Arranz, muestra claramente la forma de la misma así como la no coincidencia de las dos distintas pulsaciones registradas, fenómeno que apenas es visible en la curva de Violat; el examen visual de ambas pone de manifiesto que la rama ascendente ha sido más corta que la descendente, fenómeno similar al registrado por

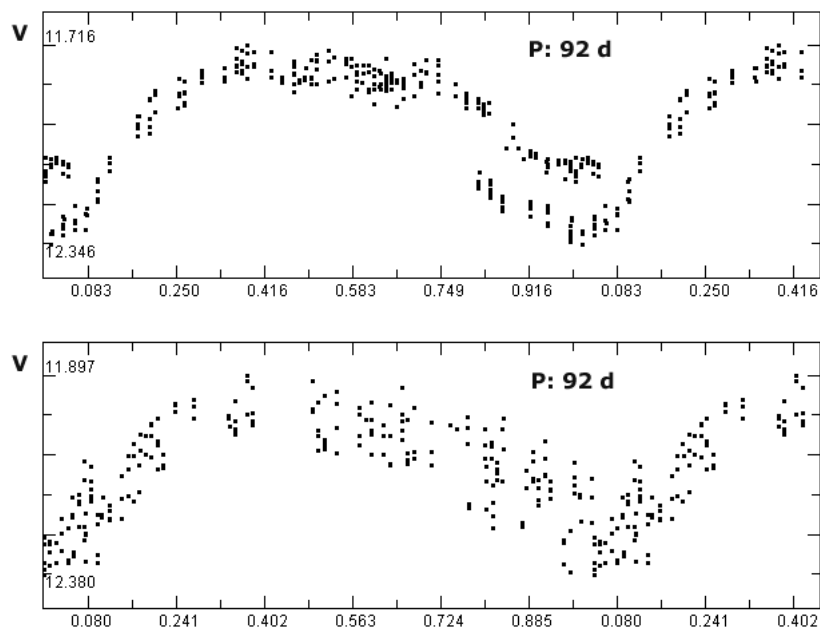


Figura 15. Curvas de luz obtenidas utilizando las mediciones de Arranz (arriba) y Violat (abajo) del año 2005 con un período igual a 92 días: en la primera de ellas es muy visible la no coincidencia entre las dos distintas pulsaciones registradas (fase 0.77 a 0.02), fenómeno que no es tan visible en la segunda.

Violat en la campaña de 2001 (figura 10) pero completamente diferente al plasmado por Kopacki y colegas ese mismo año (figura 9).

¿Cómo podemos explicarlo?: el análisis de la figura 5 puede ayudar; si nos fijamos en las tres últimas curvas de luz (años 2003, 2004 y 2005) comprobaremos que durante los períodos estudiados se aprecian dos máximos separados (2003), muy juntos (2004) y completamente unidos (2005): este fenómeno se nota perfectamente en los máximos de los años 2004 (figura 12) y 2005 (figura 14, abajo).

¿Qué estamos observando realmente?: a nuestro juicio vemos lo que ocurre cuando dos pulsaciones de longitudes casi iguales —en torno a 45 días— se aproximan (año 2003), casi se solapan (año 2004) y finalmente terminan por unirse (año 2005); el resultado es que contemplamos un único máximo, dos máximos muy próximos o incluso completamente solapados en un único máximo de longitud doble (90-92 días) que sólo muestran un *micromínimo* entre ellos.

El análisis de las mediciones de Arranz de los años 2004 y 2005 (370 puntos) sólo ofrece un único período, 115.68 días, que discrepa por completo de los demás períodos obtenidos y con el cual se obtiene una curva de brillo bastante coherente en su conjunto: realmente muestra una segunda curva muy corta superpuesta a la principal.

Sería interesante disponer de otro conjunto de datos independiente, de algún otro tipo que no sea fotométrico, para intentar comprobar cuál es realmente el período de pulsación de V11. Por fortuna ese tipo de datos existe: las velocidades radiales obtenidas de los espectrogramas.

Buscando en los artículos disponibles en Internet, especialmente en los servidores NASA ADS y la base de datos SIMBAD, encontramos distintos trabajos con velocidades radiales. Ya mencio-

TABLA I
VELOCIDADES RADIALES DE V11

DJH	VR (km s ⁻¹)	Espectro
2,430,546.809	-251	G8
2,430,895.922	-260	G5
2,430,945.715	-266	G5
2,431,601.924	-241	K0
2,432,346.729	-234	G5
2,432,697.903	-290	G8
2,432,716.851	-270	G5
2,432,749.736	-246	G5

namos anteriormente las ocho velocidades radiales ofrecidas por Joy (1949), que mostramos en la Tabla I y representamos en la figura 16; mecanizándolas sería posible obtener de ellas un período aproximado y, con éste, dibujar una curva de velocidades radiales. Analizadas con A.V.E. en el intervalo 1-200 días, como si fuesen mediciones fotométricas corrientes, encontramos un único período igual a 96.14 días: al representar la curva de velocidades radiales con dicho valor obtuvimos una curva completamente coherente con las mediciones (figura 17) que resultaba ser aproximadamente de 4 a 5 días más larga que la obtenida de los datos fotométricos del período 2001-2005; la diferencia temporal entre las mediciones radiales y las fotométricas es de varios decenios, por lo que no podemos asegurar que el período se haya acertado desde entonces.

Sin embargo utilizando un conjunto más moderno de velocidades radiales, algunos de los cuales han sido empleados en artículos anteriores, podríamos obtener un nuevo período y comparar ambos entre sí. En la Tabla II ofrecemos las doce velocidades radiales obtenidas de diferentes estudios y trabajos sobre gigantes rojas de M13; las

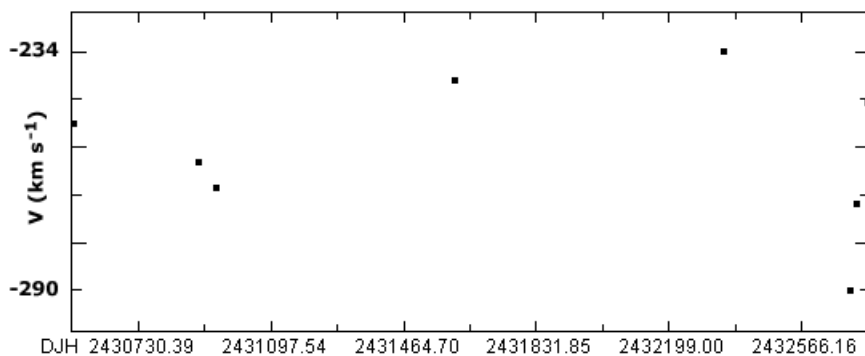


Figura 16. Las ocho velocidades radiales medidas por Joy en 1949: el rango de oscilación varía entre -234 y -290 km s⁻¹.

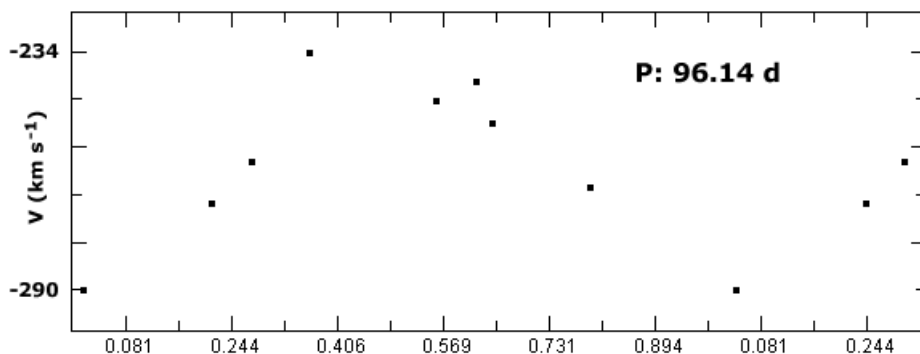


Figura 17. Curva de velocidades radiales obtenida utilizando las mediciones de Joy con un período igual a 96.14 días: pese a que sólo contiene ocho puntos puede apreciarse claramente la forma de la misma, muy similar a la obtenida de los otros datos fotométricos.

referencias citadas son: a: Lupton et al., 1987; b: Shetrone, 1994; c: Lyons et al., 1996; d: Soderberg et al., 1999, y d: Pilachowski et al., 2000. El análisis de estos nuevos datos produjo un único período igual a 96.90 días que no sólo era prácticamente idéntico al obtenido de los datos anteriores, sino que dibujaban una buena curva de velocidades radiales (figura 18); sin embargo al unir las 20 mediciones en un único grupo y analizarlo como tal descubrimos que no era posible obtener una buena curva con ninguno de los dos: la dispersión de los datos era excesiva en todo momento. Por tanteo encontramos que al utilizar el valor $P = 96.50$ días de obtenía una curva de velocidades radiales bastante buena (figura 19) en la que únicamente un punto (curiosamente la medición más reciente de las recopiladas), señalado con una flecha, aparecía completamente discordante con el resto pese a que los dos grupos de mediciones diferían entre sí más de 50 años.

Este resultado tan inesperado demuestra, una vez más, que V11 pulsa con períodos distintos en ciclos diferentes; de la misma manera que las mediciones fotométricas no pueden superponerse cómodamente al utilizar un único período, ya que al

TABLA II
VELOCIDADES RADIALES DE V11

DJH	VR (km s ⁻¹)	Referencia
2,441,073.	-246.61 ± 0.70	a
2,442,968.	-244.09 ± 0.66	a
2,444,030.	-245.86 ± 0.50	a
2,444,416.	-244.38 ± 0.49	a
2,444,417.	-244.46 ± 0.45	a
2,448,793.776	-246.5 ± 0.3	b
2,449,137.7813	-242.01	c
2,449,137.8327	-241.78	c
2,449,137.8774	-240.75	c
2,449,137.6848	-241.52	c
2,449,137.7363	-241.90	c
2,451,330.8613	-247.31 ± 0.36	d

hacerlo así la dispersión es grande e incluso aparecen "curvas paralelas", las mediciones de velocidad radial no pueden representarse con un período único bien sea el obtenido de los valores más antiguo o de los modernos: sólo empleando un período intermedio de compromiso y eliminando al-

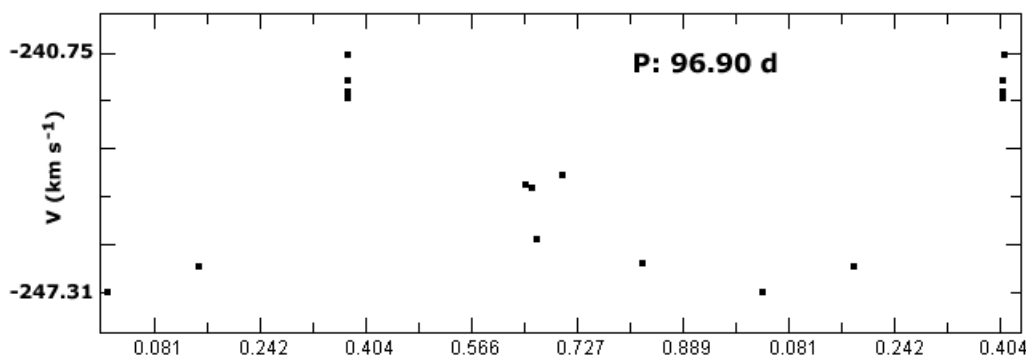


Figura 18. Curva de velocidades radiales obtenida utilizando las doce mediciones modernas con un período igual a 96.90 días.

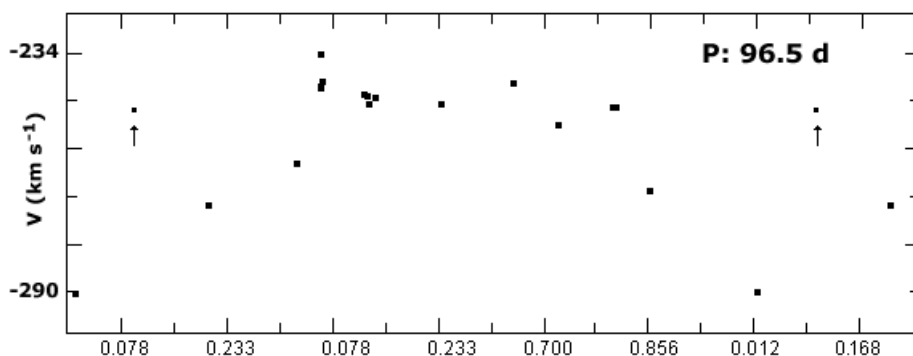


Figura 19. Curva de velocidades radiales de V11: se han utilizado las veinte mediciones con un período de 96.5 días; excepto un punto, marcado, el resto es bastante consistente con dicho período pese a la enorme diferencia temporal existente entre los distintos grupos de mediciones

gunas mediciones (pocas) podemos obtener una buena coincidencia entre todos los puntos que representan una curva bastante coherente.

CONCLUSIONES

Hemos realizado mediciones fotométricas de la variable V11 en el período 2001-2005: uno de los telescopios empleado (Violat, 203 mm de abertura en Cáceres) ha obtenido datos en las cinco campañas de observación; los restantes instrumentos utilizados (Bennasar, 305 mm en Mallorca; Arranz, 355 mm en Segovia y Díez, 203 mm en Cádiz) han obtenido datos durante como máximo dos campañas (2001 y 2002 Bennasar, 2004 y 2005 Arranz) por lo que sólo podemos analizar de modo homogéneo un grupo de mediciones.

El análisis visual de las cinco curvas de luz obtenidas por Violat (2001-2005) pone de manifiesto que sus máximos son de diferente brillo, su forma cambia de aspecto de ciclo en ciclo y la longitud de los mismos es de desigual duración. Este mismo fenómeno se aprecia con mayor claridad y definición en las curvas de Arranz (2004 y 2005), cuya menor dispersión permite observar pequeñas alteraciones (un *micromínimo* y un *chichón*) en el seno de las misma. Es evidente que estamos ante una estrella semirregular afectada por alteraciones en su período de pulsación.

De nuestras mediciones obtenemos un período largo entre 90.9 y 92.78 días según los datos que se utilicen; el período corto tiene una duración prácticamente igual a 45 días. Al obtener curvas de luz con datos de varias campañas distintas se obtiene un resultado no muy coherente, en el que pueden apreciarse curvas de distinta forma (intensidad de brillo) que no se superponen del todo y son debidas a la modulación y cambios en la forma de las mismas de un ciclo a otro.

La amplitud (instrumental) máxima medida por nosotros en banda V es igual a 0.63 magnitudes (Arranz, 2004) y 0.61 magnitudes (Violat, 2001-2005); la amplitud real es levemente inferior: de 0.4 a 0.5 magnitudes.

Al analizar los datos fotométricos de Osborn y

Fuenmayor y Kopacki et al. obtenidos en dos épocas muy separadas en el tiempo (1967-1969 y 2001 respectivamente) y con filtros distintos (B y V Johnson respectivamente) se pueden extraer las mismas conclusiones: la estrella presenta máximos de brillo intensos y menos intensos alternos, con ciclos cortos (de 36 a 46 días) y ciclos largos (en torno a 91-93 días) que interfieren entre sí modulando y modificando la curva de luz: de este modo se producen *chichones*, *micromínimos* tras un máximo intenso y otros fenómenos similares muy evidentes.

La magnitud media y amplitud obtenida con mediciones de una única campaña, o con escasos datos mal muestreados, son diferentes según se capturen máximos brillantes o menos brillantes.

Por otro lado al analizar dos conjuntos de mediciones de velocidad radial, uno antiguo de Joy (1949, ocho mediciones) y otro más moderno de distintos investigadores (1987-2000, doce mediciones), obtenemos dos períodos de pulsación distintos iguales a 96.14 y 96.90 días respectivamente; cada grupo de datos produce una curva de velocidades consiste con los períodos obtenidos, pero al analizar conjuntamente las veinte mediciones sólo se obtiene una curva válida cuando este período es igual a 96.5 días. Encontramos una diferencia de 4-5 días entre los períodos determinados de las distintas mediciones fotométricas (tres conjuntos de datos de épocas diferentes) y los obtenidos de las velocidades radiales (dos conjuntos de datos muy separados en el tiempo): desconocemos el origen de esta diferencia que sólo puede achacarse a la propia estrella.

Necesitamos nuevas observaciones fotométricas durante, al menos, una campaña más (2006) para intentar comprobar la hipótesis de los Russev: el cambio de roles entre los máximos primario y secundario con un período de 2070 días.

Observatorio Astronómico de Cáceres. Cáceres (España), 21 de marzo de 2006.

REFERENCIAS

EN INTERNET

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

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>

Demers, S., 1971, AJ, 76, 445

Joy, A., 1949, ApJ, 110, 105

Kadla, Z. I., 1966, Izv. Glav. Astron. Obs., 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

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

Osborn, W., Fuenmayor, F., 1977, AJ, 82, 395

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

Pike, C. D., Meston, C. J., 1977, MNRAS, 180, 613

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

Russev, R. M., 1973, Peremennye Zvezdy, 19, 181

Russev, R. M., Russeva, T., 1979, IBVS 1624

Sawyer, H. B., 1940, Publ. David Dunlap Obs., Vol. 1, 181

Sawyer, H. B., 1942, Publ. David Dunlap Obs., Vol. 1, 231

Sawyer, H. B., 1955, Publ. David Dunlap Obs., Vol. 2, 35

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

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

Violat Bordonau, F., 2003, Bulletin de l'Association Française des Observateurs d'Étoiles Variables

Violat Bordonau, F., 2004, web Casanchi:

http://personales.ya.com/casanchi/ast/M13_200402.pdf

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 V11 en SIMBAD:

CI* NGC 6205 SAW V11

Mediciones originales de Kopacki et al:

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

Etoiles variables céphéides dans M13: V2 et V6 (et V11), Violat Bordonau, F. (2003):

adsabs.harvard.edu/abs/2003AFOEV.103...14V

Variables en M13. Campaña 2004: Variables Rojas (I), Violat Bordonau, F. (2004):

http://personales.ya.com/casanchi/ast/M13_200402.pdf