DETECCIÓN Y ANÁLISIS DEL TRÁNSITO DEL EXOPLANETA WASP-10B

D. Serquera
(dserquera@gmail.com)

En este artículo presento la detección de la curva de luz del tránsito del exoplaneta WASP-10b obtenida con un equipo amateur modesto el pasado 27 de octubre. También se muestra el ajuste de la curva al modelo del que se extraen los parámetros del planeta y de su estrella. Por ultimo se comparan con los resultados obtenidos por observadores profesionales.

Introducción

La observación amateur del tránsito de exoplanetas es una actividad que combina la parte experimental de detección fotométrica del cambio de brillo de la estrella con el análisis matemático de los datos obtenidos mediante un sencillo modelo de eclipse. Los datos obtenidos por el observador amateur contribuyen a refinar los sistemas ya conocidos, a detectar nuevos exoplanetas, a confirmar candidatos y excluir falsos positivos. Esta ultima contribución es de especial relevancia en el proyecto TESS de la NASA (https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite), en el que se utiliza una cámara de gran campo y baja resolución podrá detectar miles de candidatos a exoplanetas que tendrán que ser confirmados por observaciones terrestres (https://astrodennis.com/NEAF2018TESSpresentation.pdf).

Con un equipo mediano y con buenos cielos sin contaminación lumínica el observador amateur de La Safor podrá descubrir nuevos exoplanetas y confirmar los candidatos de la NASA. En este artículo explico de manera somera como he obtenido la curva de luz del tránsito de WASP-10b, un exoplaneta situado en la constelación de Pegaso a 293,55 años luz con un radio similar al de Júpiter orbitando alrededor de una estrella más pequeña que el Sol de magnitud V=12,7.

Para poder realizar observaciones de exoplanetas recomiendo que se realice el curso de la AAVSO y que se consulte la guía practica para la observación de exoplanetas de Dennis M. Conti que se puede encontrar en www.astrodennis.com, este artículo se ha realizando siguiendo esta valiosa guía y tras superar el curso de observación de exoplanetas de la AAVSO.

Materiales y Métodos.

El tubo óptico empleado es un TS-Optics 10” f/4 UNC Newtoniano. La particularidad de este tubo óptico es que está hecho de carbono y posee un espejo de cuarzo, con ésto es un tubo muy ligero y las propiedades térmicas del cuarzo fundido, similares a las de zerodur, hacen que se mantenga el enfoque de la estrella durante toda la exposición, en este caso más de tres horas con un aumento considerable de la masa de aire. Es un tubo bastante rápido lo que favorece un tiempo de exposición corto para poder obtener más puntos en la curva y es ligero lo que facilita la precisión en el seguimiento, cuestión importante para evitar variaciones en los foto-detectores y desplazamientos sobre donuts difíciles de corregir con los flats. Aquí entra en consideración la montura, que debe ser de gama media, alta. En este caso yo utilicé una Skywatcher NEQ 6 pro, que como veremos queda un poco floja para mantener el seguimiento, pienso que fundamentalmente por el volumen y los problemas de flexión más que por el peso. La cámara empleada es una ZWO ASI 16000 MMc refrigerada a -20 C, ganancia 204 donde se muestra perfectamente lineal. Esta cámara es accesible, mucho menos cara que una CCD y las pruebas de linealidad que he realizado son correctas. Se utiliza un filtro fotométrico V Johnson

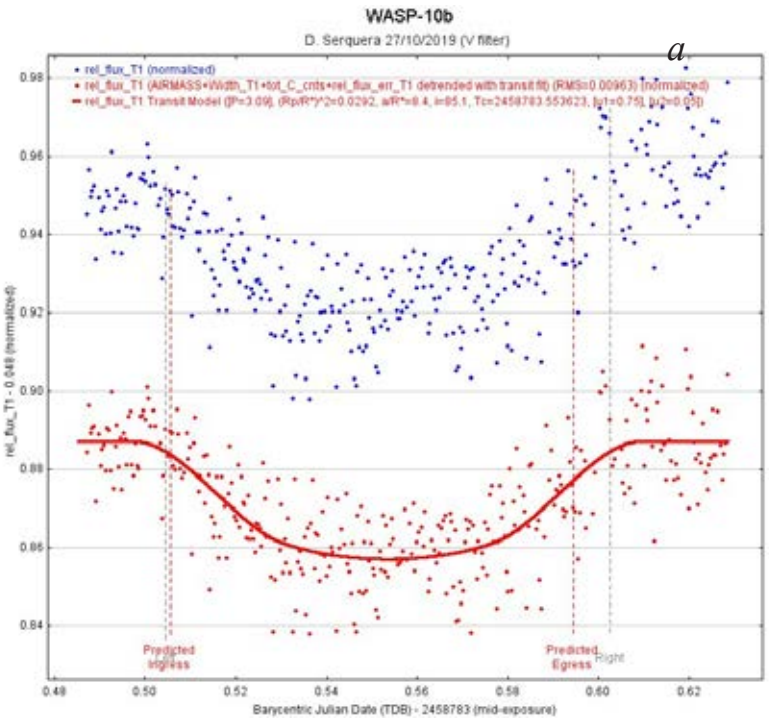
para estandarizar y comparar con otros datos, aunque no sea imprescindible para detectar la caída de brillo de la estrella (no es necesario calcular la magnitud estelar). Tiempo de exposición de 25 segundos. Se utilizó una cámara de auto-guiado QHY 5 II. El software de captura es APT V.3.71, software de auto-guiado PHD 2 y el software de análisis es AstroImageJ (https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/153/2/77). Para la planificación de la observación consulto la Exoplanet Transit Database (http://var2.astro.cz/ETD/) y para el ajuste y análisis de la curva obtuve los parámetros de NASA Exoplanet Archive (https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/) y EXOFAST para los coeficientes de oscurecimiento en el limbo (Quadratic Limb darkening coefficient). Se utilizó el modelo matemático de Mandel & Agol para el ajuste (https://iopscience.iop.org/article/10.1086/345520/fulltext/)

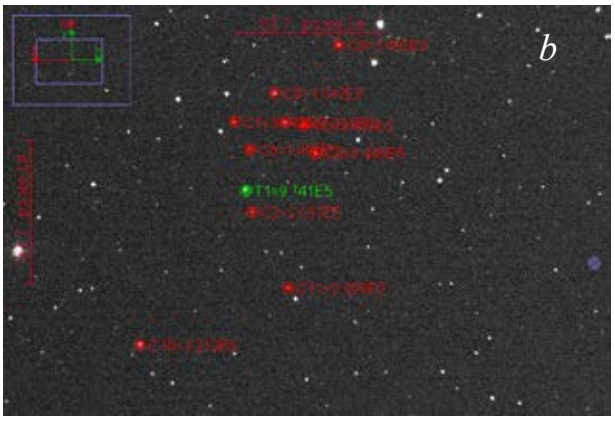
La apertura para la fotometría diferencial fue de 9, 16 y 24 pixeles para cada uno de los círculos, siendo esta apertura la que menor RMS dio en el ajuste de la curva (Fig. 1 b, c).

El reloj interno del ordenador fue sincronizado cada 10 minutos mediante Dimension 4 (www.thinkman.com/dimension4/default.htm). Por supuesto, Darks, Flats y Bias obtenidos in situ.

Resultados.

En la Fig. 1a podemos observar la curva de luz en azul y el ajuste de la curva en rojo. Las lineas a trazos en vertical señalan el punto de ingreso y salida previstos en rojo y en gris los puntos que mejor se ajustaron a los datos. Las transiciones de ingreso y salida son bien visibles y características para una ocultación por un exoplaneta, con un valle ancho con dos vertientes con pendientes distintas debido a los diferentes coeficientes de oscurecimiento en el limbo (U1=0.74594141, U2= 0.046662388).





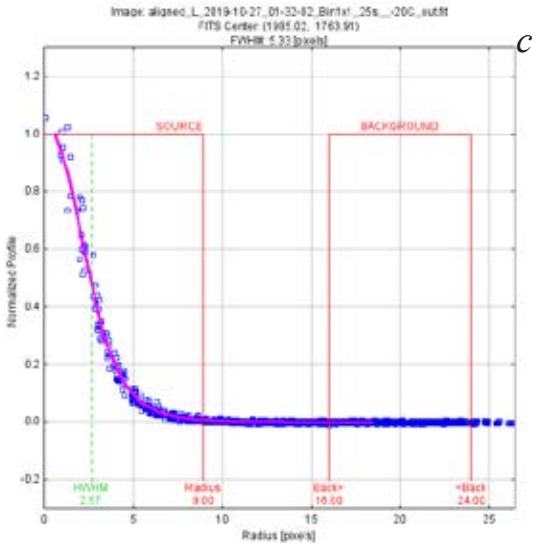


Fig.1 ***a.*** Gráfica de flujo relativo frente a la fecha juliana baricentrica. En azul se representa la curva de luz normalizada y en rojo el ajuste al modelo de transito.

b. Se muestran los anillos empleados en la fotometría diferencial y las estrellas de comparación. Cada una de estas estrellas fue incluida solo si el RMS de ajuste a la curva disminuía.

c. Perfil del contorno del punto de luz de WASP-10 empleado para determinar el diámetro de los anillos de fotometría.

Durante el tránsito se produjo la entrada de nubes finas en la región de salida por lo que los datos presentan mayor ruido y error Fig.2a

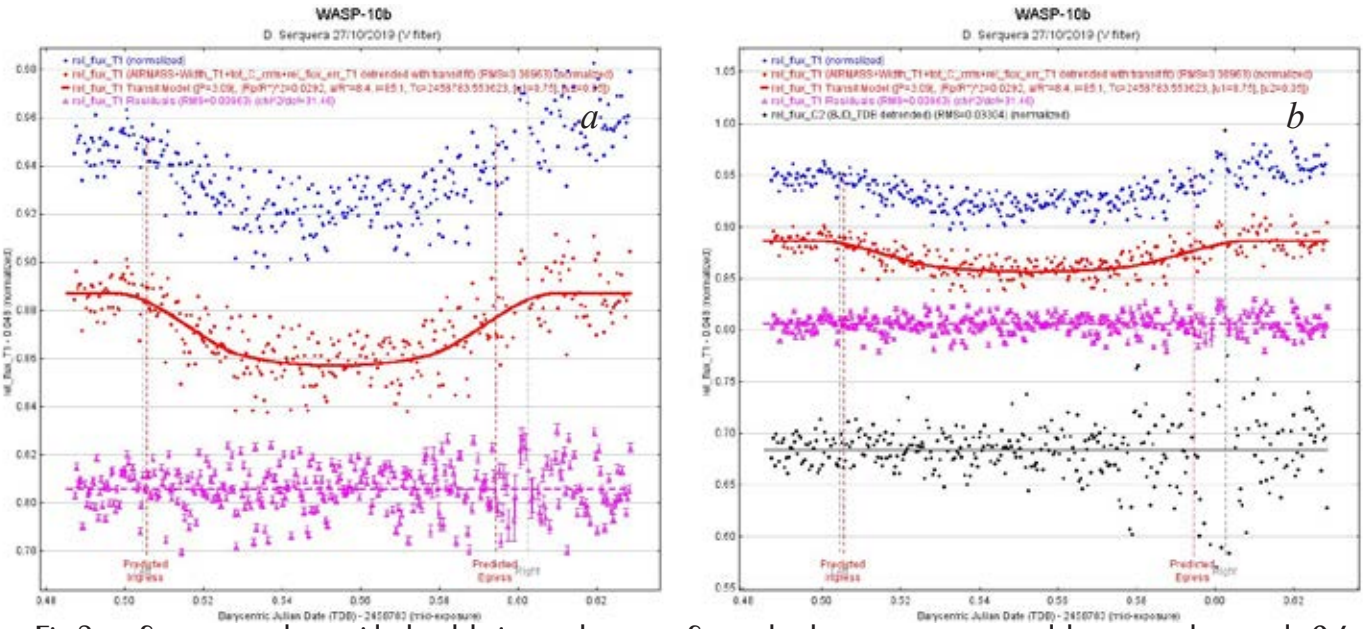


Fig.2 a. Se muestran los residuales del ajuste a la curva. Se puede observar un aumento del error en la zona de 0.6 BJD_TDB consecuencia de la entrada de nubes y la alteración de la señal ruido y un mal seguimiento de la montura como consecuencia

b. Se muestra en negro el flujo relativo de la estrella C2 de comparación. Se puede observar que su flujo no varia con el eclipse y que hay una zona problemática en 0.6 BJD_TDB consecuencia de las nubes.

En la Fig.3 podemos observar en verde el aumento de la masa de aire a lo largo del tránsito.

Este es un parámetro importante para determinar el tiempo de exposición, intentando tener una buena relación de señal-ruido durante toda la sesión. La masa de aire es uno de los parámetros con los que vamos a corregir la curva para quitarle la tendencia (detrend parameter).

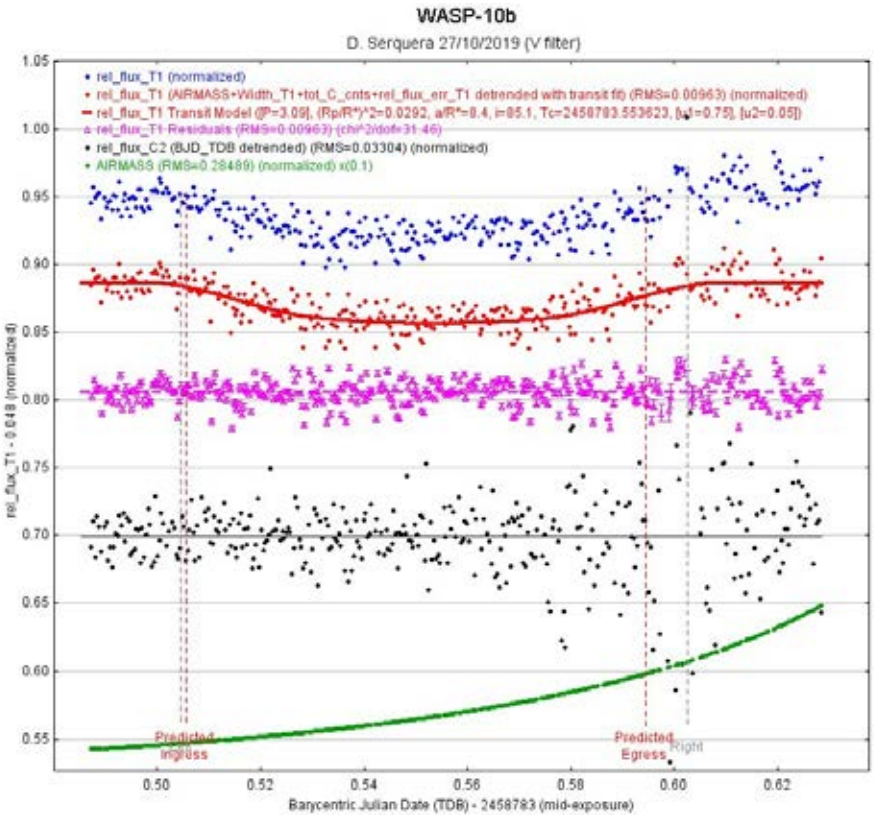


Fig.3 En verde se puede observar el aumento de la masa de aire on el aumento del BJD_TDB. Este es uno de los principales parámetros empleados para eliminar la tendencia en los datos derivada de un factor externo al eclipse.

En la Fig.4 presento el panel de ajuste de la curva obtenido con AstroImageJ.

Los recuadros verdes indican la convergencia del ajuste a los datos.

El valor de Chi cuadrado respecto a los grados de libertad (chi^2 /dof) indica que el ajuste no es muy fiable, sin embargo, vemos que el dato obtenido para la profundidad del eclipse es similar al esperado y que el radio del planeta de 1,16 radios de Júpiter se sitúa en el rango de radios publicados de 1,067, 1,28 y 1,08 (Ver Fig. 5).

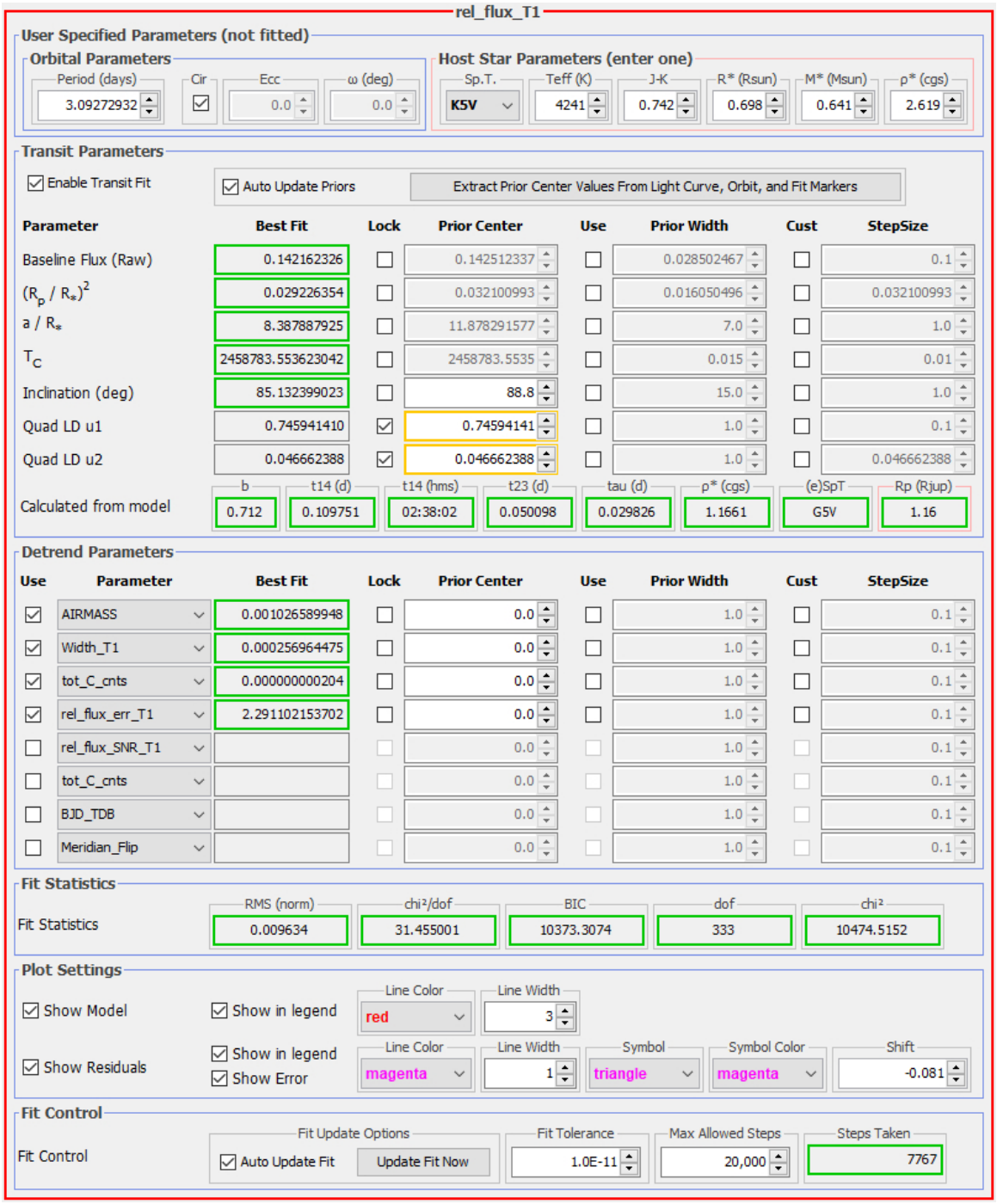


Fig 4. Panel de ajuste al modelo de transito exoplanetario de AstroImageJ. Se divide en seis secciones: Parámetros orbitales introducidos por el usuario a partir de los datos ya conocidos, parámetros del transito, parámetros anti tendencia, estadísticas del ajuste y control del ajuste. Las estrellas de referencia en el análisis fotométrico se eligen en función de sus contribución a la disminución del RMS, los parámetros anti tendencia se eligen si disminuyen en mas de dos el BIC. $(R_p/R_*)^2$ representa la relación entre el radio del planeta y el radio de la estrella que corresponde a la profundidad del valle de la curva de luz. a/R_* Representa el semieje mayor de la orbita del planeta en unidades de radio estelar. T_c es el punto medio del transito en día juliano baricentrico (TDB_BJD). R_p representa el radio del planeta en unidades de radio jupiterino. Para el resto de parámetros referirse al manual de AstroImageJ (https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/153/2/77).

EXOFAST | WASP 10 b | WASP10b_EXOFAST | WASP-10b: a 3M<SUB>J<, | UID_0300066_data_AXA_0(| NASA Exoplanet Archive

https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

NASA Exoplanet Archive
NASA Exoplanet Science Institute

Home | About Us | Data | Tools | Support | Login

CONFIRMED PLANET OVERVIEW PAGE

FinderChart | 2MASS

Object and Aliases

Default Alias	Aliases		
WASP-10 b	1SWASP J231558.30+312746.4 b	2MASS J23155829+3127462 b	WISE J231558.31+312745.9 b

NASA Exoplanet Archive Links

Planet	Related Overviews				Transit Service
	Confirmed		Kepler Pipeline		
WASP-10 b	Planet	Host			WASP-10 b Transits

Stellar Properties

Effective Temperature (K)	Surface Gravity ($\log_{10}(cm/s^2)$)	Luminosity ($\log_{10}(L_{sun})$)	Metallicity (dex)	Metallicity Ratio	Radius (R_{sun})	Mass (M_{sun})	Density (g/cm^3)	Age (Gyr)	Reference
4877.8833 $^{+173.8670}_{-146.6230}$	null	-0.64028913 $^{+0.00340871}_{-0.00343969}$	null	null	0.6699544 $^{+0.0421677}_{-0.0453222}$	null	null	null	Gaia DR2
4680±100	null	null	0.030±0.200	null	0.703±0.036	0.752±0.081	null	7.0 $^{+0.0}_{-3.0}$	Bonomo et al. 2017
4675±100	4.63±0.01	null	0.030±0.200	[Fe/H]	null	null	null	null	Sada & Ramón-Fox 2016
4700	null	null	null	null	null	null	null	0.6	Salz et al. 2015
null	null	null	0.050±0.080	[Fe/H]	null	0.75±0.03	null	null	Knutson et al. 2014
4645±125	4.27±0.39	null	0.04±0.05	[Fe/H]	1.08±0.71	0.76±0.13	2.16±0.31	null	Mortier et al. 2013
4675±100	4.620±0.050	null	0.030±0.200	[Fe/H]	0.703±0.039	0.752±0.094	3.04±0.44	null	Southworth 2010
4675±100	null	null	null	null	0.698±0.012	0.75±0.040	null	null	Johnson et al. 2009
4675±100	4.40±0.20	null	0.030±0.200	[M/H]	0.775 $^{+0.043}_{-0.048}$	0.703 $^{+0.068}_{-0.080}$	2.13 $^{+0.35}_{-0.28}$	null	Christian et al. 2009

EXOFAST | WASP 10 b | WASP10b_EXOFAST | WASP-10b: a 3M<SUB>J<, | UID_0300066_data_AXA_0(| NASA Exoplanet Archive

https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

NASA Exoplanet Archive
NASA Exoplanet Science Institute

Home | About Us | Data | Tools | Support | Login

Planet Orbital Properties

Planet	Period (days)	Semi-Major Axis (AU)	Inclination (deg)	Eccentricity	Time of Periastron Passage (days)	Transit Time System Reference Frame	Longitude of Periastron (deg)	RV Amplitude Value (m/s)	Date of Orbital Solution	Reference
b	3.09272932±0.00000032	0.0378 $^{+0.0015}_{-0.0014}$	88.81±0.40	0.0601 $^{+0.0064}_{-0.0046}$	null	BJD-TDB	151.9 $^{+11.0}_{-8.9}$	543±10	null	Bonomo et al. 2017
b	3.0927295±0.0000003	null	88.26 $^{+0.28}_{-0.22}$	0.0473±0.0032	null	BJD-TDB	166 $^{+10}_{-9}$	null	null	Sada & Ramón-Fox 2016
b	3.1	0.038	null	0	null	null	null	null	null	Salz et al. 2015
b	null	null	null	0.0473 $^{+0.0034}_{-0.0029}$	null	null	165.6 $^{+9.4}_{-8.6}$	568.8 $^{+7.0}_{-8.7}$	null	Knutson et al. 2014
b	3.0927616±0.0000010	0.0378±0.0016	88.81±0.40	null	null	null	null	553.1±7.5	null	Southworth 2010
b	3.0927636 $^{+0.00000594}_{-0.0000250}$	0.0369 $^{+0.00122}_{-0.0014}$	86.9 $^{+2.8}_{-3.3}$	0.059 $^{+0.314}_{-0.304}$	null	BJD	167.1 $^{+12.7}_{-14.0}$	520.1 $^{+8.4}_{-10.0}$	null	Christian et al. 2009
b	3.0927616±0.0000112	0.03781 $^{+0.00067}_{-0.00067}$	88.49 $^{+0.22}_{-0.17}$	null	null	HJD	null	533.1±7.5	null	Johnson et al. 2009

Planet Parameters

Planet	M sin(i)		Mass		Radius		Density	Equilibrium Temperature	Insolation Flux Value	Reference
	(Jupiter Mass)	(Earth Mass)	(Jupiter Mass)	(Earth Mass)	(Jupiter Radii)	(Earth Radii)	(g/cm^3)	(K)	(Earth Flux)	
b	null	null	3.21 $^{+0.23}_{-0.24}$	1020 $^{+73}_{-78}$	1.067±0.064	11.96±0.72	3.28 $^{+0.71}_{-0.58}$	null	null	Bonomo et al. 2017
b	null	null	null	null	null	null	null	null	null	Sada & Ramón-Fox 2016
b	null	null	3.2	1017.0	1.1	12.3	3.1	950	null	Salz et al. 2015
b	null	null	3.37±0.11	1071±35	null	null	null	null	null	Knutson et al. 2014
b	null	null	3.16±0.26	1004±83	1.067±0.068	11.96±0.76	3.46±0.52	972.0±31.0	null	Southworth 2010
b	null	null	2.96 $^{+0.20}_{-0.17}$	941 $^{+70}_{-54}$	1.280 $^{+0.077}_{-0.091}$	14.35 $^{+0.86}_{-1.02}$	1.90 $^{+0.41}_{-0.38}$	null	null	Christian et al. 2009
b	null	null	3.15 $^{+0.13}_{-0.11}$	1001.12 $^{+41.32}_{-34.96}$	1.080±0.020	12.106±0.224	4.14±0.27	1370±50	null	Johnson et al. 2009

Planet Transit Properties

Planet	Depth (perc)	Duration (hours)	Mid-Point (days)	Impact Parameter	Occultation Depth (perc)	Ratio of Distance to Stellar Radius	Ratio of Planet to Stellar Radius	Reference
b	null	null	2454664.038090±0.000048	null	null	null	null	Bonomo et al. 2017
b	null	null	2454664.03804±0.00006	null	null	11.55 $^{+0.18}_{-0.17}$	0.1605 $^{+0.0011}_{-0.0012}$	Sada & Ramón-Fox 2016
b	null	null	null	null	null	null	null	Salz et al. 2015
b	null	null	null	null	null	null	null	Knutson et al. 2014
b	null	null	null	null	null	11.561 $^{+0.576}_{-0.523}$	null	Southworth 2010
b	2.9±0.1	2.35634 $^{+0.04580}_{-0.03020}$	2454357.85808 $^{+0.00041}_{-0.00036}$	0.568 $^{+0.054}_{-0.084}$	null	null	null	Christian et al. 2009
b		0.0078	2454664.037295±0.000082	0.299 $^{+0.039}_{-0.043}$	null	11.65 $^{+0.28}_{-0.13}$	0.15918 $^{+0.00050}_{-0.00115}$	Johnson et al. 2009

https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html

Fig.5 Se muestran dos capturas de pantallas del archivo de la NASA de exoplanetas donde se sumarizan los parámetros conocidos para WASP-10b. De aquí se obtiene el periodo orbital y el radio estelar introducidos en panel de ajuste de AstroImageJ.

Conclusiones

Para próximas observaciones del tránsito de WASP-10b reduciré el tiempo de exposición o la ganancia para encontrar un mayor numero de estrellas de comparación en rango lineal. La dificultad estriba en encontrar estrellas de comparación con un flujo de luz similar a la estrella a analizar y dentro del rango lineal.

Con los parámetros utilizados de 25 segundos de exposición y 204 de ganancia muchas de las estrellas estaban cerca de la zona de no linealidad y saturación y el resto muy por debajo del flujo de luz para WASP-10.

La precisión en el auto-guiado tendrá que mejorarse aunque lo veo difícil sin un cambio de montura. Las condiciones de seeing fueron muy buenas en esta observación al no haber luna, sin embargo la fatalidad quiso que justo en el momento de salida del eclipse pasaran unas finas nubes que alteraron la fotometría diferencial y el auto-guiado.

En cualquier caso los datos demuestran que un equipo mediano al alcance del amateur puede servir para confirmar exoplanetas, descubrirlos y contribuir a refinar las observaciones profesionales y de otros amateurs.

La AAVSO en su sección de exoplanetas (https://www.aavso.org/exoplanet-section) posee una lista de exoplanetas con estrellas de magnitud inferior a 14 y profundidades del eclipse medibles por el astrónomo aficionado. La ETD publica también la predicción para el tránsito de los candidatos a exoplanetas TESS (TOI) en var2.astro.cz/ETD/TESSPredictions.php

Creo que para este tipo de proyectos la calidad del cielo nocturno es imprescindible y desde aqui quiero reivindicar proyectos como el de Juanma Bullon para denunciar la contaminación lumínica y conservar los cielos nocturnos.

También es necesario poseer una gran cantidad de noches de observación o al menos aquellos días sin luna que estén despejados. Junto a esto, una buena calidad en la montura y la cámara CCD hacen que proyectos colectivos con observatorios remotos sean una opción que me parece ideal para reducir costes y aumentar la productividad.

Cualquiera que este interesado en el seguimiento de exoplanetas que me escriba a mi email.