

OBSERVACIONES FOTOELÉCTRICAS UBV Y ANALISIS
DE BINARIAS ECLIPSANTES DE CORTO PERIODO:
AU PHOENICIS, SY HOROLOGII Y VY CETI

Emilio Lapasset⁺ y Juan J. Clariá^{*}

Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de
Córdoba, Argentina

RESUMEN. Se presentan las primeras observaciones fotoeléctricas de tres binarias eclipsantes (AU Phe, SY Hor y VY Cet) con períodos de algo más de 0,3 días y tipos espectrales G y K. Las curvas de luz de estos sistemas exhiben las características típicas de las binarias tipo W UMa con eclipses parciales. SY Hor y VY Cet presentan mínimos muy profundos, mientras que AU Phe exhibe una variación de luz menos marcada y una notable asimetría entre ambas zonas de máxima intensidad. El método computacional sintético de Wilson y Devinney es utilizado para analizar en forma preliminar las curvas de luz observadas en magnitud visual. Se concluye que los sistemas estudiados pertenecen muy probablemente al grupo de las binarias de tipo W y se presentan las soluciones fotométricas más aceptables. Relaciones de masas próximas a la unidad son fotométricamente descartadas, mientras que el grado de contacto parece ser muy marginal en los tres casos. Se presenta también una discusión sobre criterios de diferenciación de sistemas tipo A y W.

ABSTRACT. The first photoelectric observations of three eclipsing binaries (AU Phe, SY Hor and VY Cet) with periods around 0.3 days and spectral types G and K are presented. The light curves of these systems show W UMa-type characteristics with partial eclipses. Minima of SY Hor and VY Cet are very deep. AU Phe presents a less pronounced light variation and a difference of intensity between both maxima. The Wilson and Devinney model is employed to analyse the light curves in the V-magnitude. W-type configurations are established as highly probable for the three systems. Different sets of possible solutions are presented and discussed. We largely reject the configurations with values of the mass ratio close to unity. Some criteria about differences between A- and W-type W UMa systems are also discussed.

I. INTRODUCCION

Continuando con el estudio sistemático de estrellas binarias eclipsantes de corto período iniciado años atrás, presentamos ahora un análisis de observaciones fotoeléctricas UBV de tres sistemas del tipo W UMa, a saber: AU Phe, SY Hor y VY Cet. El objetivo principal de la presente investigación consiste en actualizar las anteriores efemérides fotográficas de dichos sistemas; obtener las primeras curvas de luz fotoeléctricas y, finalmente, analizar dichas curvas mediante los métodos computacionales sintéticos de Wilson y Devinney (1971).

⁺ Astrónomo visitante del Observatorio Astronómico de Las Campanas (Chile).

^{*} Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET de Argentina y astrónomo visitante del Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo (Chile), subsidiado por la "National Science Foundation" según contrato N° AST 74-04128.

Las observaciones de las binarias SY Hor y VY Cet se realizaron durante el mes de noviembre de 1982 con el telescopio reflector de 61-cm perteneciente al Observatorio Astronómico de Las Campanas (Chile), en tanto que el sistema más débil AU Phe fue observado en la misma época usando el telescopio de 90-cm del Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo (Chile). Una descripción detallada del instrumental utilizado, de las estrellas observadas como comparación, de la transformación al sistema UBV standard, y del análisis de tiempos de mínimos y efemérides de las tres variables, puede verse en el trabajo de Lapasset y Clariá (1983).

En el presente trabajo se discute un análisis preliminar de las curvas de luz de los mencionados sistemas. Dicho análisis, realizado empleando técnicas de correcciones diferenciales, permite definir el rango de valores más adecuado de los parámetros fotométricos fundamentales.

II. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Un total de 418, 224, y 314 observaciones UBV individuales de AU Phe, SY Hor y VY Cet, respectivamente, fueron obtenidas. A partir de dichas observaciones se determinaron 60, 56, y 53 puntos normales, respectivamente. La fase de cada observación individual fue calculada a partir de los valores de los parámetros orbitales T_0 y P obtenidos por Lapasset y Clariá (1983). Estos valores se detallan a continuación:

$$\begin{array}{ll} \text{AU Phe : } T_0 = 2445292.^d.6660 & P = 0.^d.306660 \\ \text{SY Hor : } T_0 = 2445290.^d.8304 & P = 0.^d.311639 \\ \text{VY Cet : } T_0 = 2445284.^d.7219 & P = 0.^d.340809 \end{array}$$

Los parámetros T_0 y P fueron determinados exclusivamente en base al análisis de tiempos de mínimos deducidos de las presentes observaciones.

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran las curvas de luz observadas en el rango visual de los tres sistemas estudiados. Todas ellas exhiben las características típicas de las binarias tipo W UMa, sin evidencias en ningún caso de eclipses totales.

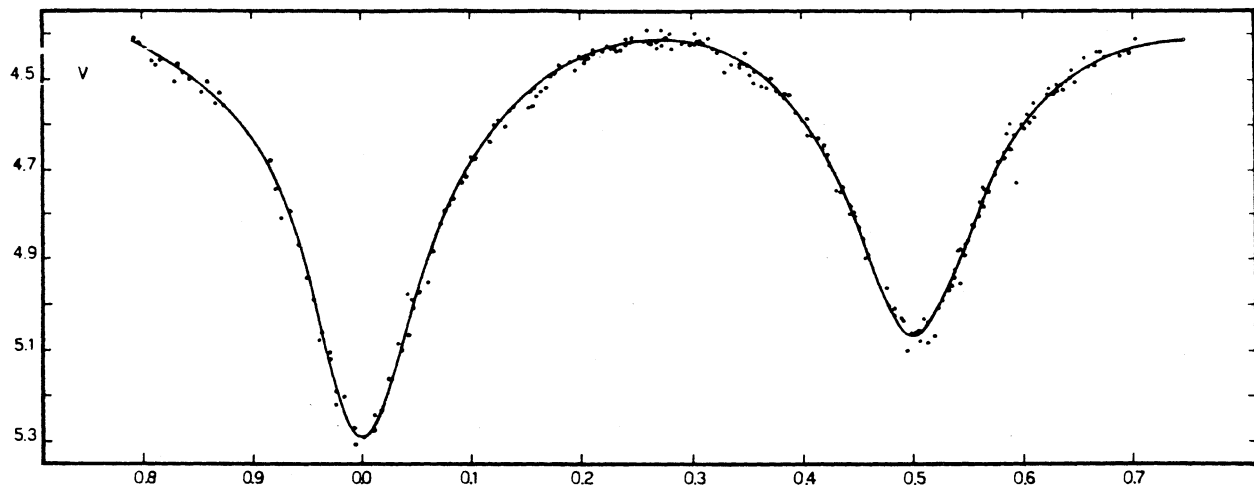


Fig. 1. Curva de luz visual de SY Horologii. Los puntos representan las observaciones en tanto que la línea llena representa la curva de luz sin tética correspondiente a la solución II.

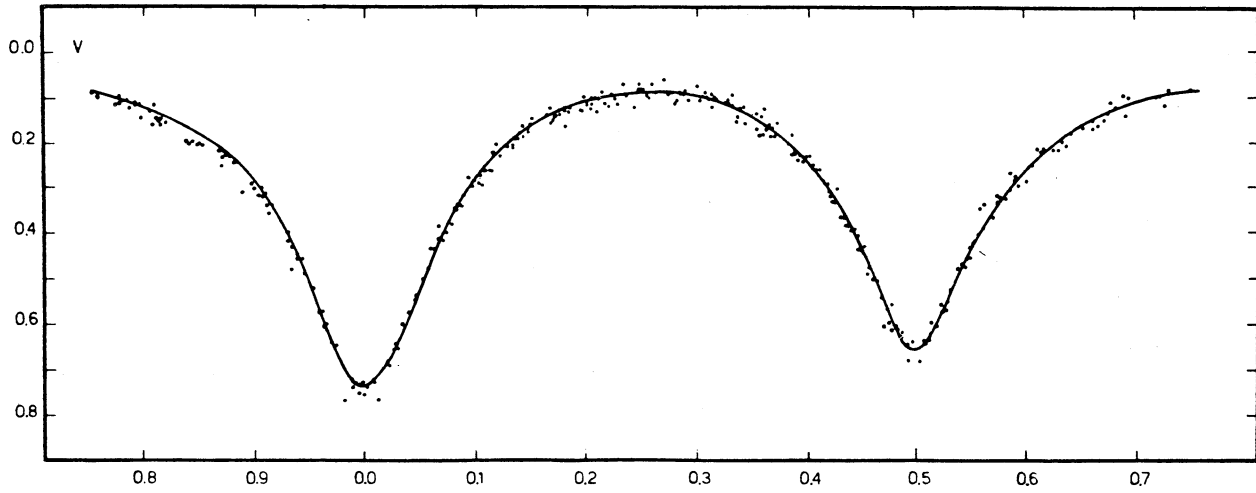


Fig. 2. Curva de luz visual de VY Ceti. Los puntos representan las observaciones en tanto que la línea llena representa la curva de luz sintética correspondiente a la solución III.

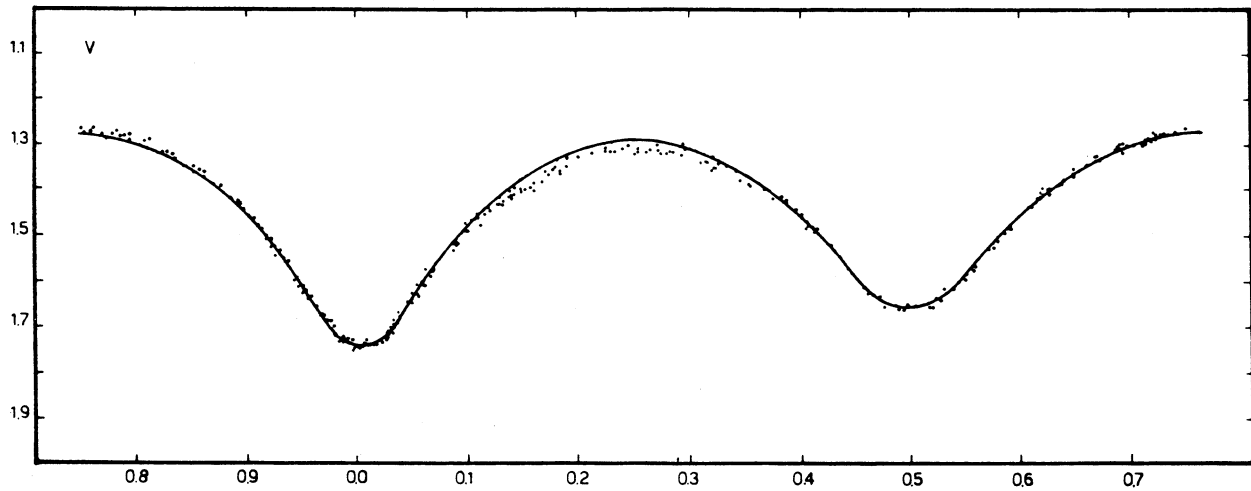


Fig. 3. Curva de luz visual de AU Phe. Los puntos representan las observaciones en tanto que la línea llena representa la curva de luz sintética correspondiente a la solución IV.

Un primer problema que se plantea al analizar este tipo de curvas de luz es el de determinar si se trata de sistemas del tipo A o W; es decir, si la componente de mayores dimensiones está eclipsada en el mínimo principal o en el secundario, respectivamente. Otro problema consiste en determinar el valor de la relación de masas, ya que la ausencia de eclipses totales hace muy dificultosa su obtención.

Algún conocimiento puede derivarse sobre ambas cuestiones probando soluciones y comparando los residuos resultantes. Es decir, iniciando los análisis de las curvas de luz con distintos valores de los parámetros críticos y hallando varias soluciones que pueden diferenciarse principalmente en el valor de q ($= m_2/m_1$), la suma de los residuos al cuadrado dará una idea de cuál es la mejor aproximación a las observaciones.

Sin embargo, algunas consideraciones previas pueden ayudar a esclarecer parcialmente estos interrogantes. En primer lugar, los datos estadísticos muestran una correlación entre la temperatura superficial y el tipo de configuración del sistema (A o W). De una lista de binarias de tipo W UMA bien estudiadas publicada por Van Hamme (1982a, 1982b) puede deducirse lo siguiente: 1) Salvo escasas excepciones, todos los sistemas de tipo espectral tardío (G y K) son binarias del tipo W, mientras que todas las estrellas tempranas (A y F tempranas) pertenecen al tipo A. La transición entre ambos grupos se produce en las estrellas F tardías. 2) Las binarias de tipo A poseen relaciones de masas bastante menores que la unidad ($q = 0,32 \pm 0,18$), en tanto que los sistemas W poseen relaciones de masas algo mayores ($q = 0,51 \pm 0,15$). Asimismo, el porcentaje de sobrecontacto parece ser mucho más marginal en los sistemas W que en los de tipo A.

Los tres sistemas objeto del presente estudio poseen tipos espectrales tardíos. En efecto, AU Phe es de tipo K2, SY Hor es de tipo K0 y VY Cet es de tipo G5. Estas clases espectrales han sido deducidas de los índices de color (B-V) integrados de cada sistema. El carácter tardío de los tres sistemas estudiados hace altamente probable la pertenencia de estas binarias al tipo W. Además, la profundidad de los mínimos en las curvas de luz en SY Hor y VY Cet parece indicar que las masas de ambas componentes en cada sistema no pueden ser demasiado diferentes. AU Phe es, en este sentido, la menos predecible debido a la menor profundidad de sus mínimos. Dicha estrella presenta además la complicación de una marcada diferencia de magnitud entre ambos máximos.

Otro criterio independiente que permite diferenciar los sistemas W UMA de tipo A y W es lo que puede denominarse el "efecto de reflexión invertido". Es un hecho conocido a partir de los análisis clásicos de estas binarias mediante regresiones lineales de series de Fourier en las zonas no eclipsadas, que el coeficiente A_1 en muchos casos resulta positivo. La teoría del efecto de reflexión predice un valor negativo para dicho coeficiente. La explicación para esta inversión del efecto de reflexión está dada por las características de la geometría de contacto. La generación de curvas de luz mediante el modelo de superficies equipotenciales que utiliza el método de Wilson y Devinney muestra que, en los sistemas de tipo A, el efecto de reflexión está contrarrestado y, en general, superado por el efecto "geométrico". Por su parte, en los sistemas de tipo W el efecto "geométrico" refuerza el efecto de reflexión.

En nuestro caso, el análisis por series de Fourier en los máximos de las curvas de luz de SY Hor y VY Cet dió por resultado valores marcadamente negativos del coeficiente A_1 . Esto permite asignar un peso mayor al probable tipo W de los dos sistemas mencionados. El caso de AU Phe se presenta nuevamente como el más ambiguo en virtud de que el análisis de las curvas de luz azul y ultravioleta dan por resultado valores positivos de A_1 , mientras que de la correspondiente curva visual se deriva un valor negativo de dicho coeficiente.

III. ANALISIS DE LAS CURVAS DE LUZ

Teniendo en cuenta las consideraciones precedentes, los análisis preliminares de las curvas de luz se realizaron en la siguiente forma:

- a) Para las binarias SY Hor y VY Cet se buscaron soluciones fotométricas dentro de configuraciones del tipo W. En el caso de AU Phe, diferentes configuraciones iniciales tanto de tipo A como W fueron ensayadas.
- b) En todos los casos se iniciaron los análisis mediante el procesado de curvas de luz sintéticas que se aproximaron a las curvas observadas por el método de prueba y error. Una vez obtenida una aceptable correlación, los cálculos se continuaron con el programa de correcciones diferenciales hasta lograr que los ajustes fueran menores o del mismo orden de los errores probables de cada parámetro.
- c) Solamente los parámetros fundamentales fueron ajustados, a saber: la inclinación

orbital (i), la relación de masas (q), los potenciales gravitatorios modificados ($\Omega_1 = \Omega_2$), la temperatura de la componente secundaria (T_2) y la luminosidad de la primaria (L_1). A la temperatura de la componente principal (T_1) y los coeficientes de oscurecimiento hacia el limbo ($x_1 = x_2$) se les asignaron los valores teóricos derivados de los índices de color (B-V) según las calibraciones de Harris (1963) y de Carbon y Gingerich (1969), respectivamente. Los valores del albedo bolométrico ($A_1 = A_2 = 0,50$) y de los coeficientes de oscurecimiento gravitatorio ($g_1 = g_2 = 0,32$) fueron fijados según lo sugerido por Lucy (1968) para estrellas con atmósferas convectivas.

d) Con el fin de limitar el tiempo de computación en estos análisis preliminares, se investigó solamente la curva de luz en la magnitud visual y se utilizó una grilla relativamente pobre de puntos sobre la superficie de cada componente (704 puntos en total).

e) En los casos en que algunos de los análisis fue comenzado con configuraciones de tipo "detached" o "semi-detached", éstas convergieron rápidamente hacia geometrías del tipo de contacto.

El detalle de los análisis realizados es el siguiente:

SY HOROLOGII

Los cálculos de este sistema se iniciaron con tres distintas configuraciones. Las diferencias entre dichas configuraciones radican en los valores de las relaciones de masas y del potencial gravitatorio. La inclinación orbital fue mantenida siempre dentro de los límites correspondientes a eclipses parciales. Los valores iniciales de q fueron 1.0, 1.5 y 2.1. Valores mayores de q resultaban incompatibles con las profundidades de ambos eclipses o hacían necesario incrementar el valor de i por encima de la condición antes mencionada.

Finalmente, los resultados que se obtuvieron se presentan en la Tabla 1, en la cual puede apreciarse que el valor inicial del parámetro q no fue modificado sustancialmente. Esto indica que posiblemente un conjunto continuo de diferentes soluciones puede obtenerse con valores de q desde 1.0 hasta 2.1 e incluso quizás en un rango aún mayor. Sin embargo, las soluciones II y III de la Tabla 1 son sensiblemente superiores a la solución I en su representación de las observaciones, tal como puede derivarse de las respectivas sumas de los residuos al cuadrado (Σwr^2). Al no disponer por el momento de otros datos complementarios, nos inclinamos por la solución II como la más aceptable fotométricamente. En la Figura 2 se representa mediante trazo continuo la curva de luz teórica correspondiente a esta solución.

TABLA 1

Parámetros fotométricos de SY Horologii

	Solución I	Solución II	Solución III
i	81°66	81°88	83°25
T_1^*	5240 °K	5240 °K	5240 °K
T_2	4900 °K	4886 °K	4872 °K
q	0.994	1.500	2.100
$\Omega_1 = \Omega_2^*$	3.688	4.500	5.311
$g_1 = g_2^*$	0.32	0.32	0.32
$A_1 = A_2^*$	0.50	0.50	0.50
L_1/L_1+L_2 (V)	0.589	0.499	0.428
$x_1 = x_2^*$ (V)	0.74	0.74	0.74
R_1 (polar)	0.363	0.325	0.303

TABLA 1 (continuación)

	Solución I	Solución II	Solución III
R_2 (polar)	0.362	0.393	0.425
R_1 (lateral)	0.383	0.341	0.317
R_2 (lateral)	0.381	0.415	0.453
R_1 (posterior)	0.416	0.373	0.354
R_2 (posterior)	0.415	0.445	0.483
% sobrecontacto	9.6	4.5	13.5
Σwr^2	0.066	0.044	0.050

* parámetros no ajustados.

VY CETI

Un análisis similar fue realizado con la curva de luz visual de VY Cet. Los valores iniciales de q fueron en este caso 1,0, 1,5 y 2,3. Este último valor representa el límite compatible con las profundidades de los mínimos y con valores de i correspondientes a eclipses parciales. Luego de varias iteraciones usando el programa de ajustes por correcciones diferenciales, los resultados obtenidos son los que se presentan en la Tabla 2. También en este caso, la solución menos admisible es la que corresponde a una relación de masas próxima a la unidad. La suma de los residuos al cuadrado indicaría una similar aproximación a las observaciones por parte de las soluciones II y III. En la Fig. 3 se ilustran los puntos observados y la curva de luz teórica representada por la solución III.

TABLA 2

Parámetros fotométricos de VY Ceti

	Solución I	Solución II	Solución III
i	76°06	77°24	78°84
T_1^*	5610 °K	5610 °K	5610 °K
T_2	5341 °K	5351 °K	5372 °K
q	0.985	1.513	2.084
$\Omega_1 = \Omega_2^*$	3.662	4.549	5.370
$g_1 = g_2^*$	0.32	0.32	0.32
$A_1 = A_2^*$	0.50	0.50	0.50
L_1/L_1+L_2 (V)	0.564	0.460	0.383
$x_1 = x_2^*$	0.69	0.69	0.69
R_1 (polar)	0.365	0.319	0.294
R_2 (polar)	0.363	0.388	0.415

TABLA 2 (continuación)

	Solución I	Solución II	Solución III
R ₁ (lateral)	0.385	0.333	0.306
R ₂ (lateral)	0.382	0.409	0.440
R ₁ (posterior)	0.419	0.363	0.317
R ₂ (posterior)	0.417	0.436	0.467
% sobrecontacto	11.9	0.0	0.3
Σwr^2	0.062	0.045	0.045

* parámetros no ajustados.

AU PHOENICIS

Puesto que éste era el caso más ambiguo sobre la configuración que "a priori" podría representar a las curvas de luz observadas, se probó con un rango más amplio de posibles soluciones. De esta forma, se iniciaron ajustes iterativos con valores de $q = 0,3, 0,7, 1,0, 1,5$ y $4,0$. Las asimetrías entre los máximos mencionadas anteriormente y la menos marcada profundidad de los mínimos dificultan una correcta determinación de la solución fotométrica de este sistema. Los resultados del presente estudio están listados en la Tabla 3. La suma de los residuos al cuadrado de este conjunto de posibles configuraciones no favorecen a las dos soluciones con valores de q extremos (solución I con $q = 0,28$ y solución V con $q = 3,91$). De las tres soluciones intermedias, optamos por la solución IV como la más apropiada. Este se debe no sólo al hecho de que con ella se obtienen los residuos más pequeños, sino también a las características físicas de este sistema. AU Phe es la binaria de tipo espectral más tardío de los tres sistemas aquí estudiados y la naturaleza parece no haber favorecido la existencia de binarias W UMa de tipo A muy tardías o con valores de q próximos a la unidad.

La Fig. 1 ilustra las curvas de luz visuales observadas y teóricas de la solución IV de la Tabla 3.

TABLA 3

Parámetros fotométricos de AU Phoenicis

	Sol. I	Sol. II	Sol. III	Sol. IV	Sol. V
i	72°96	67°39	68°17	66°63	69°00
T ₁ *	4780°K	4780°K	4780°K	4780°K	4780°K
T ₂	4485°K	4500°K	4566°K	4536°K	4550°K
q	0.281	0.700	0.900	1.498	3.957
$\Omega_1 = \Omega_2^*$	2.383	3.180	3.540	4.439	7.637
$g_1 = g_2^*$	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
$A_1 = A_2^*$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
L_1/L_1+L_2 (V)	0.817	0.661	0.588	0.483	0.282
$x_1 = x_2^*$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
R ₁ (polar)	0.470	0.395	0.371	0.331	0.262

TABLA 3 (continuación)

	Sol. I	Sol. II	Sol. III	Sol. IV	Sol. V
R ₂ (polar)	0.266	0.336	0.350	0.398	0.552
R ₁ (lateral)	0.508	0.419	0.391	0.348	0.275
R ₂ (lateral)	0.278	0.353	0.372	0.422	0.524
R ₁ (posterior)	0.535	0.452	0.424	0.384	0.320
R ₂ (posterior)	0.318	0.390	0.405	0.455	0.552
% sobrecontacto	44.4	15.7	9.2	15.1	34.4
Σwr^2	0.082	0.068	0.073	0.063	0.155

* parámetros no ajustados.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio preliminar de las curvas de luz de AU Phe, SY Hor y VY Cet ha permitido, en primer lugar, definir al menos en estos dos últimos sistemas el tipo de configuración más apropiada. Se ha utilizado para ello el criterio estadístico que correlaciona los rangos de temperaturas con los tipos A y W. Se ha usado también un criterio independiente basado esencialmente en la forma de los máximos. En segundo lugar, este estudio ha permitido seleccionar entre las posibles soluciones de las curvas de luz, aquéllas que mejor representan a las observaciones. En este sentido, las soluciones con valores de la relación de masas próximos a la unidad han quedado prácticamente descartadas. En el caso de AU Phe también deben descartarse soluciones con valores extremos de la relación de masas entre sus componentes. Cabe destacar, sin embargo, que aún en los casos en que dos soluciones son igualmente probables, parámetros básicos tales como la relación de temperaturas, la inclinación orbital y el porcentaje de sobrecontacto, quedan perfectamente definidos dentro de rangos de error aceptables. Por este motivo, se ha preferido no incluir en las Tablas 1, 2 y 3, los errores probables de cada parámetro ajustable, puesto que de una comparación entre las distintas soluciones factibles surge en forma más realista la precisión obtenida en el presente estudio.

En síntesis, podemos señalar como resultado de los análisis realizados que los sistemas tardíos AU Phe, SY Hor y VY Cet muy probablemente pertenecen al grupo de binarias W UMa de tipo W y que una característica común a los tres sistemas la constituye su extremadamente pequeño valor del porcentaje de sobrecontacto. Esta última conclusión permite confirmar el carácter marginal de la configuración de contacto de sistemas tipo W, propiedad establecida estadísticamente a partir de los datos disponibles en la actualidad.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina. El tiempo de computación ha sido generosamente facilitado por el Centro de Cálculos de la Universidad Nacional de Córdoba. E. Lapasset agradece al Director y personal del Observatorio de Las Campanas por la hospitalidad brindada durante su estada en Chile y, en particular, al Sr. Ian Shelton por su colaboración durante la realización de las observaciones. Por su parte, J.J. Clariá expresa su agradecimiento al Director, astrónomos residentes y asistentes nocturnos del Observatorio de Cerro Tololo por todas las atenciones recibidas. Finalmente, los autores agradecen también a los Sres. Jorge Laborde y Bartolo Candlerero por la cuidadosa elaboración de las ilustraciones del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Carbon, D.F. y Gingerich, O. 1969, en *Theory and Observations of Normal Stellar Atmospheres*, ed. O. Gingerich, Cambridge; M.I.T. Press), p. 401.
 Harris III, D.L. 1963, en *Basic Astronomical Data*, ed. K. Aa. Strand (Chicago: The U. of Chicago Press), p. 269.

- Lapasset, E. y Clariá, J.J. 1983, en preparación.
 Lucy, L.B. 1968, *A.J.* 151, 1123.
 Van Hamme, W. 1982a, *Astron. Ap.* 105, 389.
 Van Hamme, W. 1982b, *Astron. Ap.* 116, 27.
 Wilson, R.E. y Devinney, E.J. 1971, *Ap. J.* 166, 605.

DISCUSSION

Peimbert: Se encuentran las dos estrellas del sistema AU Phoenicis en la secuencia principal o la componente con radio mayor se encuentra un poco arriba?

Lapasset: En todos estos casos correspondientes a sistemas binarios de contacto, ambas componentes se encuentran en la secuencia principal. En AU Phe, en particular, los índices de color integrados del sistema coinciden con una estrella de secuencia principal K2 no enrojecida.

Sahade: ¿Porqué expresó que la relación de masas difiere de 1 como si ese fuera el valor esperado en esos sistemas, cuando eso no es así?

Lapasset: Solamente se probaron soluciones con $q=1$ para observar los resultados. Efectivamente, como es de esperar, ese tipo de soluciones resultaron poco favorecidas a juzgar por las sumas de los residuos al cuadrado obtenidas.

Sahade: ¿Qué valores de la relación de masas resultan favorecidos en los cálculos?

Lapasset: En los casos de SY Hor y VY Cet evidentemente valores de q entre 1.5 y 2.1 ó 2.2 parecen ser los más apropiados.

En el caso de AU Phe, aunque la determinación es más incierta, nos inclinamos por valores de la relación de masas en el mismo rango que los anteriores.

Emilio Lapasset y Juan J. Clariá: Observatorio Astronómico de Córdoba, Laprida 854, 5000 Córdoba. Argentina.