



Análisis de la velocidad radial para un grupo de exoplanetas Hacia la caracterización de sus atmósferas

R.G. Miculán^{1,2}, R.F. Díaz³ & A.F. Torres^{1,2}

¹ *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

² *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

³ *International Center for Advanced Studies e Instituto de Ciencias Física*

Contacto / rmiculan@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Miles de exoplanetas han sido descubiertos en tan sólo algunas décadas y su número sigue en ascenso, así como la cantidad de misiones dedicadas a detectar más planetas. La diversidad que encontramos entre ellos nos desafía a estudiarlos en profundidad y conocer en detalle sus propiedades físicas, cómo han sido formados y cuáles son los mecanismos que rigen su evolución. Motivados por los recientes avances en este tema, identificamos un grupo de júpiteres calientes para caracterizar sus atmósferas. En un trabajo anterior publicamos el análisis conjunto de datos fotométricos propios obtenidos con telescopios argentinos y del satélite *TESS* para la muestra de exoplanetas seleccionada. En este trabajo, nos centramos en los datos de velocidad radial existentes en la literatura y los analizamos a partir de un código propio a fin de comparar nuestros resultados con los ya publicados y avanzar hacia el estudio simultáneo de toda la información existente.

Abstract / Thousands of exoplanets have been discovered in just a few decades. The number of known planets increases at an ever faster pace as well as the missions dedicated to detect more planets. The diversity that we find challenges us to study them in depth and to know in detail their physical properties, how they have been formed and which are the mechanisms that govern their evolution. Motivated by the recent advances in this area, we identified a group of hot jupiters that fulfill the necessary conditions to characterize in the future their atmospheres. In a previous work we published a photometric analysis of the selected sample of exoplanets based on data obtained with Argentine telescopes and recently released by the *TESS* mission. In this work, we focus on the radial velocity data existing in the literature and we re-analyze them using a code of our own to compare our results with the published ones and advance to the simultaneous study of all the existing information.

Keywords / planets and satellites: atmospheres — planets and satellites: fundamental parameters — planets and satellites: gaseous planets

1. Introducción

Desde hace tan sólo algunas décadas, cuando conocimos la existencia del primer exoplaneta orbitando una estrella de tipo solar (Mayor & Queloz, 1995), la detección de planetas extrasolares ha ido en continuo aumento. Con misiones espaciales y campañas de observación exclusivas para la búsqueda exoplanetaria, actualmente sabemos de la existencia de aproximadamente cuatro mil exoplanetas. Si bien hay varias técnicas que nos permiten detectarlos dos de ellas han sido las más exitosas.

En primer lugar, la técnica de tránsitos exoplanetarios (Charbonneau et al., 2000), con la cual a partir del ajuste de modelos de curvas de luz a los datos fotométricos obtenidos durante un tránsito (Mandel & Agol, 2002), podemos derivar información acerca del tamaño del planeta, la inclinación y el tamaño de la órbita, entre otros parámetros. Además, si el exoplaneta observado posee atmósfera, durante un tránsito primario podemos estudiar la interacción de la radiación de la estrella huésped con las capas externas de dicha atmósfera. Utilizando esta técnica, conocida como espectroscopía de transmisión, podemos inferir la composición química de la atmósfera exoplanetaria (p.ej. von Essen et al.

2017), y caracterizar la diversidad de exoplanetas a fin de responder grandes interrogantes actuales tales como, por ejemplo, los concernientes a la naturaleza de los procesos de formación y evolución de los exoplanetas (Madhusudhan et al., 2017; Gaudi et al., 2020).

La segunda técnica fructífera en la detección exoplanetaria es la técnica de velocidades radiales que se basa en la medición de los cambios en la velocidad radial de la estrella huésped. La técnica consiste en observar una estrella mediante espectroscopía de alta resolución, y determinar si existen corrimientos periódicos del espectro de la misma hacia el azul y hacia el rojo (la estrella se acerca y aleja de nosotros respectivamente) que indiquen la presencia de un compañero orbitándola (Murray & Correia, 2010). Dado que la amplitud de esta variabilidad depende de una relación entre la masa de la estrella y del planeta y de la inclinación de la órbita del mismo, podemos estimar una cota mínima para la masa de dicho compañero.

La combinación de las dos técnicas reseñadas constituye un poderoso enfoque, ya que combinando la inclinación de la órbita y el radio del planeta determinados mediante tránsitos con la velocidad radial es posible es-

	HA	CO	C	F	H
HATS-13		7(40)		23(30)	10(20)
HATS-33	3(7)	5(10)	11(10)	4(10)	
WASP-122		17(7)			
WASP-124		41(40)			

Tabla 1: Número de observaciones disponibles para cada objeto e instrumento. Entre paréntesis se informa el error medio σ [m s^{-1}].

timar la masa del planeta y por ende, su densidad.

En un estudio previo realizamos el análisis de las curvas de luz obtenidas con telescopios argentinos y aquellas obtenidas por el *Transiting Exoplanets Survey Satellite (TESS)*, para cuatro exoplanetas transitantes que identificamos como buenos candidatos para estudiar sus atmósferas mediante espectroscopía de transmisión. Como resultado, obtuvimos los parámetros físicos y orbitales de dichos exoplanetas (Miculán et al., 2020). A fin de continuar con la caracterización de dichos exoplanetas, en el presente trabajo consideramos solamente los datos de velocidad radial disponibles en la literatura y derivamos los parámetros asociados a dichas curvas, corroborando el buen funcionamiento de nuestro código.

2. Datos adquiridos y análisis

2.1. Selección de la muestra

Con vistas al estudio de sus atmósferas, elegimos cuatro exoplanetas (ver el detalle de la selección en Miculán et al. (2020)) observables desde el hemisferio sur: WASP-122, WASP-124, HATS-13 y HATS-33, descubiertos por Turner et al. (2016), Maxted et al. (2016), Mancini et al. (2015) y de Val-Borro et al. (2016), respectivamente.

2.2. Recopilación de datos espectroscópicos.

En este trabajo recopilamos, para cada objeto, los datos de velocidad radial disponibles en las publicaciones anteriormente citadas, adquiridos utilizando distintos espectrógrafos: HARPS(HA), montado en el telescopio de 3.6 m de ESO en La Silla (Chile); CORALIE(CO) en el telescopio suizo Euler de 1.2 m ubicado en La Silla (Chile); FEROS(F) en el telescopio MPG/ESO de 2.2 m ubicado en La Silla (Chile); CYCLOPS2(C) en el telescopio anglo-australiano de 3.9 m (Australia) y el espectrógrafo HDS(H) en el telescopio Subaru de 8.2 m en Mauna Kea (Hawaii).

2.3. Ajuste y análisis de los datos

Los datos fotométricos de estas estrellas han sido analizados en Miculán et al. (2020). En este trabajo estudiamos con el código PASTIS (Díaz et al., 2014) los datos recopilados de velocidad radial disponibles para cada objeto. El código PASTIS modela la velocidad radial con una órbita kepleriana y obtiene muestras de la distribución posterior de sus parámetros con el método de cadenas de Markov de Monte Carlo. Para ello,

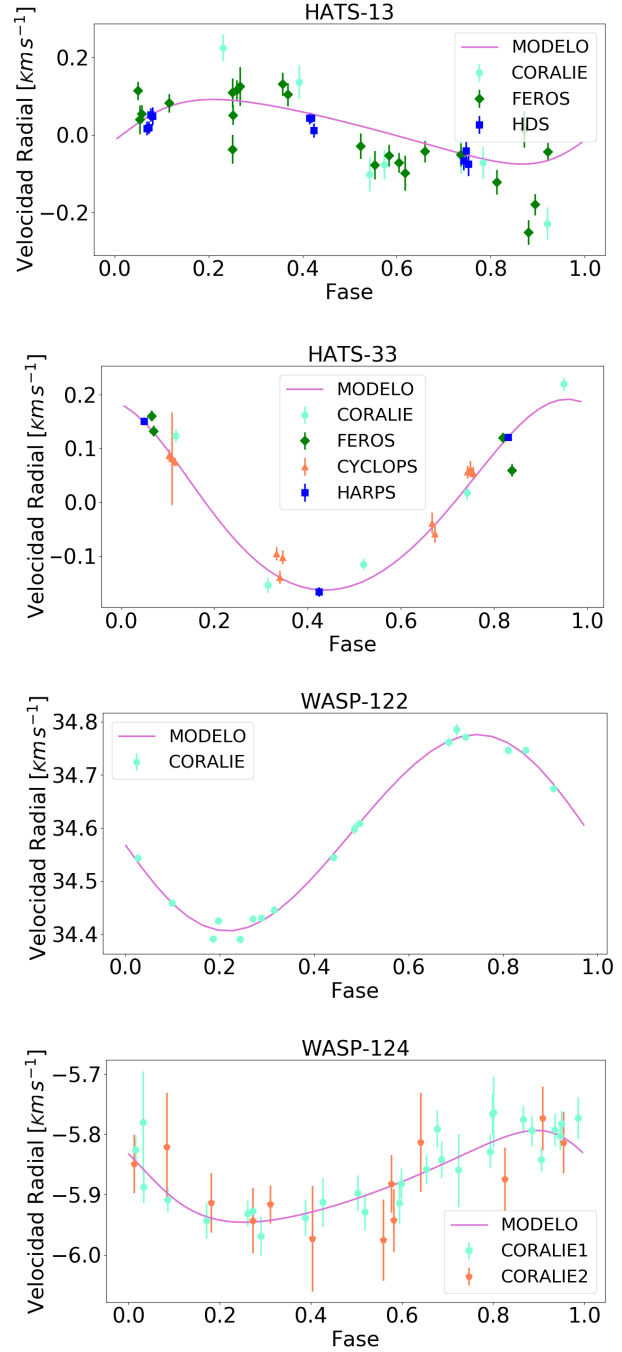


Figura 1: Ajuste a la curva de velocidad radial para los cuatro exoplanetas considerados. Los puntos de distintos colores son los datos disponibles de la literatura obtenidos con distintos telescopios e instrumentos. En cada caso, la curva continua magenta es la ajustada en este trabajo tomando el estimador de máximo-a-posteriori (MAP) para los parámetros del modelo de cada objeto. Los valores de eccentricidad MAP son: 0.22 para HATS-13, 0.10 para HATS-33, 0.045 para WASP-122 y 0.26 para WASP-124.

usamos 10 cadenas con 300 000 iteraciones cada una. A partir de estas muestras, pueden calcularse valores medios e intervalos de confianza de cada parámetro. Como las órbitas son aproximadamente circulares, se parame-

trizó la velocidad radial usando la longitud media en una época dada, $L0$. Además de los parámetros de las órbitas keplerianas, se ajustó la amplitud de un ruido blanco adicional, σ_{jit} , para cada instrumento, que se sumó cuadráticamente al error de cada medición, σ_i , de forma que el error final del dato i es $\Sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{\text{jit}}^2}$.

3. Resultados y Conclusiones

En el análisis de las cadenas utilizadas todas parecen haber convergido a la misma región del espacio de parámetros. Luego de descartar el 20% inicial de las mismas, obtuvimos los parámetros que caracterizan la curva de velocidad radial para cada exoplaneta que conforma nuestra muestra. En la Fig. 1 se muestra el ajuste a la curva de velocidad radial para cada uno de los exoplanetas considerados. En la Tabla 2 se reportan los valores medios y los desvíos estándar de cada parámetro, así como nuestros resultados con sus errores y los valores previos obtenidos de la literatura. Solo se informa el resultado para aquellos parámetros que no son significativamente diferentes de cero*.

Como conclusión general destacamos que los resultados obtenidos en este trabajo están en excelente acuerdo con los informados en la literatura previa. Asimismo, consideramos nuestros resultados más realistas debido a que no fijamos la eccentricidad en un valor nulo, como en algunos casos de estudios previos. Verificamos así que nuestro código funciona correctamente para este tipo de estudios, permitiéndonos avanzar a realizar el ajuste de todos los datos fotométricos y espectroscópicos de manera simultánea.

Referencias

- Charbonneau D., et al., 2000, *ApJL*, 529, L45
de Val-Borro M., et al., 2016, *AJ*, 152, 161
Díaz R.F., et al., 2014, *MNRAS*, 441, 983
Gaudi B.S., Christiansen J.L., Meyer M.R., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2011.04703
Madhusudhan N., et al., 2017, *MNRAS*, 469, 4102
Mancini L., et al., 2015, *A&A*, 580, A63
Mandel K., Agol E., 2002, *ApJL*, 580, L171
Maxted P.F.L., et al., 2016, *A&A*, 591, A55
Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355
Miculán R.G., et al., 2020, *BAAA*, 61B, 24
Murray C.D., Correia A.C.M., 2010, *Keplerian Orbits and Dynamics of Exoplanets*, 15–23
Turner O.D., et al., 2016, *PASP*, 128, 064401
von Essen C., et al., 2017, *A&A*, 603, A20

*Consideramos que un parámetro no es significativamente diferente de cero cuando su intervalo de máxima densidad al 95% (95%-HDI) contiene al cero, se reporta el límite superior con 95% de confianza

HATS-13		
	Mancini et al. (2015)	Este trabajo
P	$3.0440499 \pm 2.7 \times 10^{-6}$	$3.044049 \pm 1.0 \times 10^{-4}$
K	0.078 ± 0.010	$0.0811 \pm 8.5 \times 10^{-3}$
Época		2456079.31206
ecc	< 0.181	< 0.421
σ_{COjit}	108 ± 41	169 ± 71
σ_{Fjit}	62 ± 14	65 ± 13
σ_{Hjit}	0.0 ± 4	< 9.6
L0	—	172.9 ± 9.4
HATS-33		
	de Val-Borro et al. (2016)	Este trabajo
P	$2.5495551 \pm 6.1 \times 10^{-6}$	$2.54982 \pm 9.7 \times 10^{-4}$
K	$0.1701 \pm 6.8 \times 10^{-3}$	$0.1708 \pm 8.0 \times 10^{-3}$
Época		2457161.3027
ecc	< 0.080	< 0.21
σ_{HAjit}	< 192	28 ± 24
σ_{COjit}	46 ± 31	52 ± 23
σ_{Fjit}	< 86.5	50 ± 24
σ_{Cjit}	19.4 ± 7.22	< 35
L0	— — —	261.6 ± 3.4
WASP-122		
	Turner et al. (2016)	Este trabajo
P	$1.710056 \pm 3.2 \times 10^{-6}$	$1.71004 \pm 8.8 \times 10^{-5}$
K	$0.185 \pm 2.3 \times 10^{-3}$	$0.185 \pm 3.9 \times 10^{-3}$
Época		2457161.3027
ecc	0 (adoptado, 0.08 at 2σ)	< 0.09
σ_{COjit}	5.1 ± 0.2	12 ± 3.6
L0	—	301.3 ± 47
WASP-124		
	Maxted et al. (2016)	Este trabajo
P	$3.372650 \pm 1 \times 10^{-6}$	$3.372662 \pm 9.9 \times 10^{-5}$
K	$0.077 \pm 8 \times 10^{-3}$	$0.077 \pm 6.3 \times 10^{-3}$
Época		2457161.3027
ecc	< 0.017	< 0.4
σ_{CO1jit}	11.5	< 26
σ_{CO2jit}	0	< 52
L0	—	77.3 ± 6.8

Tabla 2: Se listan el período P [días], la semiamplitud K [km s^{-1}], la época [JD], la eccentricidad ecc, el *jitter* σ_{jit} [m s^{-1}] para los distintos instrumentos y la longitud media de la época L0 [grados]. En el caso del período P, nuestros errores son mayores que los valores característicos de la literatura, ya que no consideramos los datos fotométricos. Los dos valores reportados para el *jitter* de CORALIE en el caso de WASP-124 corresponden a observaciones tomadas antes y después de una actualización del instrumento.