

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/311487362>

OBSERVACIÓN DEL TRÁNSITO DEL EXOPLANETA HAT-P-11B CON EL TELESCOPIO T150-OSN

Article · November 2016

CITATIONS

0

READS

581

6 authors, including:



Felipe Meza-Obando

Costa Rican Institute of Technology (ITCR)

4 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



Carlos Viscasillas

6 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



DSP2DSB: A proposal to distinguish solar burst in low radio frequencies [View project](#)



Applications of Artificial Intelligence, Machine Learning and Advanced Computing in Astrophysics [View project](#)

OBSERVACIÓN DEL TRÁNSITO DEL EXOPLANETA HAT-P-11B CON EL TELESCOPIO T150 DEL OSN.

Roberto MARTÍNEZ MARTÍNEZ; Felipe MEZA; José María RODRÍGUEZ MOZOS; Claudio Patricio ROGEL CÁRDENAS; Carlos VISCASILLAS VÁZQUEZ; Federico ZUCCARINO.

Universidad Internacional de Valencia, VIU. Valencia. España.

Recibido: 14-Septiembre-2016

Aceptado: 31-October-2016

Publicado on-line: 30-Noviembre-2016

Abstract

The work described below has been carried out for the subject Observational Practices corresponding to the Master of Astronomy and Astrophysics of the Valencian International University. The objective of this work is to calculate accurately the exoplanet radius and from there determine the composition and type of exoplanet, physical characteristics, orbital parameters, inclination and the location of the planet in the habitable zone of the star. The HAT-P-11b exoplanet was discovered in January 2009 by G. A. Bakos using the planetary transit method. This planet has been extensively studied because it is the second Super Neptune discovered after GJ-436b.

Introducción

El trabajo que se describe a continuación se ha realizado dentro de la asignatura de Prácticas Observacionales correspondiente al Master de Astronomía y Astrofísica de la Universidad Internacional de Valencia.

El objetivo de este trabajo es calcular con exactitud el Radio del exoplaneta y a partir de ahí, determinar la composición y tipo de exoplaneta, las características físicas del mismo, los parámetros orbitales e inclinación y si se encuentra, o no, en la zona de habitable de la estrella.

El exoplaneta HAT-P-11b fue descubierto en Enero de 2009 por G.A. Bakos mediante el método del tránsito planetario. Desde entonces este planeta ha sido bastante estudiado dado que se trata del segundo Súper Neptuno descubierto después de GJ-436b.

La controversia se inició con la propia estrella dado que en los cálculos iniciales se obtuvo un Radio de 0,75 Radios solares (R_{\odot}). Sin embargo, análisis posteriores determinaron que se trata de una estrella activa con un Radio corregido de 0,683 R_{\odot} (Deming et al., 2011).

En cuanto al planeta también ha suscitado cierta polémica dado que a pesar de ser considerado como Súper Neptuno, los resultados iniciales (Bakos et al., 2010) lo situaban a mitad de camino entre los Gigantes Helados y los Gigantes Gaseosos, con una densidad más parecida a Júpiter que a Neptuno.

Posteriormente se determinó que la órbita del planeta era muy oblicua (103°) casi perpendicular al ecuador de la estrella (Winn et al, 2010). De forma que cada tránsito que realiza el exoplaneta, moviéndose en dirección casi perpendicular al plano ecuatorial de la estrella atraviesa dos zonas activas de la misma. Una vez determinada la actividad de la estrella y su periodo, es imprescindible corregir las Curvas de Luz para tener en cuenta este efecto y de esta forma obtener resultados ajustados a la realidad (Deming et al., 2011).

Por último, se han detectado emisión en radiofrecuencia de este exoplaneta cuyo origen puede estar en las enormes tormentas acompañadas de aparato eléctrico en la cara noche de HAT-P-11b (Hodosán et al, 2016).

Material y Métodos

La observación fue realizada la noche del 29 al 30 de Mayo de 2016 desde el Observatorio de Sierra Nevada. Este magnífico Observatorio, que se puede ver en la Figura 1, fue construido en 1976 en Sierra Nevada (Granada) a una altitud de 2605 metros. Está gestionado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía IAA y por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC.



Figura 1. Observatorio de Sierra Nevada [Imagen cortesía del Observatorio de Sierra Nevada - IAA-CSIC]

Durante la observación las condiciones atmosféricas no fueron óptimas debido a la presencia de nubes. La instrumentación utilizada fue la siguiente:

Telescopio: T150

Apertura neta: 150 cm

Long. Focal: 12000 mm

Óptica: Ritchey-Chretien con 2 Focos Nasmyth

Montura ecuatorial

Cámara: CCD Vers Array 2048x2048, FOV de 7,92x7,92 minutos de arco y 0,232"/pixel

Filtros: V y R del sistema fotométrico Jhonson-Cousins

Cámara de auto guiado: CCD SONY ICX024 con entrada de fibras ópticas de 756x576 pixeles de 11 x 11, FOV de 3x2,5 minutos de arco

En la observación del tránsito del exoplaneta HAT-11b se tomaron 240 imágenes en los filtros V y R. Cada una de las imágenes se han obtenido sin binning y con un tiempo de exposición de 30 segundos en el filtro V y 15 segundos en el filtro R. El comienzo del tránsito se adelantó ligeramente sobre el horario previsto en la efeméride correspondiente. Adelanto que no afectó a la observación ya que la toma de imágenes se inició con bastante antelación.

Método del Tránsito Planetario

Cuando el plano orbital de un exoplaneta está alineado con nuestra línea de visión, el planeta cruzará delante de su estrella una vez en cada órbita. Este tipo de fenómeno se denomina tránsito planetario como se puede ver en la Figura 2.

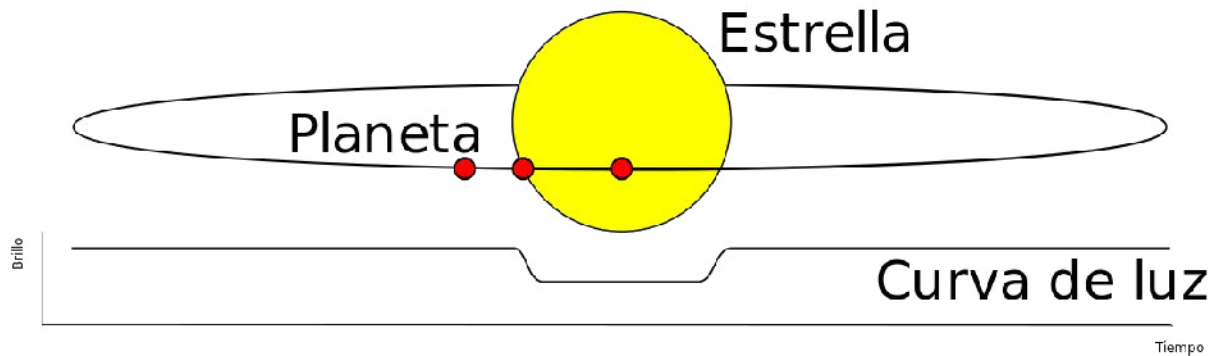


Figura 2. Tránsito Planetario [Fuente: Nikola Smolenski, Wikimedia Commons]

Durante el tránsito, el brillo de la estrella sufre una pequeña disminución en una proporción igual al cociente entre las áreas del planeta y la estrella. Si denominamos ΔF a la disminución de brillo observada, resulta que:

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 \quad [1]$$

Siendo R_p el radio del planeta y R_s el radio de la estrella. Para estrellas de tipo solar y planetas del tamaño de Júpiter, la disminución de brillo puede variar entre un 1% y 2%. En general, es necesario disponer de instrumentos de gran precisión dado que la disminución de brillo suele ser del orden de milimagnitudes.

A pesar de que probabilidad de alineación de la órbita con nuestra línea de visión sea baja, la búsqueda de exoplanetas por tránsito ha sido fructífera. A fecha de Julio de 2016 la Base de Datos **exoplanet.eu** incluye 3477 exoplanetas de los cuales 2697 han sido detectados mediante el método del tránsito planetario. La verdadera revolución en la detección de exoplanetas por este método ha sucedido con el lanzamiento y operación de misiones espaciales, como CoRoT (2006) y Kepler (2009), que con sus precisiones fotométricas en torno al 0,01% han permitido hallar planetas de tamaño parecido a la Tierra.

En general, las observaciones de tránsitos deben ser complementadas con medidas de velocidad radial para, de este modo, confirmar la existencia del exoplaneta y calcular su masa. Una vez conocida la masa se puede determinar la naturaleza planetaria del objeto.

Resultados y Discusión

Datos de partida de la Estrella HAT-P-11

El aspecto de la estrella se puede obtener de la herramienta del Observatorio Virtual ALADIN mediante el cartografiado digital del cielo Sloan Digital Sky Survey SDSS como se puede observar en la Figura 3.

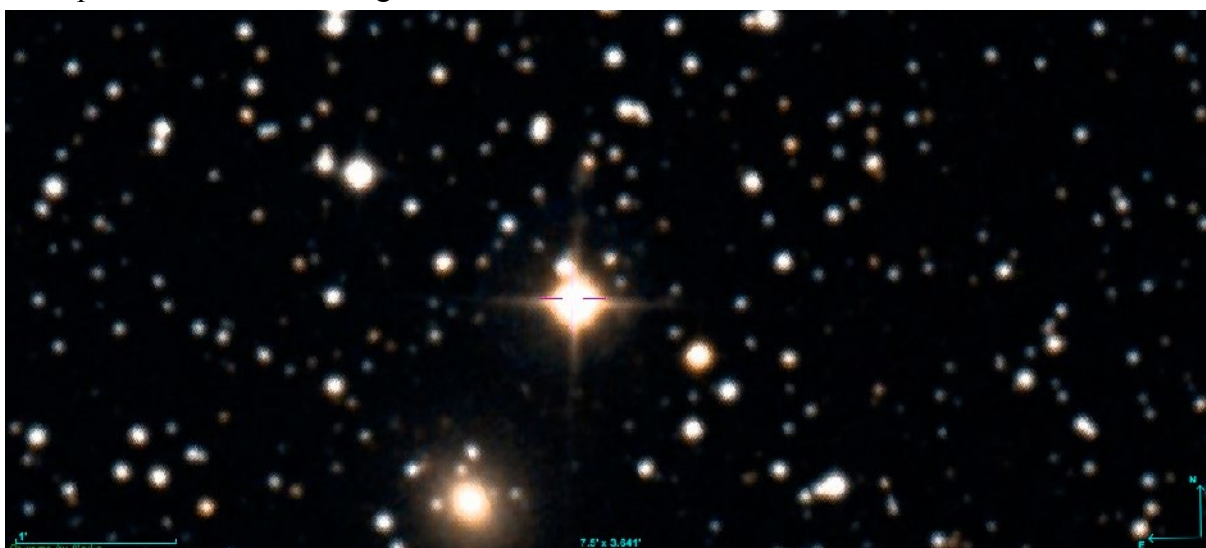


Figura 3. Estrella HAT-P-11 [Fuente: Sloan Digital Sky Survey SDSS]

Se trata de una estrella de tipo espectral K4V situada en la constelación del Cisne a una distancia de 123 años-luz y con una vida estimada de 6.500 millones de años. Es una estrella tardía, de color anaranjado, más vieja y más fría que nuestro Sol. La Temperatura Efectiva en su fotosfera es de 4780° K (1000° K más fría que el Sol) y está en secuencia principal, por lo cual el combustible que mantiene las relaciones nucleares en su núcleo es Hidrógeno. Además, entrando la Base de Datos astronómica SIMBAD podemos conocer su denominación, coordenadas actuales y las magnitudes que presenta en los filtros V y R. Los datos de partida correspondientes se han incluido en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la estrella HAT-P-11

Denominación	BD+472936
Ascensión Recta AR	19° 50' 50,25"
Declinación DEC	48° 04' 51,09"
Masa M \odot	0,809
Radio R \odot	0,683
Magnitud V	9,47
Magnitud R	8,80
Tipo Espectral	K4V
Distancia (años-luz)	123
Temperatura Efectiva (°K)	4780
Edad (10 ⁹ años)	6,5

HAT-P-11 es una estrella con alto movimiento propio. En la Figura 4 se compara la imagen obtenida con el cartografiado fotográfico realizado con el filtro R desde el Observatorio de Monte Palomar POSS-I en Julio de 1951, con la imagen obtenida en Agosto de 1988 con el segundo cartografiado fotográfico realizado con el mismo filtro por POSS-II, y posteriormente con la imagen del telescopio FLWO, del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsonian, en Septiembre de 2007 en banda de 1,2 m.

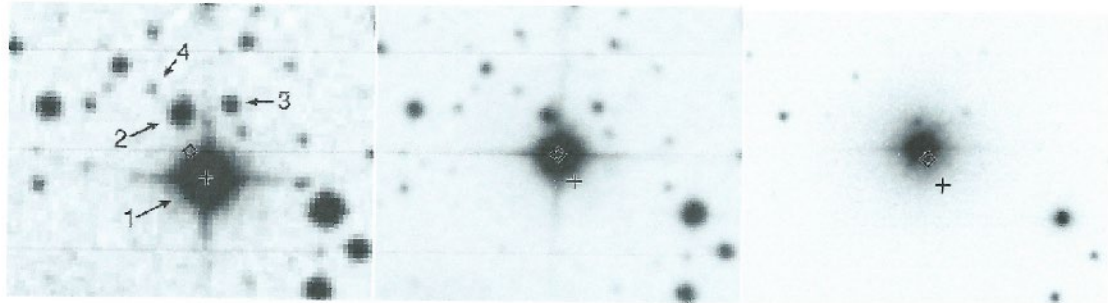


Figura 4. Movimiento Propio de HAT-P-11. Izquierda, posición de HAT-P-11 (estrella 1) en 1951 designada con + (POSS-I). Centro, posición en 1987 designada (POSS-II). Derecha, posición en 2007 (FLWO) [Fuente: The American Astronomical Society]

El movimiento propio de la estrella desde 1951 hasta 2007 ha sido de 13,8 segundos de arco y ha afectado notablemente al brillo observado de las estrellas designadas como 2, 3 y 4; como queda patente en la imagen de FLWO.

También resulta muy interesante la corrección realizada en el radio estelar en 2011 por D. Deming et al, a partir de observaciones realizadas por el satélite espacial Kepler. Este trabajo demuestra que el espectro de HAT-11 está afectado por el efecto Rossiter-Mc Laughlin (Figura 5). Cuando un exoplaneta está en la zona de la estrella que gira acercándose a la Tierra bloquea la luz más desplazada al azul, mientras que cuando está en la zona de la estrella que se aleja de la Tierra bloquea la luz más desplazada al rojo, lo cual permite delimitar el ángulo que hay entre el eje de rotación de la estrella y el plano orbital. Mediante un estudio detallado de la atmósfera estelar Deming pudo determinar la densidad media de la estrella, y conociendo la masa de la estrella, pudo calcular el nuevo radio que resulta ser de $0,683 R_{\odot}$.

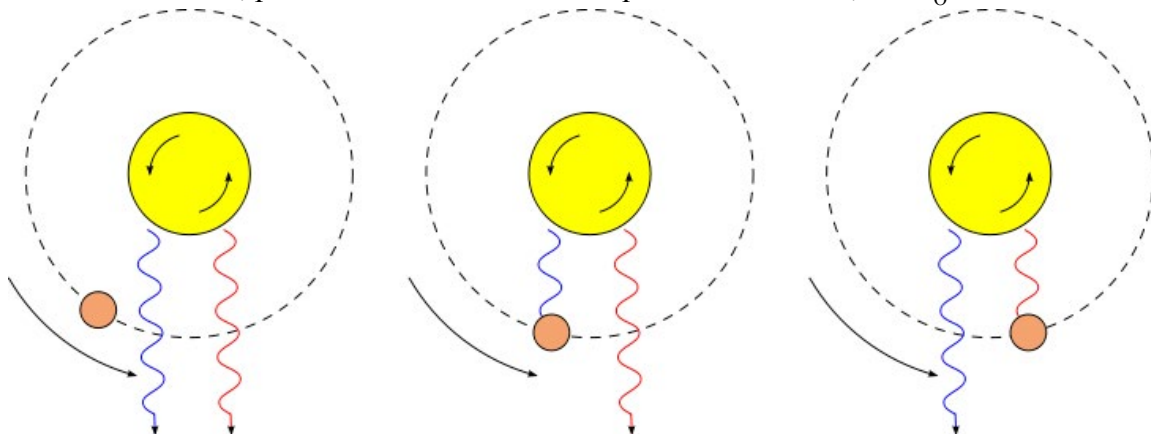


Figura 5. Efecto Rossiter-Mc Laughlin [Fuente: Nicholas Shanks, Wikimedia Commons]

Datos de partida del planeta HAT-P-11b

El exoplaneta HAT-11b ha sido analizado mediante el método de la velocidad radial al objeto de determinar su Masa que resultó ser de 25,8 Masas Terrestres. Además, mediante espectroscopia se ha determinado la excentricidad de la órbita. Los datos de partida del exoplaneta se han incluido en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos del planeta HAT-P-11b

Masa M_{\oplus}	25,8
Periodo (días)	4,8878
Excentricidad	0,198

Resultados de la observación

A partir de las imágenes obtenidas durante la observación se ha procedido en primer lugar a la reducción de las mismas. El objetivo principal de la reducción de imágenes es eliminar cualquier efecto debido al sistema de procesamiento de imágenes (detector y telescopio) y a la calibración del flujo almacenado en cada píxel de la cámara CCD.

El nivel de bias es una señal introducida por el fabricante de la cámara CCD para asegurar que la conversión de la carga acumulada en una imagen digital sea positiva. El nivel de bias debe ser descontado para obtener el flujo real procedente de la estrella.

Por otra parte, cada píxel de una cámara CCD tiene una sensibilidad distinta. Estas diferencias han de tenerse en cuenta a la hora de hacer fotometría. Por lo cual es necesario realizar una calibración de campo plano (flatfield) para unificar la sensibilidad de los píxeles.

El proceso de reducción de una imagen astronómica CCD consiste en sustraer el nivel de bias y dividir la imagen resultante por la calibración de campo plano para estandarizar la respuesta de cada píxel de la imagen.

Posteriormente se ha realizado fotometría relativa representando en un diagrama el brillo relativo de la estrella en función del tiempo para de esta manera determinar la disminución de flujo producida. Las curvas de luz reducidas se han obtenido en los filtros V y R de forma redundante para evitar repetir la observación en caso de presentarse algún problema en el filtro elegido. En este caso las Curvas de Luz han aparecido correctamente en ambos filtros y se ha optado por realizar el estudio en el filtro visible V dado que la estrella aparece con brillo suficiente. En la Figura 6 se puede ver la Curva de Luz obtenida en el filtro V después de reducir.

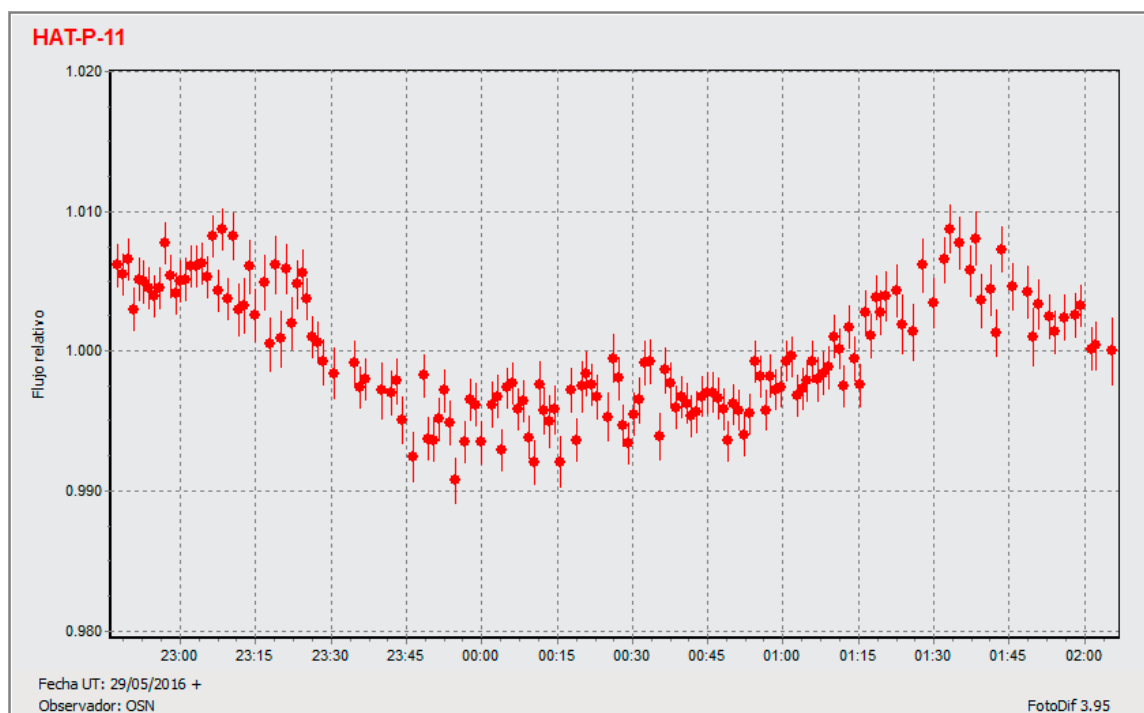


Figura 6. Curva de Luz reducida de HAT-P-11 obtenida en el filtro V [Fuente: Producción Original]

Por otra parte se han trasladado a una Hoja de Cálculo esta Curva de Luz y se ha aproximado la serie temporal mediante una función polinómica minimizando el error cuadrático medio. La Curva de Luz aproximada se ha incluido en color azul en la Figura 7. En ella se puede observar claramente la existencia de una disminución de flujo de una profundidad en torno a 4 mmag.

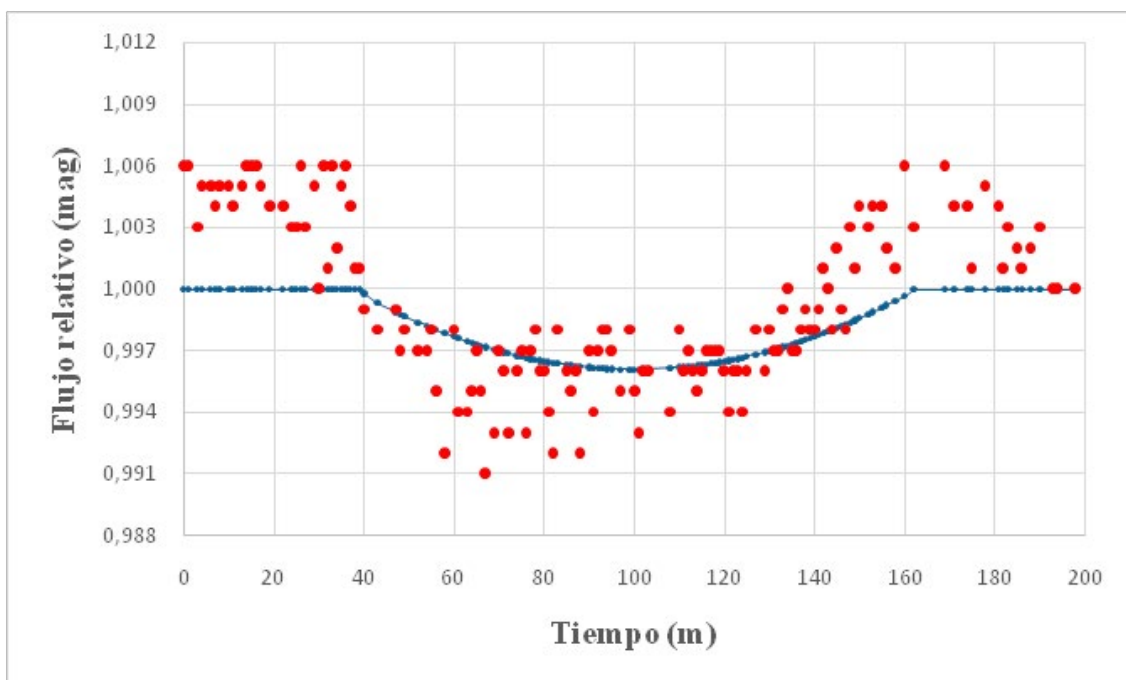


Figura 7. Aproximación de la Curva de Luz de HAT-P-11 [Fuente: Producción Original]

Analizando la serie temporal se puede estimar también el tiempo total del tránsito observando los puntos donde el brillo disminuye por debajo del valor medio estelar, que se encuentra ajustado al valor unidad, y cuando se vuelve a recuperar este brillo. Igualmente se puede determinar el tiempo que el brillo permanece en su valor mínimo o tiempo de suelo. Al igual que la profundidad de tránsito, calculando el valor medio obtenido en el brillo relativo mientras está en la zona de suelo.

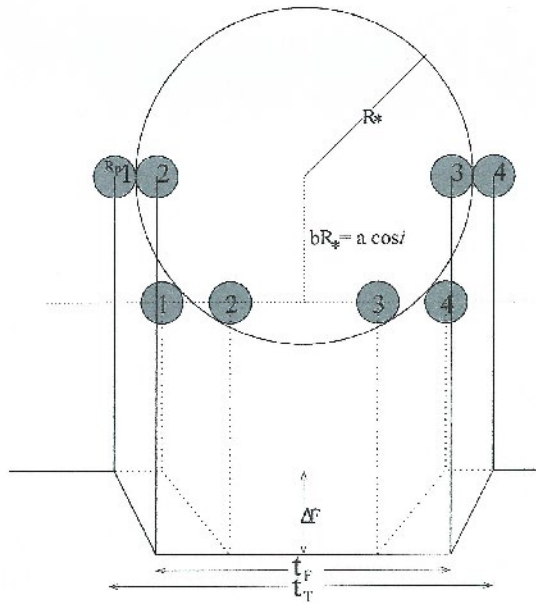


Figura 8. S. Seager and G. Mallén-Ornelas. 2002. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve. The *Astrophysical Journal* (ApJ). 585:1038–1055.

Todos estos conceptos se encuentran representados en la Figura 8. También se puede observar la influencia que tiene sobre la Curva de Luz que el tránsito planetario se realice sobre el plano del ecuador estelar, o bien, bastante alejado del mismo.

En el caso del tránsito analizado de HAT-P-11b, resulta:

- Tiempo de tránsito total t_T = 138 m = 2,30 horas
- Tiempo de suelo t_F = 73 m = 1,22 horas
- Profundidad de tránsito ΔF = 4,1 mmag

El estudio realizado por Deming et al (2010) a partir de 26 tránsitos del exoplaneta HAT-P-11b sobre su estrella registrados por el satélite espacial Kepler, y analizados en los filtros B y J, determinó que era necesario corregir el Radio del exoplaneta debido a la actividad de la estrella. El factor de corrección determinado para el Radio del exoplaneta fue de 0,9074, mientras que la corrección sobre la profundidad de tránsito realizada fue de 0,6 milimagnitudes. Por tanto, la profundidad de tránsito corregida resulta finalmente de:

Profundidad de tránsito corregida $\Delta F^* = 3,5$ mmag

Determinación del Radio del planeta

A partir de la profundidad de tránsito ΔF se puede conocer el radio del planeta aplicando la ecuación [1]:

$$\Delta F = (R_p/R_s)^2 \rightarrow R_p = R_s \cdot \sqrt{\Delta F} = 30.425 \text{ Km} = 4,78 R_{\oplus}$$

Sin embargo, si aplicamos la corrección de Deming a la profundidad de tránsito el radio del planeta corregido R_p^* resultante resulta ser menor.

$$R_p^* = R_s \cdot \sqrt{\Delta F^*} = 28.111 \text{ Km} = 4,41 R_{\oplus}$$

Caracterización del exoplaneta

Conociendo la Masa y el Radio de un exoplaneta, y entrando con estos datos en el Diagrama Masa-Radio de exoplanetas, se puede determinar de qué tipo de exoplaneta se trata y cuál es su composición estimada.

En la Figura 9 se ha incluido la posición de HAT-P-11b con el radio sin corregir (etiquetada en negro) y con el radio corregido (etiquetada en azul). De esta forma se comprueba que varía de forma significativa su composición al corregir el radio, encontrándose en ambos casos en la zona de Gigantes de Hielo. En primer caso la composición aproximada de la parte externa del exoplaneta sería de un 50% de H/He mientras que en el segundo caso la composición sería de un 40% de H/He. Realizar la corrección significa que el envoltorio gaseoso del planeta es menor, y por tanto, aumentará también su densidad al ser mayor el peso relativo de su núcleo.

Por tanto, una vez realizadas las correcciones correspondientes se estima que se trata de un **exoplaneta de tipo Neptuno** con una **composición estimada 40% H/He**.

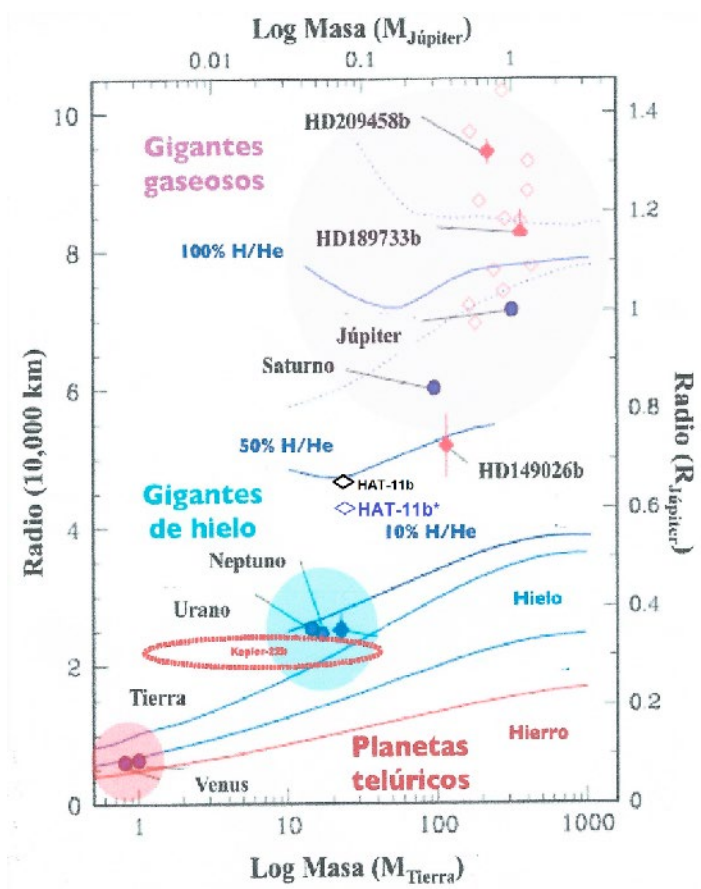


Figura 9. Diagrama Masa-Radius de Exoplanetas [Fuente: Manual del Curso Exoplanetas - VIU]

Características físicas

Conociendo la Masa y del Radius del planeta también se pueden determinar las propiedades físicas más importantes del mismo. En la tabla 3 se han calculado los valores de gravedad, velocidad de escape y densidad normalizados respecto al valor Terrestre. El cálculo se ha realizado tanto sin corregir el radio como después de realizar la corrección (se designa el planeta con un asterisco) y además se puede comparar con los valores de Júpiter, Neptuno y la Tierra.

Tabla 3. Características Físicas de HAT-P-11b

Planeta	Masa M^n	Radio R^n	Gravedad g^n	Velocidad escape ve^n	Densidad ρ^n
Júpiter	317,8	10,97	2,64	5,38	0,24
HAT-P-11b	25,8	4,78	1,13	2,32	0,24
HAT-P-11b*	25,8	4,41	1,33	2,42	0,30
Neptuno	17,1	3,86	1,15	2,10	0,30
Tierra	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00

Cabe destacar una que tanto la gravedad como la velocidad de escape de HAT-P-11 b presentan valores similares a Neptuno. Sin embargo, antes de corregir el radio, la densidad era igual a Júpiter.

Parámetros Orbitales

Conociendo la Masa de la estrella M_s , por aplicación de la tercera Ley de Kepler se puede calcular el semieje de mayor de la elipse a descrita por el exoplaneta alrededor de su estrella con solo conocer el Período de su órbita:

$$a^3 = \left(\frac{G}{4\pi^2}\right) \cdot M_s \cdot P^2 \quad [2]$$

La velocidad de traslación media es proporcional a la raíz cuadrada de la Masa de la estrella partido del valor de semieje mayor a . Para determinar el semieje menor de la elipse b es necesario conocer previamente la excentricidad de la órbita e que fue determinada por métodos espectroscópicos.

$$b = a \sqrt{(1 - e^2)} \quad [3]$$

En la Tabla 4 se han comparado los resultados obtenidos para este exoplaneta con los principales planetas del sistema solar. La velocidad de traslación media es bastante alta, en torno a los 117 Km/s, compatible con una órbita muy cercana a su estrella de tan solo 0,053 UA. Igualmente es destacable el alto valor de la excentricidad orbital que puede indicar la existencia de interacciones gravitacionales importantes.

Tabla 4. Parámetros Orbitales de HAT-P-11b

Planeta	Estrella Masa M^n	Periodo (días)	V traslación (Km/s)	Semieje mayor a (UA)	excent. e	Semieje menor b (UA)
Júpiter	1	4.333,04	13,1	5,205	0,048	5,199
HAT-P-11b	0,809	4,8878	116,9	0,053	0,198	0,051
HAT-P-11b*	1	60.190,60	5,4	30,058	0,009	30,057
Neptuno	1	365,26	29,8	1,000	0,017	1,000
Tierra	1,0	1,00	1,00		1,00	1,00

Es fundamental reseñar que la órbita descrita por HAT-P-11b es totalmente oblicua formando un ángulo de 103° con el ecuador estelar (Winn et al, 2010). El tránsito se produce en dirección casi perpendicular al plano del ecuador, como se puede ver en la Figura 10, de forma que durante cada tránsito el exoplaneta pasa dos veces por las zonas activas de la estrella.

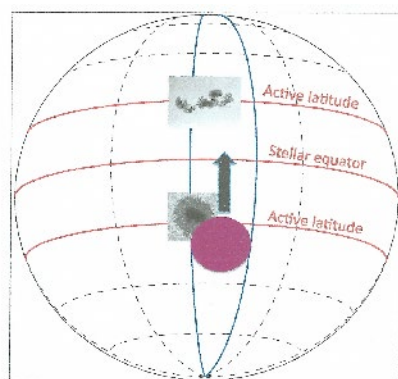


Figura 10. Órbita oblicua de HAT-P-11b y zonas activas de la estrella [Fuente: The American Astronomical Society]

Análisis del tránsito

A partir de los parámetros observables en la Curva de Luz, como son el tiempo de tránsito total, el tiempo de suelo y la profundidad de tránsito, se puede determinar el parámetro de impacto y la inclinación de la órbita.

El parámetro de impacto **b** es la distancia, medida a medio tránsito, entre el centro de la estrella y el centro del planeta vista por el observador. Se suele dar en tanto por uno del Radio estelar, por lo cual la distancia de la línea de tránsito al centro de la estrella sería $b \cdot R_s$ tal y como se observa en la Figura 11.

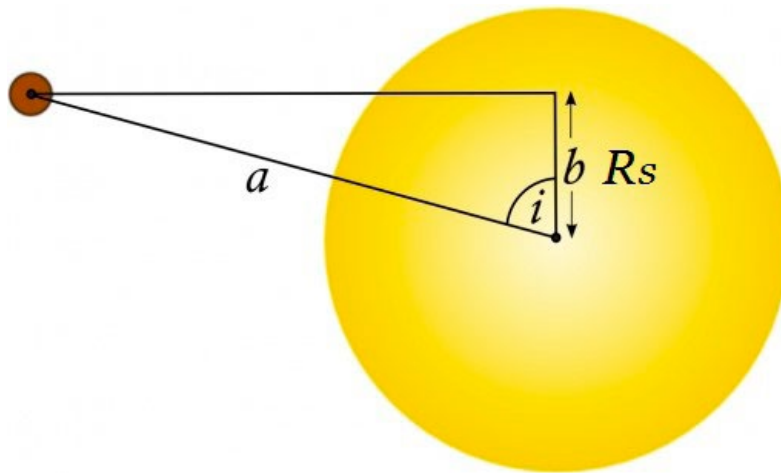


Figura 11. Parámetro de impacto e inclinación de la órbita [Fuente: Paul Wilson Blog]

El parámetro de impacto depende de la profundidad de tránsito y de la fracción del tiempo de suelo sobre el tiempo total de tránsito. Si llamamos:

$$\tau = \frac{tF}{tT}$$

Aplicando relaciones trigonométricas se puede demostrar que el parámetro de impacto se corresponde con la siguiente expresión:

$$\mathbf{b} = \left[\frac{(1-\sqrt{\Delta F})^2 - \tau^2(1+\sqrt{\Delta F})^2}{1-\tau^2} \right]^{1/2} \quad [4]$$

Por otra parte, hay otro concepto importante en un tránsito planetario que es la inclinación de la órbita que ve un observador desde la Tierra. En la figura 12 se puede observar que cuando el plano orbital se encuentra perpendicular a nuestra línea de visión la inclinación es nula mientras que cuando el plano orbital es paralelo a nuestra línea de visión la inclinación estará próxima a los 90° grados.

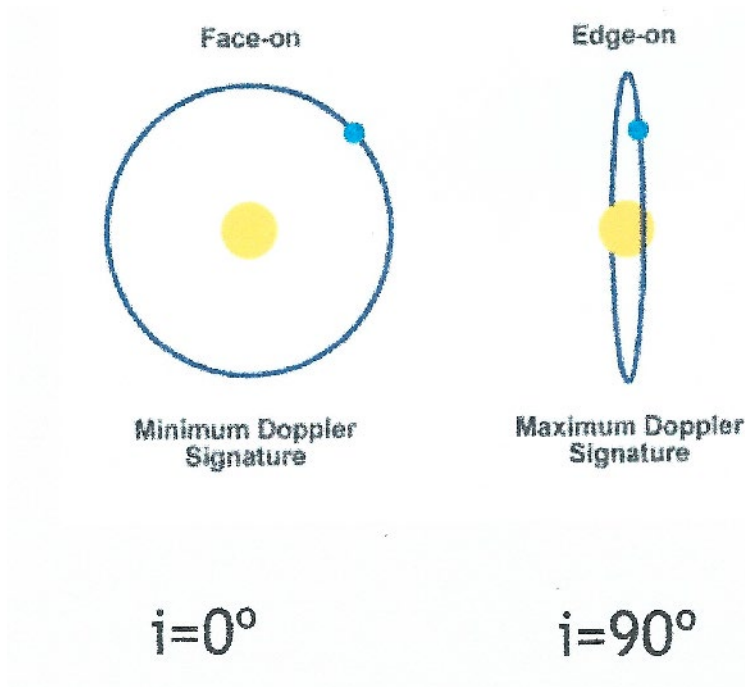


Figura 12. Plano orbital y ángulo de inclinación [Fuente: Manual del Curso Exoplanetas - VIU]

Esto se traduce en que cuando $i=0^\circ$ no se podrá detectar la variación de velocidad en la estrella producida por el planeta ya que por efecto Doppler solo se puede medir sobre objetos que se acercan o alejan del observador y en este caso la estrella siempre está a la misma distancia. Sin embargo, cuando $i=90^\circ$ la variación de velocidad radial medida por efecto Doppler es máxima ya que las variaciones en la distancia de la estrella son máximas.

En la Figura 11 se puede deducir fácilmente el ángulo de inclinación de la órbita i .

$$i = \arccos\left(\frac{bRs}{a}\right) \quad [5]$$

En la Tabla 5 se pueden ver los resultados obtenidos aplicando las ecuaciones anteriores, es decir, un parámetro de impacto de 0,89 y una inclinación de la órbita de 87° .

Tabla 5. Análisis del Tránsito de HAT-P-11b

Planeta	Estrella R_s^n	semieje mayor a (UA)	Profundidad	T total	T suelo	Parámetro impacto	Inclinación i ($^\circ$)
HAT-P-11b*	0,683	0,053	0,0035	2,30	1,22	0,89	87

Zona de habitabilidad

La zona de habitabilidad de una estrella es aquella donde se puede encontrar agua en estado líquido, y por tanto, es la zona más favorable para albergar vida. La zona habitable viene delimitada por dos radios. El Radio interior indica el comienzo de la zona habitable mientras que el Radio exterior indica el final. Para calcular estos radios se usarán las ecuaciones de Mendez et al (2011). Estas ecuaciones tienen en cuenta el efecto invernadero que,

por ejemplo, sufre Venus y también el ciclo carbonato-silicato que puede mantener el agua en estado líquido incluso a distancias mayores al radio de Marte.

Para conocer la situación relativa de un exoplaneta respecto a la zona habitable se utiliza el parámetro adimensional HZD, que se define como:

$$HZD = (2a - R_{ext} - R_{int}) / (R_{ext} - R_{int}) \quad [6]$$

Una vez determinados el R_{ext} y R_{int} de la zona habitable, se puede determinar el valor de HZD para cualquier exoplaneta con solo introducir en la ecuación [6] el semieje mayor de su órbita. Pudiendo ocurrir:

- $HZD < -1 \rightarrow$ Zona CALIENTE, agua probablemente en forma de vapor
- $-1 < HZD < 1 \rightarrow$ Zona HABITABLE, posiblemente agua en forma líquida
- $HZD > 1 \rightarrow$ Zona FRÍA, agua probablemente en forma de hielo

En la tabla 6 se ha determinado la zona habitable de la estrella HAT-P-11 a partir de la Temperatura efectiva, el radio normalizado de la estrella, así como el parámetro HZD a partir del semieje mayor de la órbita de HAT-P-11b.

Tabla 6. Zona de Habitabilidad de HAT-P-11

Planeta	Estrella Teff (°K)	Estrella Rs ⁿ	semieje mayor a (UA)	Zona Habitable		Planeta	
				Rint (UA)	Rext (UA)	Rext (UA)	Rext (UA)
HAT-P-11b*	0,683	0,053	0,0035	2,30	1,22	0,89	87

La zona habitable de la estrella HAT-P-11 se encuentra entre 0,36 UA y 0,91 UA. El exoplaneta HAT-P-11b está situado en la zona caliente de la estrella donde el agua no se encuentra en forma líquida a presión atmosférica.

Acoplamiento por marea

En la Figura 13 se puede observar la posición de este exoplaneta marcada con un diamante azul en el Diagrama de habitabilidad. HAT-P-11b se encuentra en la zona interior a la recta designada como “Tidal lock radius” y por tanto está acoplado por marea con su estrella, es decir, siempre da la misma cara a su estrella, por lo cual tiene una cara donde siempre es de día y otra donde siempre es de noche.

En este diagrama también se puede comprobar que se encuentra bastante lejos de la zona habitable, tal y como se ha determinado con el índice HZD. Por tanto, se puede caracterizar a HAT-P-11b como un **NEPTUNO CALIENTE ANCLADO POR MAREA**.

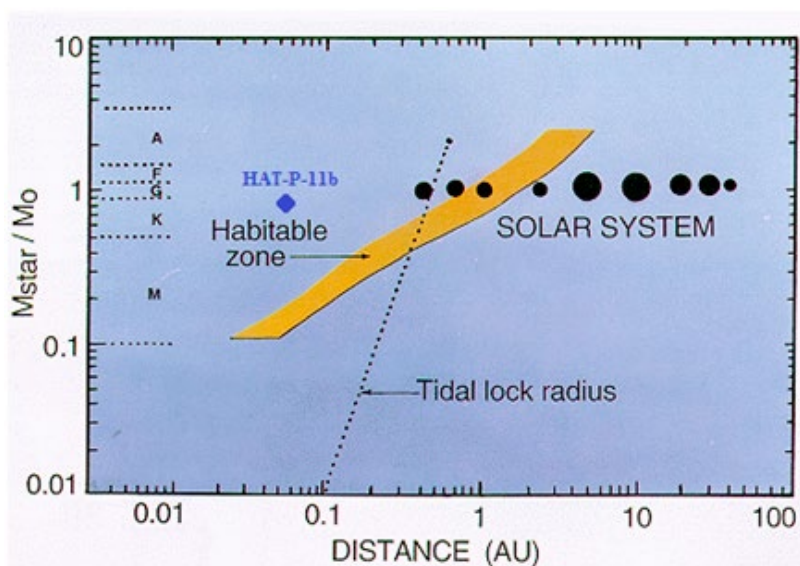


Figura 13. Situación de HAT-P-11b en diagrama de habitabilidad [Fuente: James F. Kasting, Penn State Department of Geosciences]

Conclusiones

Caracterización del exoplaneta

Inicialmente para el planeta HAT-P-11b se había determinado una Masa de $25,8 M_{\oplus}$ y un Radio de $4,73 R_{\oplus}$ (Bakos et al, 2010), siendo más masivo ($17,1 M_{\oplus}$) y de mayor tamaño que Neptuno ($3,86 R_{\oplus}$). Con una densidad ($0,24 \rho_{\oplus}$) igual a la densidad de Júpiter ($0,24 \rho_{\oplus}$) y bastante diferente a la densidad de Neptuno ($0,30 \rho_{\oplus}$). Por otra parte, la composición calculada inicialmente (50% de H/He en la parte externa y 50% de roca y hielo en el núcleo), indica que estaría en el límite entre ser considerado un gigante gaseoso o un gigante de hielo.

Analizando este hecho en mayor profundidad mediante los modelos de Fortney et al. (2007)(9), un planeta con la composición y la Masa de HAT-11b debería tener un radio más pequeño que el calculado inicialmente.

El otro Súper Neptuno, GJ-436b, tiene una Masa ($22,2 M_{\oplus}$) y un Radio ($4,17 R_{\oplus}$) ambos valores menores que HAT-11b, también tiene una densidad ($0,31 \rho_{\oplus}$) muy similar a Neptuno a diferencia de HAT-P-11b.

Sin embargo, al realizar la corrección del radio propuesta por Deming, debido a la actividad de su estrella, este pasa a tener un valor de $4,41 R_{\oplus}$ y la densidad pasa a tener un valor similar a Neptuno ($0,30 \rho_{\oplus}$) y una composición de 40% H/He en su envoltura **plenamente compatible con su caracterización como Gigante de Hielo**. En la Figura 14 se puede comparar el tamaño de HAT-P-11 con el tamaño de Neptuno.

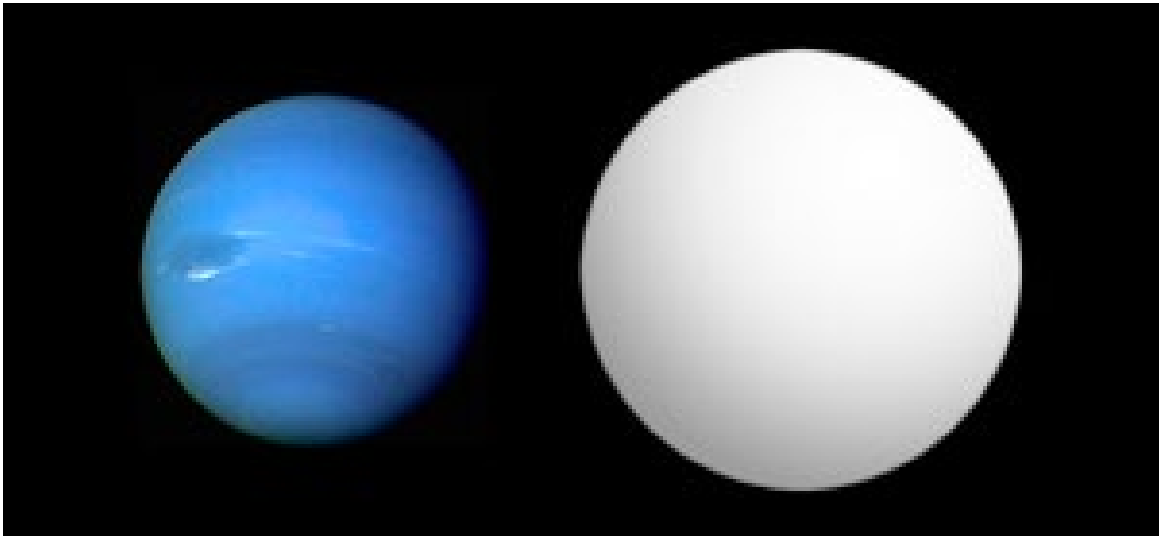


Figura14. Comparación de tamaño entre HAT-P-11 y Neptuno [Fuente: Aldaron, WikiMedia Commons]

Emisión en Radiofrecuencia

La emisión en radiofrecuencia ha sido observada en planetas del sistema solar. La emisión en radio debida al exoplaneta HAT-P-11b, una vez descontada la emisión de la estrella, se atribuye a enormes tormentas con aparato eléctrico muy fuerte (Hodosán et al 2016). La forma propuesta para medir la intensidad de estas tormentas es buscar la línea de emisión del ácido cianhídrico HCN dado que la interacción de los Rayos con la atmósfera planetaria deja una huella reconocible durante años.

Recordemos que el planeta HAT-P-11b está situado en una zona con una Temperatura equivalente superior a los 800 °K con una cara día dirigida siempre hacia su estrella que estará muy recalentada. Sin embargo, en la cara noche del planeta las condiciones atmosféricas deben ser muy diferentes y el gradiente térmico entre ambas caras será muy importante con toda seguridad. Finalmente, estas condiciones se pueden traducir en unos vientos enormes que intenten estabilizar la temperatura del planeta y tremendas tormentas como consecuencia de los gradientes térmicos.

Agradecimientos

Queremos agradecer a los doctores Andrés Moya, Coordinador del Máster de Astronomía y Astrofísica de la Universidad Internacional de Valencia (VIU); a Susana Martín, directora del Observatorio de Sierra Nevada (OSN); y a Fran Aceituno, Asistente del Observatorio de Sierra Nevada (OSN), el habernos dado esta gran oportunidad, buenos consejos y el apoyo recibido durante estas prácticas observacionales.

Referencias

Bakos GA et al. 2010. Hat-P-11b: A Super-Neptune Planet transiting a bright K Star in the Kepler field. *The Astrophysical Journal (ApJ)*. 710:1724–1745.

Deming D et al. 2011. Kepler and Ground-Based Transits of the Exo-Neptune Hatp-11b. *The Astrophysical Journal (ApJ)*. 740:33-43.

Fortney JJ et al. 2007. Planetary radii across five orders of magnitude in mass and stellar insolation: Application to transits. *The Astrophysical Journal (ApJ)*. 659:1661–1672.

Hodosán G et al. 2016. Lightning as a possible source of the radio emission on HAT-P-11b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*.

Mendez A et al. 2011. Habitable Zone Distance: A Habitability Metric for Exoplanets. *Planetary Habitability Laboratory (PHL)*.

Ribas Canudas I, Ballesteros Roselló FJ. 2014. *Exoplanetas y Astrobiología*. VIU. Valencia. España.

Seager S, Mallén-Ornelas G. 2002. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve. *The Astrophysical Journal (ApJ)*. 585:1038–1055.

Winn JN et al. 2010. The Oblique Orbit of the Super-Neptune Hat-P-11b. *The Astrophysical Journal Letters (ApJL)*. 723:L223–L227.