



Detección de exoplanetas alrededor de binarias evolucionadas: QS-Virginis

M.N. Ramos^{1,2}, L. Gramajo^{2,3} & C. Giuppone^{2,4}

¹ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

⁴ Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

Contacto / matias.ramos@mi.unc.edu.ar

Resumen / En la actualidad más de 4900 planetas han sido descubiertos alrededor de otras estrellas, sin embargo sólo una fracción de ellos son conocidos por poseer una órbita circunbinaria. Existe un conjunto de planetas no confirmados alrededor de binarias cercanas evolucionadas ECB (por sus siglas en inglés). Las ECB tienen períodos del orden de horas. Estos sistemas son detectados indirectamente por la técnica de variaciones de tiempos de eclipse (ETV o LTT, por sus siglas en inglés). Algunos estudios sugieren que cerca del 90% de la población de estrellas binarias evolucionadas presentan señales de ETV que podrían interpretarse como planetas. En este trabajo se presenta un análisis preliminar de la binaria QS Virginis. Se determina el mejor ajuste para los parámetros de un tercer cuerpo del sistema y se analizan distintas estrategias de análisis de errores. A partir del estudio de la sensibilidad de los ajustes con respecto al conjunto de datos se pudo concluir que en el sistema QS Virginis, los parámetros del mejor ajuste pueden cambiar si se agregan nuevas mediciones precisas de los tiempos de eclipses de la binaria.

Abstract / In the present, around 4900 planets have been discovered around other stars, although only a fraction of them are known to possess circumbinary orbits. There is a set of unconfirmed circumbinary planets that orbit around evolved close binary stars (ECB). The ECB have periods of the order of hours. These systems are indirectly detected by the eclipsing timing variations (ETVs or LTT) technique. Some studies suggest that nearly the 90% of ECBs have ETV signals that can be interpreted as planets. In this preliminar work, we present an analysis of the binary QS Virginis. The parameters of the third body are determined and compared against the published on the literature. From the study of the sensitivity of the fits with respect to the data set, it was possible to conclude that in the QS Virginis system, the parameters of the best fit can change if new precise measurements of the binary eclipse times are added.

Keywords / binaries: close — binaries: eclipsing — planets and satellites: detection

1. Introducción

El sistema binario eclipsante QS Virginis, está formado por una enana blanca y una estrella de secuencia principal de baja masa de tipo espectral M3.5-M4, con masas de $0.7M_{\odot}$ y $0.4M_{\odot}$ respectivamente (O'Donoghue et al., 2003). Estos autores estudiaron el *spín* de la enana blanca y sugirieron que se trata de una binaria cataclísmica hibernante, con un período cercano al *period-gap* de 1.618 hs y una estrella secundaria cercana a la zona de transición entre estrellas con núcleo radiativo y estrellas completamente convectivas. En el caso de un sistema binario aislado sin perturbaciones, el período orbital es constante (≈ 3.6 hs O'Donoghue et al. 2003) y los autores confirmaron que las variaciones del período orbital observadas son compatibles con errores instrumentales. Qian et al. (2009), Parsons et al. (2010) y Almeida & Jablonski (2011) proporcionaron otras posibles explicaciones a esas variaciones en el período orbital, que se fueron descartando al añadir nuevas observaciones o por estudios de estabilidad (Horner et al., 2013).

En este trabajo se presenta un análisis de la compilación de observaciones de tiempos medios de eclipse pri-

marios proporcionadas por Bours (2015). Éstos poseen 105 tiempos de eclipse y consisten de datos medidos por distintos observadores con distinto instrumental. Nuestro objetivo consiste en encontrar los parámetros orbitales de un planeta orbitando a la binaria que puedan explicar las variaciones cíclicas observadas en el período. Analizaremos distintas estrategias para estimar errores de los mejores parámetros obtenidos y su sensibilidad con el intervalo observacional.

2. Construcción del diagrama (O-C)

Cuando el período de la binaria cambia con el tiempo, puede deberse a la presencia de un cuerpo adicional (ver Woltjer 1922) u otros efectos físicos que modifican el mismo período (ver Goździewski et al. 2012, 2015 y las referencias allí mencionadas).

Los modelos que predicen los tiempos de eclipse T son las efemérides lineal y cuadrática. En este trabajo calculamos la diferencia de los tiempos observados y los teóricos para obtener los diagramas (O-C). La forma que tiene la señal (O-C) se puede ver en la siguiente

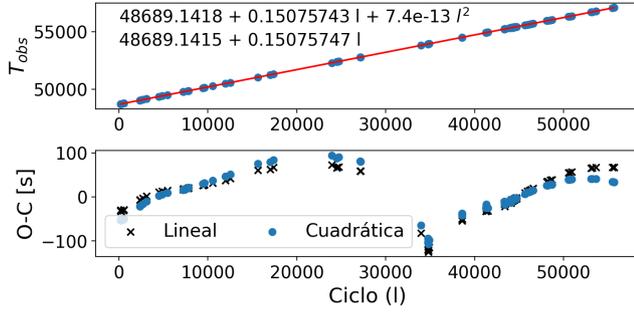


Figura 1: *Panel superior*: tiempos medios de eclipse [BMJD] en función del ciclo en puntos azules y modelos de efemérides en línea roja (indistinguibles). *Panel inferior*: los diagramas (O-C) en función de la efemérides usada.

ecuación:

$$(O - C) \equiv \tau = T_{observado} - T_{calculado}$$

donde $T_{calculado}$ puede ser lineal o cuadrático en el ciclo:

$$T_{calculado} = \begin{cases} T_0 + P_{bin}l & \text{lineal} \\ T_0 + P_{bin}l + \beta l^2 & \text{cuadrática} \end{cases}$$

donde l , P_{bin} , T_0 y β representan el ciclo asociado al eclipse, el periodo orbital de la binaria, el tiempo asociado al eclipse con $l = 0$ y un factor que tiene en cuenta efectos que hagan cambiar P_{bin} de forma lineal con el tiempo, respectivamente (Goździewski et al., 2012).

A partir de las observaciones publicadas por Bours (2015) se construye el diagrama (O-C) asociado a una efemérides lineal y cuadrática. En la Fig. 1 se pueden observar los tiempos de eclipse en función del ciclo (l) y sus correspondientes ajustes de efemérides. En el panel inferior de la Fig. 1, se observa la diferencia significativa de los O-C obtenidos con ambos modelos, a pesar que las diferencias entre los períodos determinados para la binaria se encuentran en la octava cifra significativa. En el resto de este trabajo se analiza el diagrama construido por la efeméride lineal.

3. Modelado de tercer cuerpo

Para modelar la señal en el diagrama (O-C) se utiliza la forma funcional, τ , puede leerse en el panel superior de la Fig. 2 (Goździewski et al., 2012). El modelo supone que la binaria es un cuerpo ubicado en el baricentro de la binaria con masa igual a la masa total estelar, y que el cuerpo masivo que la orbita se mueve sobre una elipse fija. El esquema de minimización utilizado consiste en minimizar la función residuo WRMS siguiendo ideas de Giuppone (2011), lo que implica una aplicación consecutiva de algoritmos numéricos para hallar el mínimo.

La estrategia de minimización con la que obtuvimos mejores resultados consistió en utilizar primero algoritmos genéticos para explorar globalmente todo el espacio de parámetros y encontrar el mínimo global (Charbonneau, 1995, 2002) y luego refinar los resultados con el algoritmo simplex (Nelder & Mead, 1965; Gao & Han, 2012).

En la Fig. 2 se puede observar la curva sintética generada dado nuestro conjunto de mejores parámetros y su asociado residuo (panel inferior). En la señal del residuo

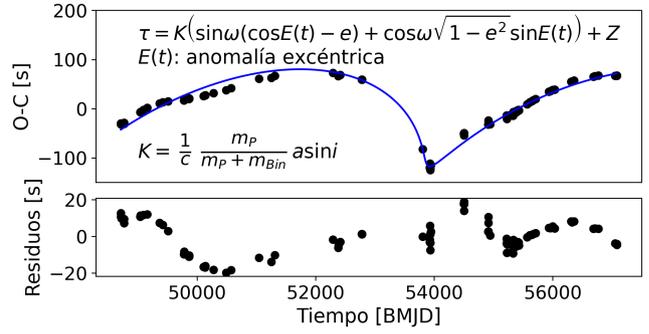


Figura 2: *Panel superior*: diagrama (O-C) y el modelo ajustado, los puntos negros representan las observaciones y la línea azul el modelo ajustado. *Panel inferior*: Residuos.

Tabla 1: Parámetros principales de QS Virginis

Parámetro	1	2	3	4
K [s]	-	-	-	153.72
P [Años]	7.8	14	14.40, 16.99	16.697
e	0.37	0.9	0.62, 0.92	0.9186
ω [°]	38	-	180, 219	214.88
t_0 [BJMD]	48687.5	-	-	53848.6
Z [s]	-	-	-	-101.69

Refs.: 1: Qian et al. (2010), 2: Parsons et al. (2010), 3: Almeida & Jablonski (2011), 4: Este trabajo.

se aprecia una componente periódica que, posiblemente, se pueda modelar como otro compañero adicional. Los parámetros indican que si el planeta tiene la misma inclinación de la binaria, su masa sería de $59.73 M_{Jup}$, lo cual indica una compañera subestelar. En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros obtenidos y su comparación con los de los trabajos recientes en los cuales han utilizado distintos modelos y conjunto de datos, lo que explica la diferencia sustancial en algunos parámetros.

4. Estimación de incertezas

Existen varios enfoques a la hora de determinar incertezas en los parámetros del mejor ajuste. Por un lado los métodos bayesianos como las cadenas de Markov (MCMC) o las componentes de la matriz de Fisher, que arrojan generalmente estimaciones locales de los errores alrededor del mínimo. Por el otro, existen métodos más exploratorios que permiten evaluar el comportamiento de los parámetros en un rango de valores (ver detalles y discusiones en Beaugé et al., 2008; Giuppone et al., 2009).

Utilizamos la herramienta emcee para construir las cadenas MCMC (Foreman-Mackey et al., 2013). Los resultados mostrados en la Fig. 3 fueron construidos iniciando las cadenas muy próximas a la mejor solución, con 128 cadenas de 5000 pasos cada una, quedándonos solo con los últimos 3000 pasos para construir los histogramas, con un tiempo de cómputo de más de 2 horas. Las incertezas así calculadas tienen un error porcentual que no sobrepasa el 0.05%, en general (ver Fig. 3).

Alternativamente, realizamos ajustes consecutivos en una grilla alrededor del mínimo global. Este méto-

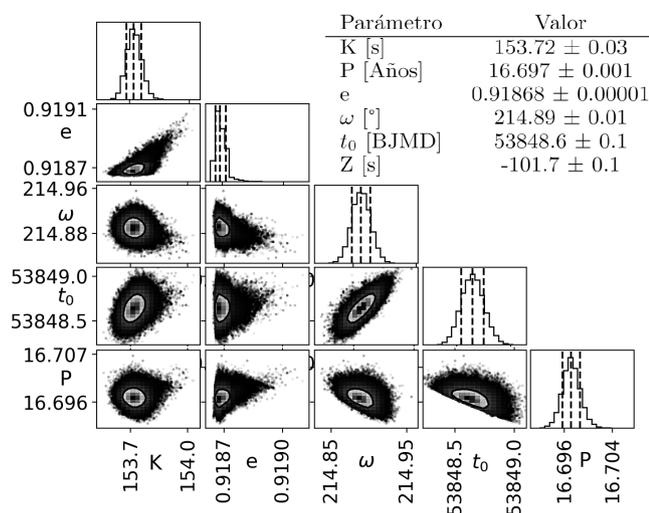


Figura 3: Estimación de incertezas para cada parámetro y sus correlaciones de a pares. Construido con cadenas de Markov.

do consiste en fijar el valor de uno de los parámetros, explorando los valores en la vecindad del valor del mejor ajuste y realizar la minimización con el resto de los parámetros para cada valor fijado (ver Fig. 4). Partiendo de la solución del mínimo absoluto, se explora cada parámetro utilizando sólo el algoritmo Simplex para acelerar el proceso (\sim una hora de cálculo.) Luego, usando el valor teórico para la función WRMS asociado a 1σ (Beaugé et al., 2008), estimamos la incerteza de cada parámetro. En la Fig. 4 se puede observar el resultado del análisis, donde la cruz roja muestra el valor del parámetro para el mejor ajuste. Se puede notar que las incertezas son órdenes mayores a las obtenidas con MCMC y más congruentes con la dispersión de los valores observados en la Tabla 1.

Por último, para intentar entender por qué los ajustes orbitales cambian según los autores, se analiza cómo varían los parámetros ajustados en función del conjunto de datos, tomados en orden cronológico (ver Fig. 5). Los parámetros obtenidos con cada conjunto minimizado cambian a medida que se incorporan observaciones, indicando que hacen falta nuevas para poder determinar de forma más confiable el cuerpo adicional (ver discusión en Beaugé et al., 2008).

5. Discusión y conclusiones

En este trabajo mostramos resultados de las estrategias para modelar la detección de exoplanetas con la técnica ETV y distintos enfoques para analizar los errores en los parámetros orbitales. Aplicamos nuestros códigos para modelar un cuerpo orbitando la binaria QS-Virginis. Construimos los diagramas (O-C) y determinamos los parámetros del posible tercer cuerpo con el modelo de Goździewski et al. (2012). Observamos una señal aparentemente periódica en los residuos del diagrama (O-C) que podría ser debida a un cuerpo adicional. Se determinaron las incertezas mediante el uso de las cadenas de Markov y un método de grillado.

Estudiamos como varía la solución en función del conjunto de datos disponibles (imitando la disponibi-

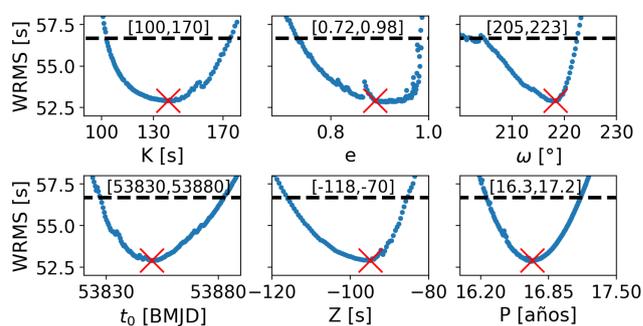


Figura 4: Variación de WRMS con parámetros. La línea a trazos representa el valor de la $WRMS_{1\sigma}$. Los valores entre corchetes representan el rango de parámetros dentro de 1σ y la cruz roja representa el valor asociado al mejor ajuste.

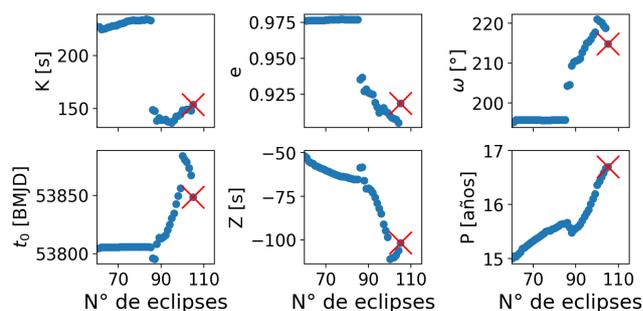


Figura 5: Evolución de parámetros ajustados en función de la cantidad de datos considerados tomados en orden cronológico. Los valores del mejor ajuste (todos los datos) están identificados con una cruz. 4.

lidad de datos observacionales a lo largo del tiempo). Concluimos que existen parámetros como el período del planeta P o su argumento de pericentro ω que cambian considerablemente según el número de observaciones que se consideren, indicando que aún no hay suficientes observaciones para determinar de forma confiable el compañero adicional. Continuaremos nuestro estudio en un artículo más largo en un futuro cercano.

Referencias

- Almeida L.A., Jablonski F., 2011, A. Sozzetti, M.G. Lattanzi, A.P. Boss (Eds.), *The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution*, vol. 276, 495–496
- Beaugé C., et al., 2008, MNRAS, 385, 2151
- Bours M.C.P., 2015, *Detailed studies of white dwarf binaries and their orbital periods*, Ph.D. thesis, University of Warwick
- Charbonneau P., 1995, ApJS, 101, 309
- Charbonneau P., 2002, An introduction to genetic algorithms for numerical optimization, Tech. rep.
- Foreman-Mackey D., et al., 2013, PASP, 125, 306
- Gao F., Han L., 2012, Computational Optimization and Applications, 51, 259
- Giuppone C.A., 2011, *Orbital adjustments and dynamics of extrasolar planetary systems*, Ph.D. thesis, National University of Córdoba, Argentina
- Giuppone C.A., et al., 2009, ApJ, 699, 1321
- Goździewski K., et al., 2012, MNRAS, 425, 930
- Goździewski K., et al., 2015, MNRAS, 448, 1118
- Horner J., et al., 2013, MNRAS, 435, 2033
- Nelder J.A., Mead R., 1965, The Computer Journal, 7, 308
- O’Donoghue D., et al., 2003, MNRAS, 345, 506
- Parsons S.G., et al., 2010, MNRAS, 407, 2362
- Qian S.B., et al., 2009, ApJL, 706, L96
- Qian S.B., et al., 2010, MNRAS, 401, L34
- Woltjer J. J., 1922, BAN, 1, 93