

ESTUDIO FOTOMÉTRICO DE LA VARIABLE ALGÓLIDA BD +36 3317 (CAMPAÑAS 2009-2010)

FRANCISCO VIOLAT BORDONAU

Asesores Astronómicos Cacereños – Agrupación Astronómica de Cádiz

Resumen. Hemos obtenido fotometría en banda V Johnson de la estrella variable algólida BD +36 3317, situada en el cúmulo abierto Stephenson 1, en dos campañas fotométricas realizadas en los años 2009 y 2010. Los nuevos datos confirman nuestros resultados fotométricos, publicados en trabajos anteriores (años 2008 a 2012), a la vez que muestran que el eclipse secundario es total y no parcial; estos resultados se comparan con los publicados por un equipo profesional, en julio de 2012, según los cuales el sistema está formado por una estrella de tipo espectral B9-A0 y otra A8, masas M_1 y M_2 iguales a 2.5 y 1.6 del Sol e inclinación orbital $i = 89.61^\circ$ situadas a una distancia de 353 pc, similares a los que publicamos en febrero de 2012 (A_0 y A_9 , $M_1 = 2.1$ y $M_2 = 1.5$ del Sol, $i = 86.8^\circ$ a 373 pc).

1. Introducción.

El cúmulo abierto Stephenson 1 (Stephenson, 1959) es un conjunto de jóvenes estrellas situadas en torno a la variable Delta2 Lyrae que venimos observando y midiendo fotométricamente desde el año 2006 con un doble propósito: intentar descubrir alguna nueva variable y, en caso de conseguirlo, determinar sus parámetros; ambos fueron alcanzados cuando descubrimos la nueva variable eclipsante BD +36 3317 cuyo período encontramos igual a 4.30216 días (Violat y Violat, 2007). Los datos fotométricos obtenidos en la campaña de 2006, entre los días 14 de octubre y 10 de diciembre, nos permitieron descubrir la variable clasificándola como una Algólida¹; los obtenidos en la campaña de 2007 fueron dados a conocer a través del *International Bulletin on Variable Stars* (IBVS), más concretamente a través de los “Reports on New Discoveries” (siendo el nuestro el número 6, de fecha siete de enero de 2008), momento a partir del cual la comunidad internacional tuvo acceso a la información que obtuvimos: identificación de la estrella, tipo de variabilidad, curva de luz, mediciones fotométricas en banda V Johnson, profundidad de los eclipses, período orbital e instante del mínimo primario a partir del cual se podrían determinar los siguientes mínimos primario (I) y secundario (II). Con posterioridad (mayo de 2009) publicamos un amplio trabajo fotométrico sobre la variable mostrando sus eclipses en detalle y remidiendo el período de oscilación, que encontramos igual a 4.30216 ± 0.00002 días (103.25184 horas); finalmente en febrero de 2012 defendimos nuestro Trabajo Fin de Máster titulado “Estudio fotométrico y espectroscópico del cúmulo abierto Stephenson 1”, presentado en la Universidad Internacional Valenciana para obtener el título de *Máster de Astronomía y Astrofísica*, en el cual evaluamos su distancia en torno a los 373 pc (perteneciendo, por tanto, al cúmulo), su edad (56 millones de años) y otros parámetros físicos y orbitales que luego expondremos en detalle, los cuales pueden consultarse en dicho trabajo² y compararse con los de la base de datos WEBDA de cúmulos estelares abiertos.

2. Observaciones.

Para determinar los parámetros fotométricos y físicos del sistema binario eclipsante hemos observado el cúmulo en cinco campañas fotométricas entre los años 2006 y 2010 utilizando distintos instrumentos: en la campaña de 2007 empleamos el mismo telescopio usado en 2006, un

1 Desde agosto de 2009 denominada VSX J185422.2+365107 por la AAVSO.

2 En este trabajo no pudimos utilizar las imágenes adquiridas en las campañas de los años 2009 y 2010 ya que, al ser tan numerosas, no tuvimos tiempo de extraer de ellas mediciones fotométricas.

catadióptrico de 203 mm de abertura y 2000 mm de focal ubicado en Cáceres, mientras que en la de 2008 fueron dos aparatos distintos con la misma CCD y rueda de filtros: por un lado, al comienzo de la campaña (desde el 20 de junio), el catadióptrico de 254 mm de diámetro y 2500 mm de focal del Observatorio de La Sagra (Granada) y desde el 1 de octubre el telescopio de las campañas anteriores ya descrito; las observaciones se efectuaron entre el 20 de junio y el 19 de diciembre de 2008 llegando a obtener un total de 843 mediciones fotométricas de la variable. Las campañas de los años 2009 y 2010, por último, fueron realizadas desde el Observatorio Astronómico de Forcarei (Pontevedra), que pusimos en marcha el día 14 de marzo de 2009 para la Fundación FC³ (*Ceo, Ciencia e Cultura*): las mismas se extendieron entre los días 12 de mayo y 16 de septiembre de 2009 por un lado y del 16 de junio al 31 de julio de 2010 por otro, obteniendo 315 mediciones en la primera campaña y 356 en la segunda lo que arroja un total de 671 mediciones fotométricas. La Tabla 1 presenta el diario de observaciones.

Tabla 1
Noches observadas

<u>2009</u>	<u>2010</u>
Mayo: 12, 17, 18, 19, 27, 28 y 31	Junio: 16, 18, 20, 21, 22, 29 y 30
Junio: 1 y 17	Julio: 1, 4, 5, 6, 9, 10, 16, 18, 26,
Agosto: 10, 18, 21, 29 y 30	27, 28, 29 y 31
Septiembre: 6, 7, 11 y 16	

Tal y como podemos apreciar la campaña más amplia fue la del año 2009 ya que se extendió entre los meses de mayo y septiembre, con un total de 18 noches distintas, mientras que la del año 2010 fue más breve, aprovechando para ello los meses de verano, aunque pudimos trabajar durante 20 noches diferentes. En la medida de lo posible intentamos observar el mayor número de sesiones y noche a noche aunque esto, debido a la meteorología local del observatorio (ubicado en Galicia³), no fue posible siempre: en el mejor de los casos se lograron adquirir imágenes durante tres noches consecutivas en mayo de 2009, junio y julio de 2010 obteniéndose con ello una cobertura bastante completa de la curva de luz de la variable, especialmente en torno al eclipse primario, aunque no ocurrió lo mismo con el secundario. Su cercanía al Océano Atlántico afectó a la calidad de las imágenes obtenidas, produciendo diferencias notables de noche en noche tanto en la magnitud límite obtenida como en el *seeing*, como mostraremos más adelante: es por ello que la calidad de las mediciones fotométricas obtenidas se ha resentido bastante, si tomamos como modelo las obtenidas desde el Observatorio Astronómico de Cáceres en los años 2006-2008 y 2011-2012.

3. Instrumentación.

Las campañas fotométricas de los años 2009 y 2010 se han llevado a cabo utilizando un reflector Ritchey-Chrétien de 51 cm de diámetro y 4100 mm de focal (f/8.0) al que se conectó una cámara CCD modelo SBIG STL-11000, de 4008 x 2672 píxeles cuadrados (de 9 micras de lado), con electrónica de 16 bits y rueda portafiltros con filtro V Johnson, trabajando a una temperatura próxima a los -30° C. El gran tamaño del chip y el haber trabajado a foco primario ha permitido capturar un campo de visión igual a 30.5' x 20.3' con una resolución teórica de 0.46"/píxel, aunque el equipo obtenía habitualmente un *seeing* de entre 1.3" y 1.5" salvo en noches no fotométricas.

³ Situado a unos tres kilómetros a las afueras de Forcarei (Pontevedra), en la posición 42° 36' 41.3" N y 08° 22' 09" W, dista poco más de 30 km, en línea recta, del Océano Atlántico.

Como es habitual en cualquier centro profesional todas las imágenes (adquiridas por el propio autor) fueron tratadas adecuadamente de *bias*, *darks* y *flats* maestros (promedio de 25 distintos) empleando el propio programa de adquisición y tratamiento de imágenes de la cámara.

4. Estrellas estudiadas.

Como en campañas anteriores hemos querido aprovechar el gran número de estrellas que aparecen en las imágenes CCD para buscar en ellas nuevas estrellas variables; en esta ocasión hemos centrado nuestra atención en la parte más interna del cúmulo utilizando como referencia la estrella anaranjada BD +36 3312 (magnitud 8.69 *V*, espectro K0 III según SIMBAD), rotulada como *Var-5* en la Figura 1, alrededor de la cual hemos medido diez astros –nominados en la misma como *Var-1* a *Var-10*– en busca de variabilidad, incluyendo también la binaria eclipsante BD +36 3317 (*Var-1*). La figura, elaborada a partir de una imagen tomada por el autor el 31 de julio de 2010 en banda *V*, muestra parte del cúmulo sobre la que se han identificado, con números, las diez estrellas estudiadas; la rotulada como 8.66, situada a la derecha del campo, es la que hemos empleado como estrella de comparación (de magnitud 8.66 *V*) mientras que las diez estrellas estudiadas han servido como astros de chequeo observando, para ello, el comportamiento fotométrico de las mismas a lo largo del tiempo: sólo las variables reales presentarán desviaciones estándar elevadas y de las mediciones fotométricas obtenidas será posible elaborar curvas de luz (una vez determinado el posible período de variación) mientras que las no variables, como es lógico, han de mostrar curvas de luz completamente rectas a lo largo del tiempo y desviaciones estándar más reducidas.

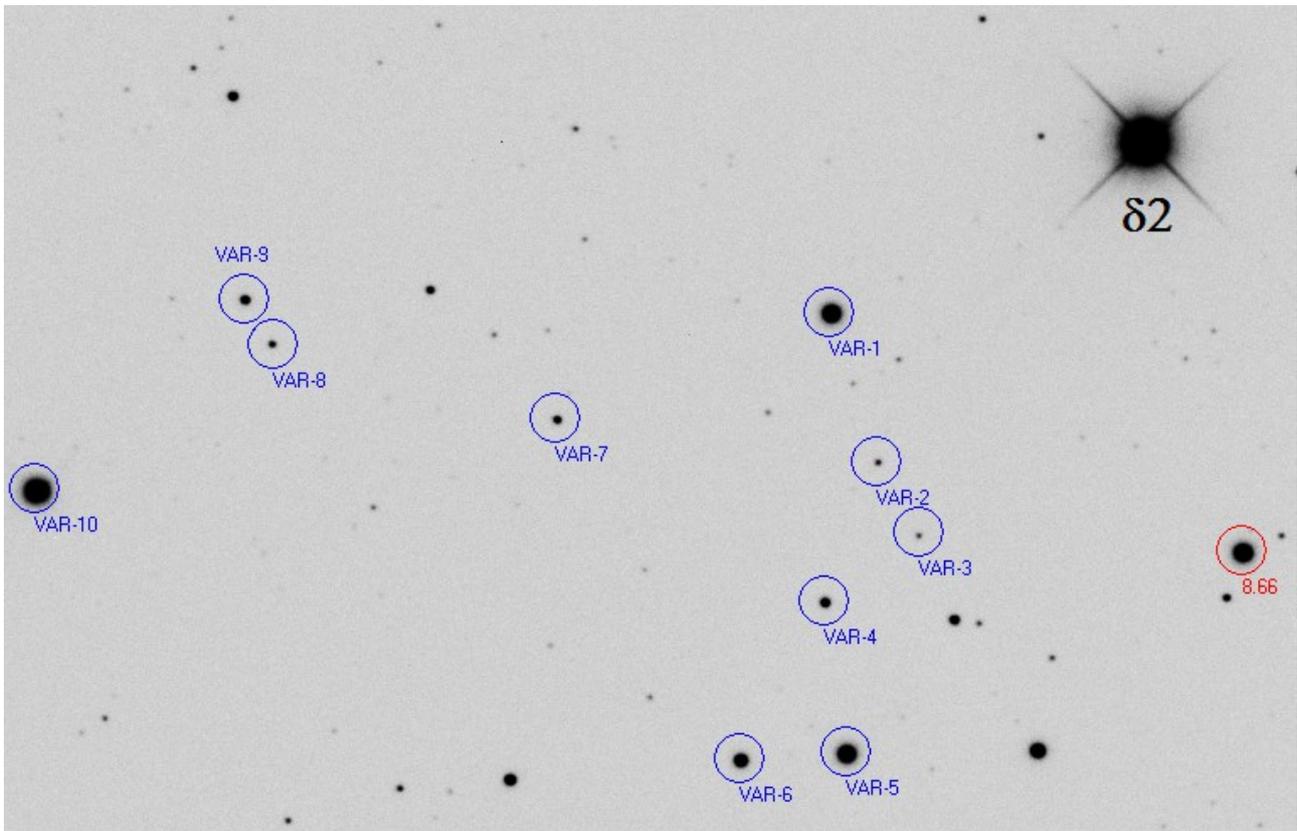


Figura 1. Imagen CCD de la zona central de cúmulo en la que se han identificado las diez estrellas estudiadas en nuestro trabajo: la estrella de comparación aparece rotulada con su magnitud (8.66 *V*); norte a la derecha y este arriba. (Francisco Violat Bordonau, Observatorio Astronómico de Forcarei, Fundación FC³).

Las denominaciones BD, el número y magnitudes V obtenidas por Bronkalla (Bronkalla, 1963) y el número y magnitudes V del GSC2.3 Catalogue aparecen en la Tabla 2:

Tabla 2
Identificación y magnitudes V de las estrellas estudiadas

Número	BD +36	Bronkalla	V	ID GSC2.3	V
1	3317		8.79	N2DV066410	8.80
2				N2DV000545	13.57
3				N2DV000542	14.14
4		40	11.85	N2DV000571	11.79
5	3312			N2DV057572	8.73
6	3310			N2DV000554	10.30
7		46	12.64	N2DV000568	12.64
8		49	13.20	N2DV000577	13.24
9		50	12.11	N2DV000578	12.16
10	3315		7.64	N2DV057412	7.63
Comparacion	3314		8.66	N2DV065937	8.65

Como podemos notar todas las estrellas han sido adecuadamente identificadas, bien sea con el número BD, el del estudio fotométrico de Bronkalla o el número ID del GSC2.3; del mismo modo comprobamos que presentaban brillos muy distintos comprendidos entre las magnitudes 7.63 y la 14.14 V : la estrella número 1 es la variable BD +36 3317.

5. Fotometría: magnitudes V y desviaciones estándar obtenidas.

Para extraer de las imágenes CCD mediciones fotométricas hemos usado el programa *FotoDif* (siglas que corresponden a Fotometría Diferencial), escrito por Julio Castellano⁴, que como otros programas profesionales precisa de al menos un astro de comparación no variable; al igual que en campañas anteriores hemos utilizado como astro de comparación la estrella BD +36 3314 (rotulada con el nombre 8.66 en la Figura 1): es una estrella blanca cuyo índice de color $B - V$ es igual a 0.00 (Bronkalla, 1963) y 0.09 (Eggen, 1968). Las mediciones obtenidas han sido abiertas y analizadas con el programa *Análisis de Variabilidad Estelar* (A.V.E.) del Grupo de Estudios Astronómicos (G.E.A.), obteniéndose tanto la magnitud promedio V como la desviación estándar (σ): el primer valor nos permite comparar nuestras magnitudes con la fotometría profesional (tanto la de Bronkalla como la del GSC2.32) mientras que el segundo nos permitiría localizar las posibles variables ya que, como es frecuente en este tipo de trabajos, los valores de σ aumentan de manera suave y gradual a medida que los astros son más débiles pero, a la vez, son mayores en aquellos astros que son variables; por ello todas aquellas estrellas cuyos valores sean discordantes de los demás pueden ser (o realmente son) variables. Las magnitudes obtenidas y las desviaciones estándar que hemos calculado tienen una precisión de sólo dos decimales debido a que la magnitud de la estrella de comparación se conoce con esta misma precisión; en la Tabla 3 presentamos el número de mediciones realizadas y los resultados obtenidos en las campañas de 2009, de 2010 y el análisis de los datos conjuntos de ambas campañas.

⁴ Disponible en la dirección web: <http://www.astrosurf.com/orodeno/fotodif/index.htm>

Tabla 3

Mediciones, magnitudes V y desviaciones estándar obtenidas

Número	Mediciones	V (2009)	Mediciones	V (2010)	V ambas
1	315	9.01 ± 0.31	356	9.11 ± 0.34	9.06 ± 0.33
2	80	13.56 ± 0.16	170	13.66 ± 0.14	13.63 ± 0.15
3	82	14.00 ± 0.21	167	14.14 ± 0.17	14.10 ± 0.18
4	174	11.86 ± 0.06	338	11.81 ± 0.09	11.83 ± 0.08
5	302	8.86 ± 0.02	356	8.86 ± 0.03	8.86 ± 0.02
6	266	10.29 ± 0.04	346	10.24 ± 0.09	10.27 ± 0.07
7	79	12.61 ± 0.10	172	12.62 ± 0.10	12.62 ± 0.10
8	84	13.14 ± 0.16	167	13.19 ± 0.13	13.18 ± 0.13
9	86	12.02 ± 0.09	171	12.00 ± 0.10	12.01 ± 0.10
10	277	7.92 ± 0.14	345	7.85 ± 0.15	7.88 ± 0.15

Podemos ver, en primer lugar, que las magnitudes medias de la campaña de 2009 difieren de las de la campaña de 2010 como máximo de 0.14 a 0.10 magnitudes (estrellas 1, 2 y 3), aunque en la mayoría de las estrellas estos valores se reducen a 0.05–0.07 magnitudes (estrellas números 4, 6, 8 y 10) o incluso bajan a sólo 0.00–0.02 magnitudes (estrellas números 5, 7 y 9). Si observamos las desviaciones estándar veremos que éstas oscilan entre 0.02 como mínimo y 0.34 como máximo manteniéndose la mayor parte de ellas muy próximas a, o por debajo, de 0.15. Cuando representamos las desviaciones estándar de las campañas individuales de 2009 y 2010 frente a las magnitudes medias de las estrellas (Figura 2) veremos que, tal como suponíamos, el valor de σ aumenta lenta, progresiva y ordenadamente en la mayoría de las estrellas (8 sobre 10): en el primer caso (año 2009) estos valores comienzan en 0.02 (estrella 5: magnitud 8.86 V) y aumentan suavemente hasta alcanzar el valor 0.21 (estrella 3: magnitud 14.00 V); en el segundo (2010) estos valores empiezan en 0.03 (estrella 5) y suben hasta 0.17 (estrella 3) exactamente igual que en la otra campaña. Hay dos valores que aparecen anómalos en ambas lo que indica que no se deben a errores observacionales: 0.14 y 0.15 en el caso de la estrella 10 y nada menos que 0.31 y 0.34 en la estrella 1; en este último caso sabemos que la estrella es variable, con una amplitud muy próxima a 1 magnitud, pero la estrella 10 es un brillante astro azul de magnitud 7.63 V cuya desviación estándar debería ser muy ser próxima a cero, como ocurre con la también brillante estrella número 5 (magnitud 8.73 V). ¿Por qué no ocurre así?, ¿se trata de una posible nueva estrella variable?: luego lo analizaremos con algo más de detalle.

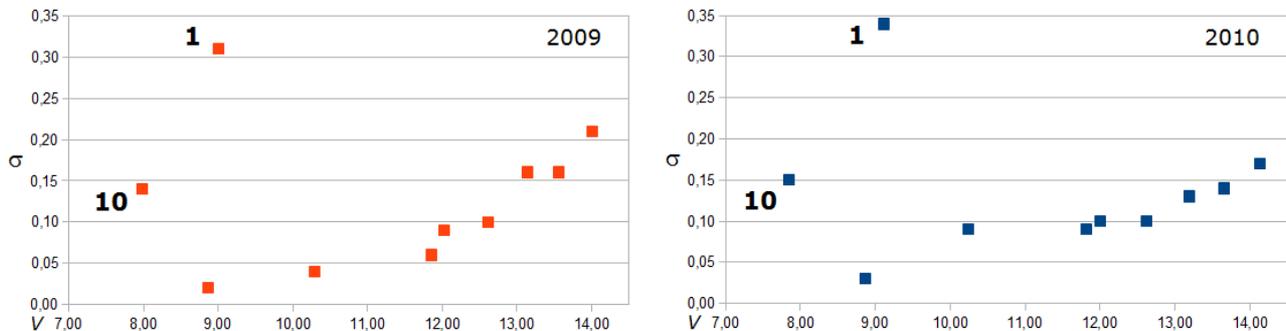


Figura 2. Desviaciones estándar frente a magnitudes medias V Johnson obtenidas en las campañas de los años 2009 (izquierda) y 2010 (derecha): se aprecian dos valores anómalos correspondientes a las estrellas 10 y 1.

6. Curvas de luz de BD +36 3317.

Como ya mostramos en la Tabla 3 hemos obtenido 315 mediciones de las imágenes del año 2009 y otras 356 de las del año 2010, lo que arroja un total de 671 mediciones fotométricas: cuando las representamos en función del tiempo obtenemos una curva de luz que mostramos en la Figura 3.

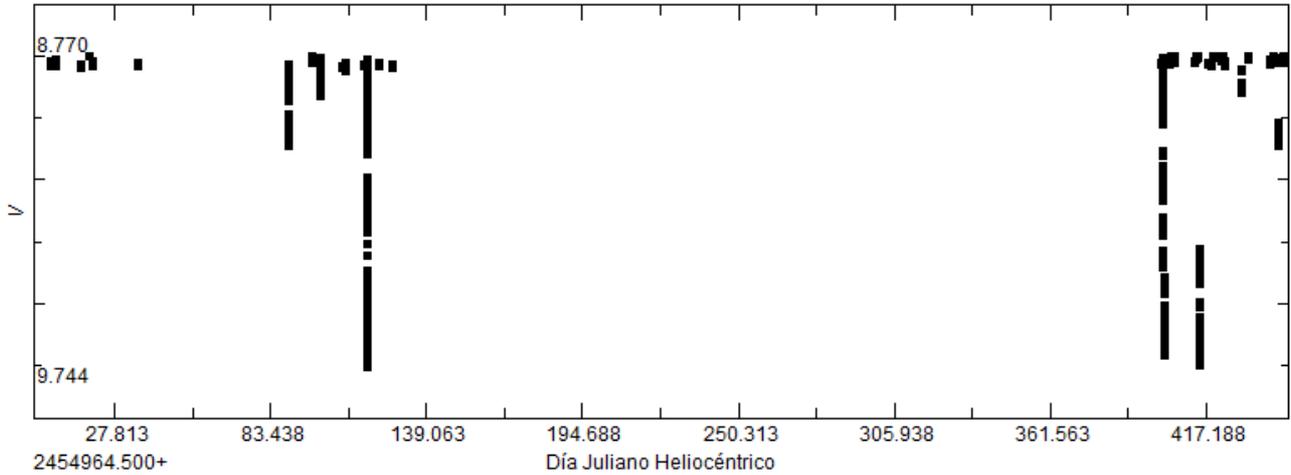


Figura 3. Curva de luz de la estrella variable BD +36 3317 obtenida durante los años 2009 (izquierda) y 2010 (derecha): pueden apreciarse los distintos eclipses primarios y secundarios capturados a lo largo del tiempo observado.

En ella se pueden apreciar un total de siete caídas o pérdidas de brillo que corresponden a eclipses primarios (profundos) o secundarios (menos profundos) con un gran espacio vacío entre ambas campañas debido al tiempo en el que no fue observada por no ser visible, encontrarse a baja altura sobre el horizonte local o a la climatología desfavorable; cuando representamos estas 671 mediciones fotométricas con el período determinado por nosotros en el año 2007 (4.30216 días) obtenemos la curva de luz, en fase, mostrada en la Figura 4.

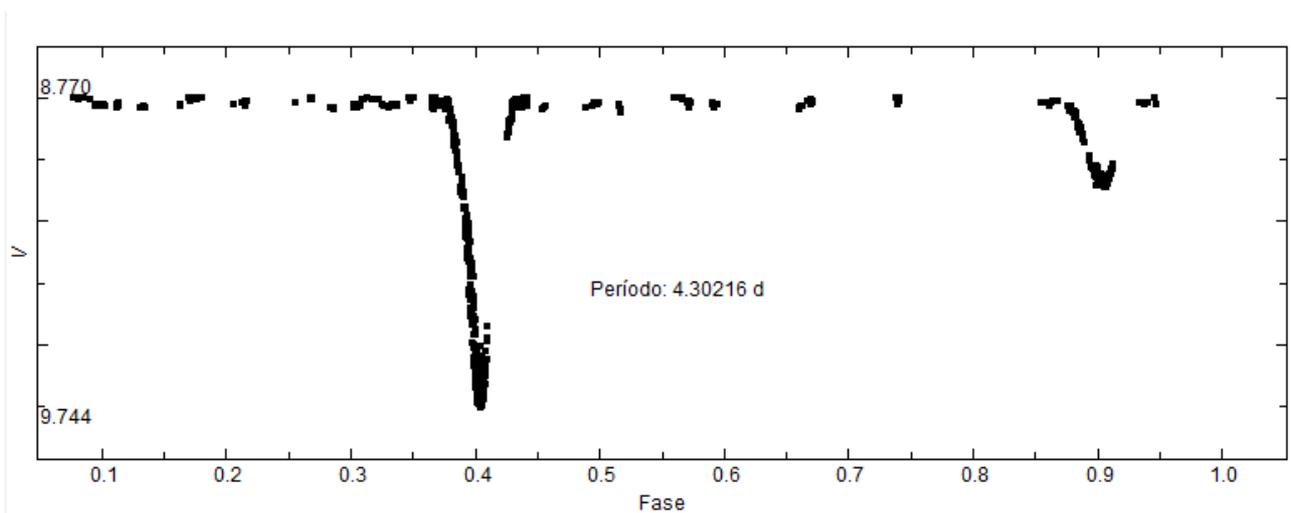


Figura 4. Curva de luz de la estrella variable BD +36 3317 representada, en fase, utilizando un período igual a 4.30216 días: se aprecian incompletos tanto el eclipse primario como el secundario.

Al examinar la figura podemos comprobar, en primer lugar, que la cobertura fue bastante buena entre la fase 0.00 y 0.75 habiendo capturado perfectamente la caída de brillo, el mínimo, parte de la recuperación y final del eclipse primario mientras que del secundario tenemos la pérdida de luz del inicio del eclipse, el mínimo y el comienzo de la recuperación de brillo pero (como ocurría con el mínimo primario) falta una porción del mismo, concretamente la recuperación de brillo tras el eclipse; en segundo lugar apreciamos que la cobertura fue pobre entre las fases 0.75 y 1.00 (es decir, una cuarta parte de la curva de luz); finalmente vemos que la magnitud de reposo de la estrella fuera de los eclipses (8.77–8.78 V) no es la misma de noche en noche, observándose una discontinuidad en forma de *saltos* debidos a la desigual calidad⁵ de las imágenes obtenidas (esta *calidad*, naturalmente, dependió única y directamente del estado de la atmósfera situada sobre el observatorio). Podemos comparar esta estabilidad atmosférica, noche a noche, si representamos las 2095 mediciones fotométricas obtenidas desde el Observatorio Astronómico de Cáceres en las campañas de los años 2007 y 2008 (Violat y Violat, 2010), con un telescopio de 203 mm de abertura con CCD y filtro V Johnson (magnitudes diferenciales obtenidas con respecto a la estrella de comparación, de magnitud 8.66 V), lo que hacemos en la Figura 5.

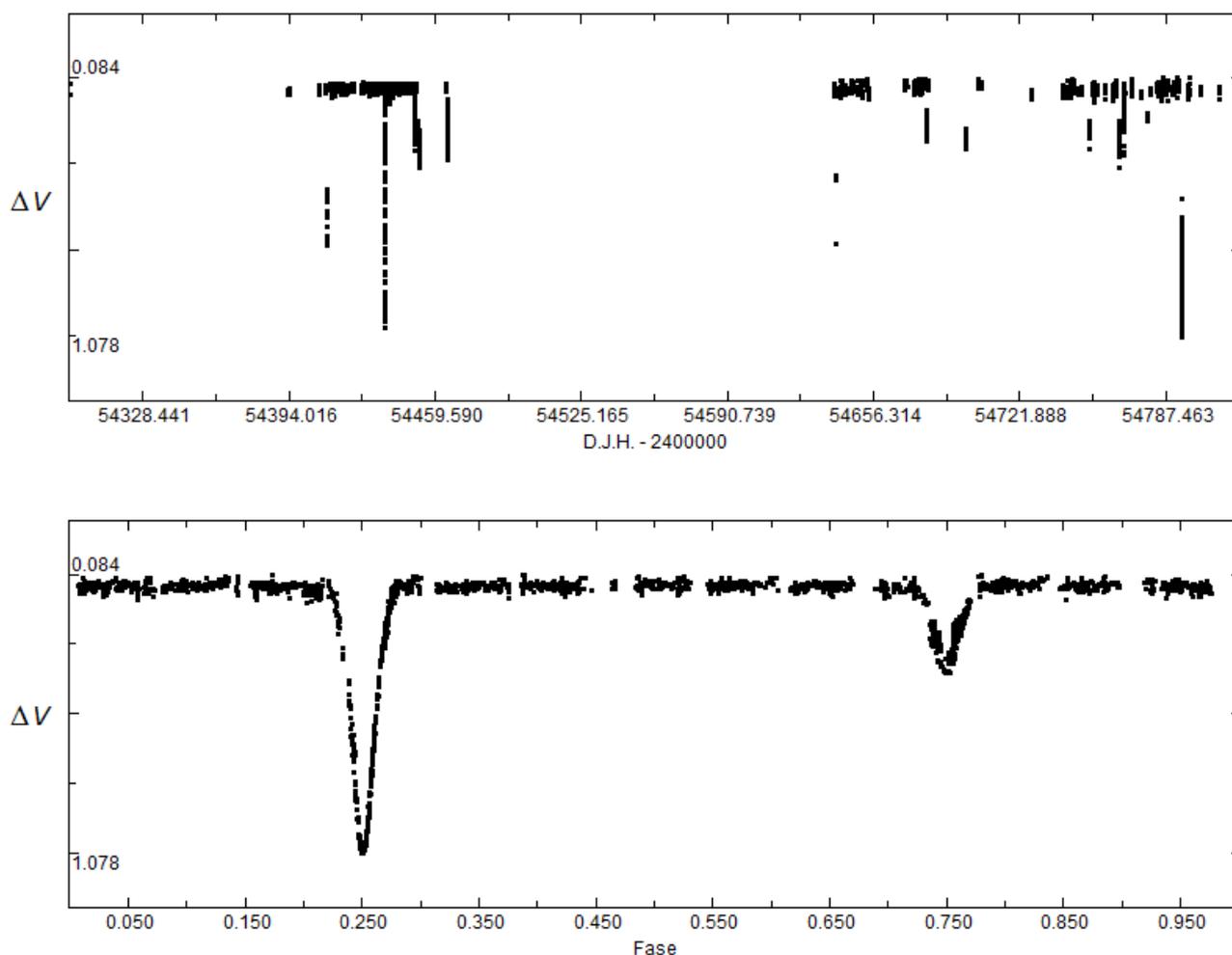


Figura 5. Curvas de luz en banda V de la estrella variable BD +36 3317 obtenidas durante los años 2007 y 2008 noche a noche (panel superior) y representada en fase utilizando las 2095 mediciones fotométricas diferenciales con un período igual a 4.30216 días (panel inferior): al ser la cobertura más amplia se aprecian mucho mejor los eclipses.

⁵ Esto se aprecia tanto en el distinto tamaño (*seeing*) de las estrellas, imagen a imagen y noche a noche, como en la oscuridad del fondo del cielo visible y mensurable sobre cada una de las imágenes CCD.

En ellas, representadas en magnitudes diferenciales⁶, vemos las mediciones fotométricas obtenidas durante las dos campañas y se aprecian las muy pequeñas variaciones de brillo, noche a noche, debidas a la calidad de la atmósfera local: el brillo de la variable fuera de los eclipses es muy estable y oscila en torno a la magnitud 8.77 *V*. Notamos enseguida (panel superior), como ocurría con los datos adquiridos desde Galicia, la desigual duración de las campañas fotométricas: se aprecian también los eclipses primarios y secundarios así como el hueco vacío entre campañas debido a la invisibilidad del cúmulo. El total de mediciones obtenidas entre las dos campañas ascendió a 2095 puntos; cuando los representamos en fase con un período igual a 4.30216 días (panel inferior) aparece la curva de luz típica de una estrella variable algólida: en este caso la cobertura es mucho más completa tanto fuera como en ambos eclipses. (En nuestro Trabajo Fin de Máster empleamos las citadas 2095 mediciones fotométricas para representar, de manera ampliada y precisa, ambos eclipses (Figura 15 del mismo): reproducimos aquí dicho dibujo, en la Figura 6, en el que cada noche de observación ha sido representada con un color distinto.)

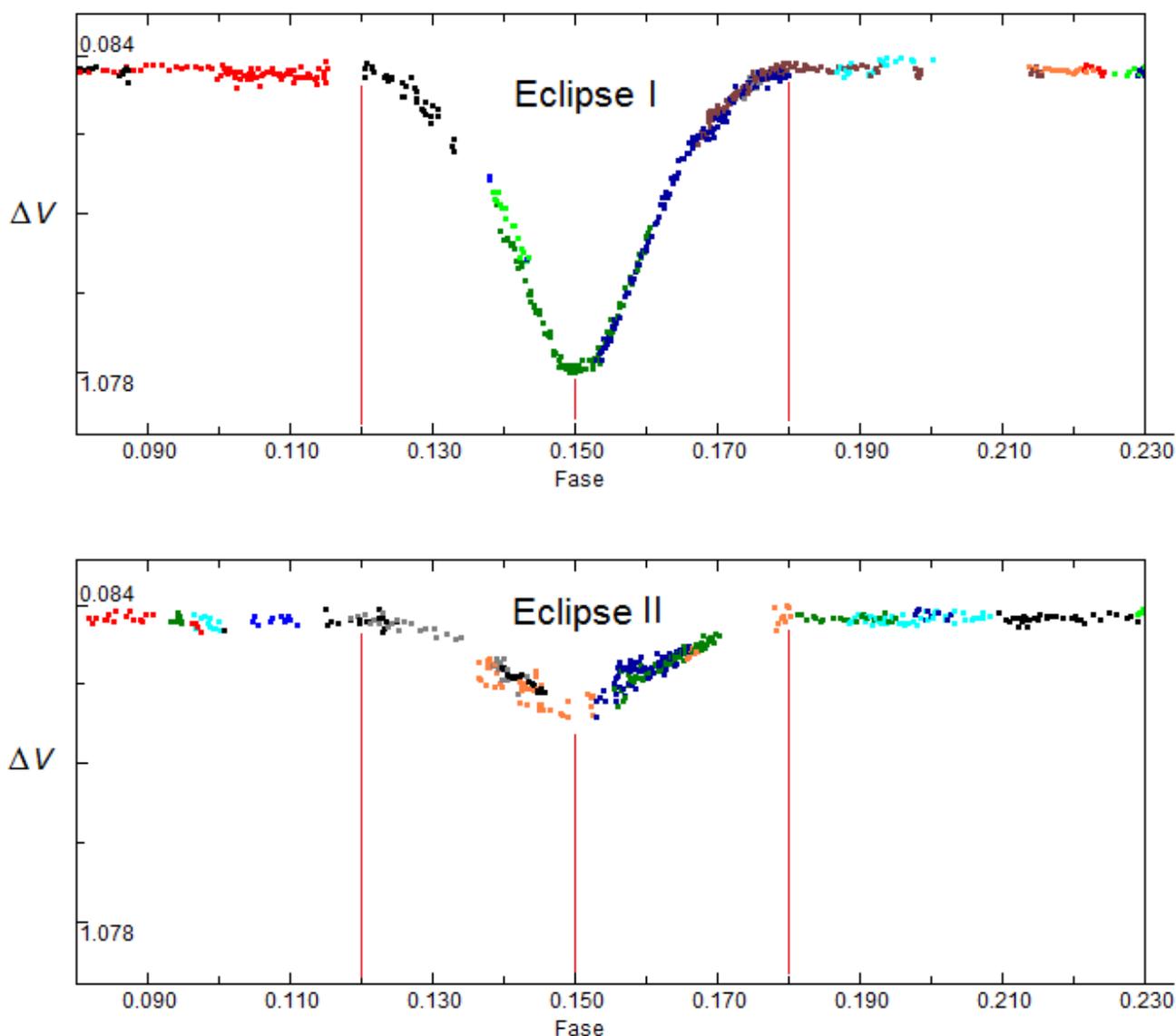


Figura 6. Eclipses primario (panel superior) y secundario (panel inferior) dibujados utilizando las mediciones fotométricas obtenidas durante las campañas de los años 2007 y 2008 desde el Observatorio Astronómico de Cáceres.

⁶ Podemos convertirlas a magnitudes absolutas sumando el valor constante 8.66 a todas las mediciones fotométricas.

Aunque parecía que en el eclipse primario se apreciaba tímidamente una cierta forma “plana”, como si fuese total y no parcial (es decir, la inclinación orbital del sistema sería entonces igual o muy próxima a 90°), el examen del secundario nos hizo descartar la idea: en él las mediciones muestran con toda claridad una caída aguda durante el eclipse descartando el *plateau* o zona plana que parecía intuirse en el eclipse primario. A la vista de estos datos descartamos que el eclipse fuese total cifrando la inclinación orbital, por medio del uso del programa *StarLight Pro*⁷ sobre nuestros datos fotométricos, en los 86.6° .

7. Análisis de los eclipses. Inclinación orbital.

Utilizando las 671 mediciones fotométricas obtenidas desde Galicia podemos examinar la forma precisa de los eclipses representándolos en fase con una octava parte del período (0.537770 días): al hacerlo así (Figura 7) podemos notar que los fondos de ambos son levemente planos, con un *plateau* o zona de magnitud estable en el mínimo, lo que demuestra que ambos eclipses son totales; la inclinación orbital del sistema debe de ser, por tanto, muy próxima a 90° .

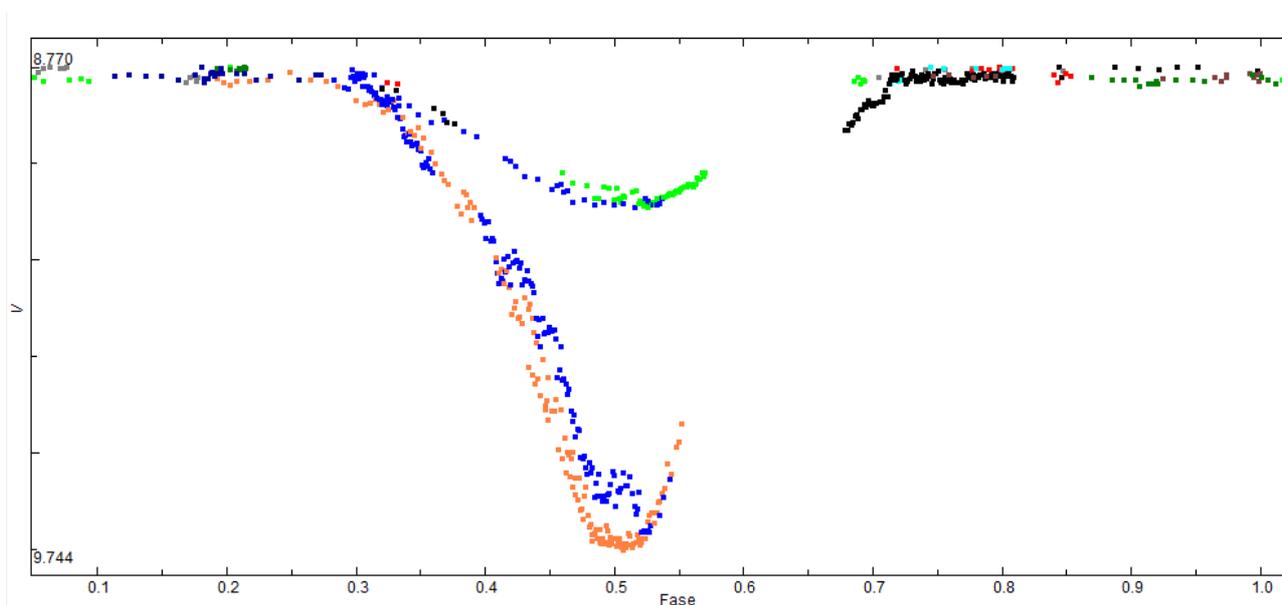


Figura 7. Eclipses primario y secundario, dibujados en fase, utilizando las mediciones fotométricas obtenidas desde Forcarei (Pontevedra) en las campañas de los años 2009 y 2010: en ambos se aprecia el fondo plano lo que indica que el eclipse es total y no parcial; cada sesión de trabajo se ha representado con un color distinto.

En la figura hemos dibujado ambos eclipses en la misma fase, por comodidad, aplicando diferentes colores a las observaciones que pertenecen a sesiones de trabajo distintas: esto nos permite comprobar la coincidencia de las mediciones de noche en noche; no obstante podemos ver que en el eclipse primario (también en el secundario, pero menos marcado) se distinguen individualmente tres sesiones distintas: dos de ellas (en color ocre) muestran el eclipse bien definido mientras que otra (en color azul) estuvo afectada por la presencia de cirros que alteraron notablemente toda la sesión excepto los últimos minutos de observación, en los cuales las mediciones coinciden con las de la otra sesión. Pero el detalle más importante es que se aprecian los mínimos planos tanto en el eclipse secundario como en el primario, algo difícil de apreciar en las

⁷ Disponible en la dirección web: <http://www.midnightkite.com/binstar.html>

curvas de luz obtenidas desde Cáceres con un telescopio cuyo diámetro, y distancia focal, eran aproximadamente la mitad del que utilizamos en Forcarei.

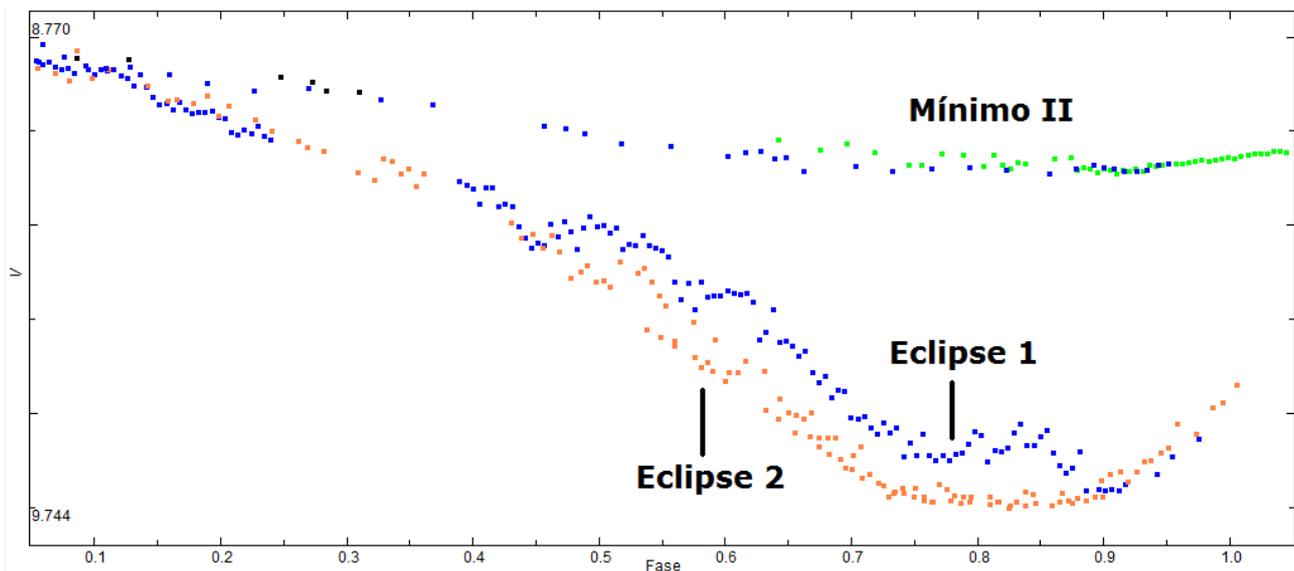


Figura 8. Ampliación de los eclipses primarios y secundarios capturados desde el Observatorio Astronómico de Forcarei: como en la figura anterior las distintas sesiones de observación se han representado con diferentes colores.

Empleando estos mismos datos podemos examinar en detalle ambos eclipses, lo que hacemos en la Figura 8, utilizando un período dieciséis veces inferior al real (0.268885 días): en ella vemos el inicio de la pérdida de brillo debido al paso de la estrella secundaria delante de la primaria (eclipse primario) o la ocultación de la secundaria por la primaria (eclipse secundario), el fondo plano en ambos eclipses (el *plateau* ya citado) y la recuperación de brillo a medida que el eclipse finaliza. Si nos fijamos en el eclipse secundario (Mínimo II) veremos que las mediciones fotométricas de dos sesiones distintas (una dibujada en verde y la otra en azul) coinciden casi perfectamente, lo que da fe de la calidad de dichas mediciones; sin embargo, y por desgracia, esto no ocurrió en el caso del eclipse primario debido a la desfavorable meteorología de la noche: las mediciones corresponden a tres noches diferentes (representadas con puntos ocres o azules) pero en este caso sólo existe una coincidencia total de los puntos al inicio del eclipse (entre las fases 0.00 a 0.24 y 0.38 a 0.47) y al final del mismo (fases 0.88 a 0.97), siendo inútiles las mediciones fotométricas que vemos dibujadas entre las fases 0.48 y 0.87. Dejando aparte el hecho anecdótico de la presencia de cirros durante esa sesión se observación, y la inutilidad de estas mediciones, podemos ver con claridad el mínimo plano de ambos eclipses: esto demuestra que son totales y no parciales, como siempre hemos pensado. La inclinación del sistema, tal como ya dijimos, debe ser entonces muy próxima a 90° .

8. Modelización del sistema. Parámetros orbitales.

En nuestro Trabajo Fin de Máster llegamos a conseguir modelizar el sistema orbital empleando con provecho el programa *StarLight Pro*, como ya indicamos: utilizando los pocos datos conocidos (como el tipo espectral de la estrella primaria, A0, el período orbital, la excentricidad -que es nula- y nuestras propias mediciones fotométricas) y variando los parámetros que el

programa utilizaba (masas M_1 y M_2 de la estrella primaria y secundaria, oscurecimiento del limbo, excentricidad e inclinación orbital, relación de masas M_2/M_1 , oscurecimiento del limbo, radios polares y temperaturas efectivas de ambas componentes) logramos obtener un ajuste extremadamente preciso entre nuestros datos fotométricos y las curvas de luz sintéticas en bandas B , V y R Johnson que el programa nos ofrecía, una de las cuales (V Johnson) vemos superpuesta a los eclipses primario (panel superior) y secundario (panel inferior) de la Figura 9, que mostramos junto a estas líneas. Al no haber ampliado la escala creímos que el ajuste era perfecto cuando, evidentemente, esto no era del todo cierto.

En base a los datos fotométricos, el modelo obtenido a partir de las curvas de luz sintéticas y ciertos cálculos matemáticos que realizamos (presentados en el Anexo I del citado Trabajo Fin de Máster), basados en cinco velocidades radiales obtenidas desde Egipto en 1969 (Handing y Candy, 1971), pudimos determinar los parámetros físicos del sistema orbital (que incluimos en el citado trabajo en la Tabla 11) y que presentamos aquí en la Tabla 4.



Figura 9. Ajustes fotométricos V Johnson.

Tabla 4
Parámetros físicos determinados por cálculo

Masa Conjunta:	3.56 solar
Masa estrella Primaria:	2.07 solar
Masa estrella Secundaria:	1.49 solar
Relación de Masas M_2/M_1 :	0.720
Inclinación i :	86.8°
Semieje mayor a :	11.825.140 km
Semieje mayor a (U.A.):	0.07904618
Radio estrella Primaria:	1.217.989 km (1.75 solar)
Radio estrella Secundaria:	957.836 km (1.38 solar)
Velocidad orbital Primaria:	83.66 kms ⁻¹

Aunque en la Tabla no aparecen relacionados pudimos determinar también, a partir de los 71 espectrogramas de baja resolución⁸ que obtuvimos desde Cáceres en la campaña del año 2008, los tipos espectrales de ambas componentes que estimamos en A0 para la primaria y A9 para la secundaria: ambos eran plenamente consistentes con las masas y radios polares calculados previamente ya mostrados en la Tabla 4. Como también pudimos determinar, por diferentes métodos, la distancia del cúmulo en el que se encuentra, el índice de color $B - V$ de la estrella⁹ y el diagrama H-R del cúmulo, obtuvimos una serie de datos astrofísicos del sistema que mostramos completos, por primera vez, en la Tabla 5.

⁸ La resolución era igual a 2.89 nanómetros/píxel en el rango 390-1100 nanómetros.

⁹ Esta estrella está incluida, con el número 16, en el *survey* fotométrico B, V de 140 estrellas de la zona realizado expresamente para el Trabajo Fin de Máster: se obtuvo midiendo las magnitudes estelares utilizando para ello cinco imágenes B y cinco V tomadas desde Forcarei la noche del 5 de julio de 2010.

Tabla 5
Parámetros físicos del sistema orbital

Masa Conjunta:	3.56 solar
Masa estrella Primaria:	2.07 solar
Masa estrella Secundaria:	1.49 solar
Relación de Masas M_2/M_1 :	0.720
Tipo espectral Primaria:	A0
Temperatura efectiva Primaria	9750 K
Tipo espectral Secundaria:	A9
Temperatura efectiva Secundaria	7600 \pm 25 K
Inclinación i :	86.8°
Período:	4.30216 días
Excentricidad e :	0.0
Semieje mayor a :	11.825.140 km
Semieje mayor a (U.A.):	0.07904618
Radio polar estrella Primaria:	1.217.989 km (1.75 solar)
Radio polar estrella Secundaria:	957.836 km (1.38 solar)
Velocidad orbital Primaria:	83.66 kms ⁻¹
Módulo de distancia:	7.96
Distancia:	373 pc
Logaritmo edad:	7.75
Edad:	56 millones de años
Metalicidad:	0.019

Con estos datos a la vista podemos decir, sin miedo a equivocarnos, que la estrella es un sistema binario muy joven que, por su edad y distancia, pertenece al joven cúmulo estelar Stephenson 1: la edad del mismo se estima en torno a los 40-50 millones de años (Piskunov *et al.*, 2006) encontrándose a una distancia de 373 pc de la Tierra.

9. Resultados profesionales: nuevos valores. Comparación con nuestros resultados.

En julio de 2012 apareció en el número 17 de la revista profesional “New Astronomy” el trabajo titulado *BD+36 3317: An algol type eclipsing binary in Delta Lyrae cluster* firmado por Özdarcın, Sipahi y Dal (Özdarcın *et al.*, 2012), un grupo de astrónomos turcos pertenecientes a la Ege University¹⁰: puestos en contacto con el Dr. Özdarcın recibimos, de inmediato, una copia del artículo para su lectura y examen¹¹. En él, a lo largo de cinco páginas, este equipo de investigadores presentaban los resultados fotométricos y físicos obtenidos trabajando con un telescopio catadióptrico de 30 cm de abertura dotado de un fotómetro de tipo SSP5 (sin refrigerar) instalado en dicha universidad: las observaciones se extendieron durante 41 noches repartidas entre los años 2008 y 2009, habiendo utilizado como estrella de comparación a BD +36 3314 y como astro de chequeo a BD +36 3313, las mismas que nosotros.

Al no presentar un diario de trabajo no podemos saber cuándo comenzaron sus observaciones, aunque en el análisis $O - C$ que presentan aparece como primer eclipse registrado (de tipo primario) el observado el DJH 2454652.35224: dado que nuestro primer eclipse primario, presentado en el IBVS al anunciar el descubrimiento de la variable, fue observado el DJH 2454437.25921 comprobamos que entre ellos existe una diferencia de 215 días (50 órbitas completas). Con sus observaciones y por medio del análisis $O - C$ determinaron el período orbital del sistema que cifraron en 4.302162(27) días, con los dos últimos decimales dudosos: de ser correcto este valor es sólo 0.000002 días (0.17 s) mayor que el nuestro. Determinan también la magnitud del sistema

¹⁰ También conocida como Aegean University (Universidad Egea), situada en Izmir, Turquía.

¹¹ En dicho trabajo se nos menciona tanto por haber descubierto la variable como por haber determinado el período y la fecha del primer eclipse primario, a partir del cual se pueden calcular los futuros eclipses del sistema.

fuera del eclipse encontrándola igual a 8.798 V mientras que la caída de brillo durante los eclipses son iguales a la 9.715 V en el primario y 9.053 V en el secundario; según sus datos la estrella primaria es un astro de tipo espectral B9 con una temperatura efectiva igual a 10750 ± 470 K y una masa que estiman en 2.5 solar mientras que la secundaria es de tipo A8, con una temperatura efectiva igual a 7711 K y una masa igual a 1.6 del Sol, siendo la inclinación del sistema orbital igual a 89.61° con una relación de masas $M_2/M_1 = 0.65$.

En la Tabla 6 presentamos una comparativa entre los elementos orbitales y astrofísicos del sistema determinado por nosotros, presentado en nuestro Trabajo Fin de Máster en febrero de 2012, y el publicado por estos astrónomos en julio de 2012.

Tabla 6
Comparativa entre parámetros físicos del sistema orbital

	<i>Violat Bordonau</i>	<i>Özdarcan et al.</i>
Masa Conjunta (solar)	3.56	4.1
Masa estrella Primaria (solar)	2.07	2.5
Masa estrella Secundaria (solar)	1.49	1.6
Relación de Masas M_2/M_1	0.720	0.65
Magnitud absoluta	-1.40	
Tipo espectral Primaria	A0	B9-A0
Temperatura efectiva Primaria	9750 K	10750 ± 470
Índice de color $B - V$ Primaria	0.08	0.066
Tipo espectral Secundaria	A9	A8
Temperatura efectiva Secundaria	7600 ± 25 K	7711
Índice de color $B - V$ Secundaria	0.23	0.316
Inclinación orbital ($^\circ$)	86.8	89.61
Período (días)	4.30216	4.302162(27)
Excentricidad	0.0	0.0
Semieje mayor (km)	11.825.140	
Semieje mayor (U.A.)	0.07904618	
Radio polar Primaria:	1.217.989 km (1.75 solar)	1.8
Radio polar Secundaria:	957.836 km (1.38 solar)	1.5
Velocidad orbital Primaria:	83.66 kms^{-1}	
Magnitud fuera de los eclipses	8.78 ± 0.02	8.798
Magnitud eclipse primario	9.74 ± 0.02	9.715
Magnitud eclipse secundario	9.05 ± 0.02	9.053
Módulo de distancia:	7.96	
Distancia (pc):	373	353
Logaritmo edad:	7.75	
Edad (millones de años):	56	
Metalicidad:	0.019	

Se puede comprobar que los resultados obtenidos son, en general, muy similares a los publicados por el equipo turco aunque apreciamos leves diferencias en la inclinación del sistema, masa y temperatura efectiva de la estrella primaria: el resto de los parámetros, cuando podemos compararlos, no son muy diferentes dentro de la precisión de nuestros datos.

10. BD +36 3315: ¿una nueva variable?

Como ya mostramos en el Apartado 5, al presentar los resultados fotométricos, la brillante estrella azul BD +36 3315 (magnitud 7.62 V , espectro B9 e índice de color $B - V$ igual a -0.11 según SIMBAD) ha mostrado unas desviaciones estándar iguales a 0.14 magnitudes (2009) y 0.15

magnitudes (2010) que son muy superiores a las de las demás estrellas (exceptuando la variable eclipsante), siendo similares a las que han mostrado las estrellas de magnitudes iguales o superiores a la 13 V ; dado que este valor es completamente anómalo para un astro de su brillo hemos de pensar que la estrella puede ser una nueva variable situada en el cúmulo, siendo por tanto una componente del mismo, o ser una mera estrella de campo proyectada sobre el mismo por casualidad.

La curva de luz obtenida noche a noche, a lo largo de los dos años que ha estado bajo estudio, aparece representada en el panel superior de la Figura 10; al analizar la mediciones fotométricas con el programa A.V.E. encontramos un posible período de oscilación igual a 6.07938 días: cuando representamos las mediciones con dicho posible período obtenemos lo que parece la curva de luz de un sistema binario eclipsante de tipo Beta Lyrae (panel inferior), cuya amplitud máxima encontramos igual a 0.55 magnitudes.

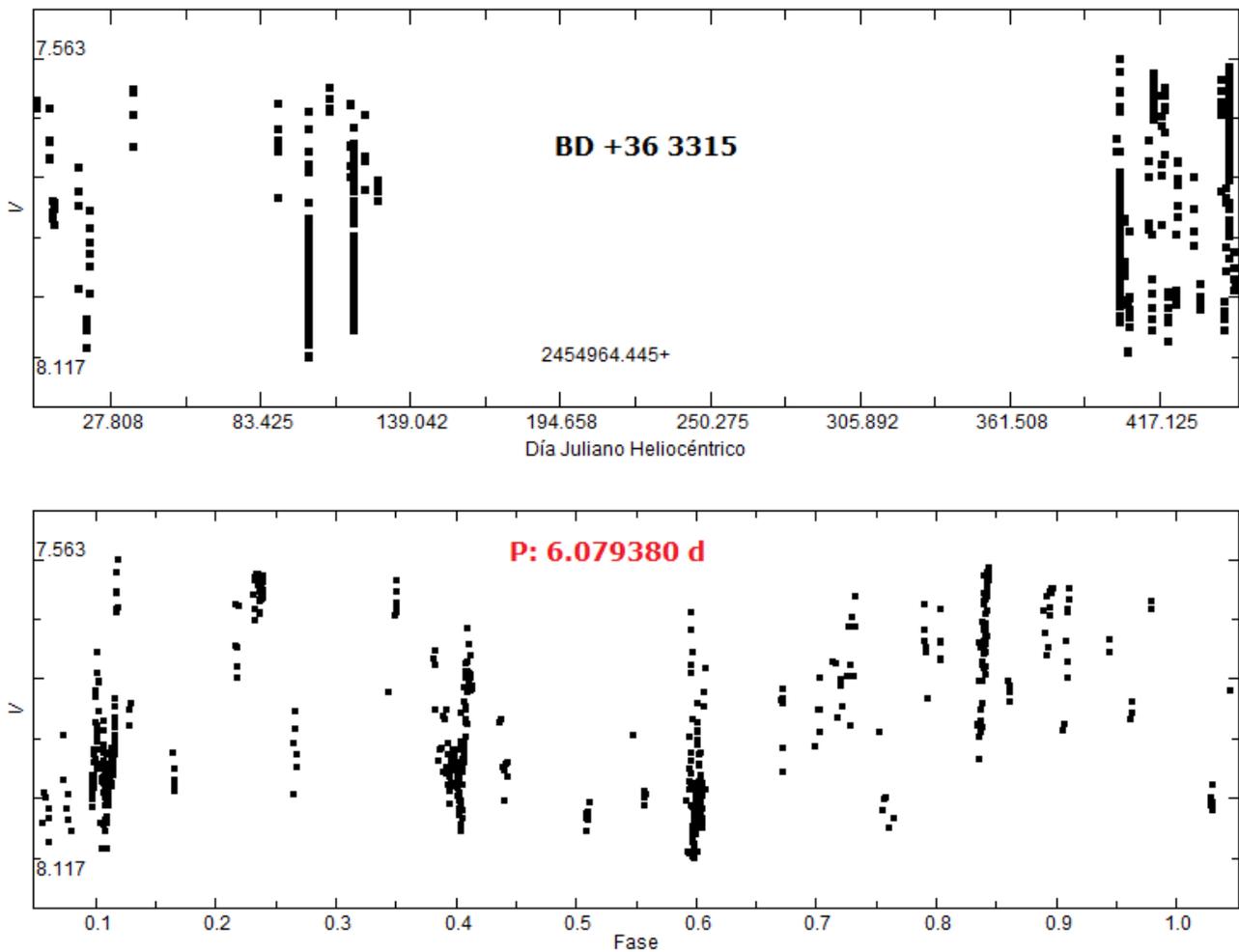


Figura 10. Curvas de luz de la estrella BD +36 3315: noche a noche a lo largo de las dos campañas (panel superior) y dibujada en fase utilizando un período igual a 6.079380 días (panel inferior); la curva de luz obtenida es similar a la de una estrella variable eclipsante de tipo Beta Lyrae. Esta estrella es, además, una binaria espectroscópica.

Estos resultados podrían ser considerados erróneos habiendo sido provocados por cambios aleatorios en la transparencia atmosférica, en cambios de magnitud debido a haber trabajado a distancias cenitales distintas (lo que influye en una estrella azul como esta) o a errores cometidos al medir las imágenes si no fuese porque disponemos de un total de seis velocidades radiales obtenidas

desde Kottamia (Egipto) en 1969 (Harding y Candy, 1971): dichos valores muestran oscilaciones periódicas en la velocidad radial de la estrella con una amplitud de 34 kms^{-1} entre -23 y $+11 \text{ kms}^{-1}$, lo que fue interpretado por estos observadores como una posible nueva binaria espectroscópica cuya pertenencia al cúmulo no pudieron confirmar.

Dejaremos para un trabajo futuro el análisis exhaustivo de nuestras mediciones fotométricas a las que añadiremos las obtenidas por el satélite *Hipparcos* y las velocidades radiales disponibles, aunque podemos adelantar que del análisis provisional de estos datos parece deducirse que nos encontramos ante una nueva variable eclipsante (también binaria espectroscópica, como BD +36 3317) cuyo período de oscilación parece estar comprendido entre los 6 y 9 días.

Agradecimientos. Esta investigación ha sido realizada utilizando los catálogos y bancos de datos de VizieR y SIMBAD (Centro de Datos Estelares CDS, Strasbourg, France), NASA's Astrophysics Data System, los datos fotométricos obtenidos desde el Observatorio Astronómico de Cáceres en los años 2007 y 2008 así como los obtenidos por el autor con el telescopio de 51 cm del Observatorio Astronómico de Forcarei (Pontevedra), perteneciente a la Fundación “Ceo, Ciencia e Cultura” (FC³), durante los años 2009 y 2010. Damos las gracias también al Dr. Enrique Santander por su generosa ayuda y al Dr. Özdarcın por su amabilidad al remitirnos su artículo.

Referencias

- AAVSO: http://www.aavso.org/vsx/index.php?view=detail_top&oid=232663
- Bronkalla, W., 1963, *AN*, **287**, 249: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1963AN...287..249B>
- Eggen, O. J., 1968, *ApJ*, **152**, 77: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1968ApJ...152...77E>
- Guide Star Catalog (GSC): <http://archive.eso.org/gsc/gsc>
- Harding, G. A., Candy, M. P., 1971, *Royal Obs. Bull., Greenwich-Cape*, No. **164**, p. 251: <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1971RGOB..164..249H>
- IBVS 5900, report nº 6 (14 enero 2008): <http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVS?5900>
- Observatorio Astronómico de Forcarei (Fundación FC³): <http://www.fc3.es/>
- Özdarcın, O., Sipahi, E., Dal, H. A., 2012, *New Astronomy*, **17** (julio), 483-487: <http://arxiv.org/abs/1207.0194>
- Piskunov, A.E. *et al.*, 2006, *A&A*, **445**, 545, , <http://fr.arxiv.org/abs/astro-ph/0508575>
- SIMBAD Astronomical Database: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Stephenson, C. B., 1959, *PASP*, **71**, 145: <http://simbad3.u-strasbg.fr/cgi-bin/cdsbib4?1959PASP...71..145S>
- Violat Bordonau, F., Violat Martín, D., web Casanchi (febrero de 2007), disponible *on line* en la dirección web: <http://personales.ya.com/casanchi/ast/delta01.htm>
- Violat Bordonau, F., Violat Martín, D., web Casanchi (mayo de 2009), disponible *on line* en la dirección web: <http://personales.ya.com/casanchi/ast/bd363317.pdf>
- Violat Bordonau, F., Arranz Heras, T. (agosto 2009). *IAU Information Bulletin on Variable Stars*, **5900**, 1, disponible en: <http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVSpdf?5900>
- Violat Bordonau, F., Violat Martín, D., web Casanchi (febrero de 2010), disponible *on line* en la dirección web: http://casanchi.com/ast/fotostephenson1_01.htm
- Violat Bordonau, F., Trabajo Fin de Máster de la Universidad Internacional Valenciana: “Estudio Fotométrico y Espectroscópico del cúmulo abierto Stephenson 1”, defendido el día 4 de febrero 2012.
- VizieR Catalogue Service: <http://vizier.u-strasbg.fr/>
- WEBDA: http://www.univie.ac.at/webda/cgi-bin/ocl_page.cgi?cluster=Stephenson+1