

EXOPLANETAS Y ASTROBIOLOGÍA

Actividad Guiada:

Búsqueda de exoplanetas y zona de habitabilidad



Máster en Astronomía y Astrofísica
Profesor VIU: Pascual D. Diago Nebot
e-mail: pascualdavid.diago@campusviu.es

Índice

1. Objetivo	1
2. Introducción	1
3. Tarea para el portafolios	6
4. Tránsitos de exoplanetas con ALADIN	7
4.1. El programa ALADIN	7
4.2. Cargar y visualizar las imágenes de SPITZER	7
4.3. Obtener medidas fotométricas de cada estrella	8
4.4. Análisis de los datos utilizando una hoja de cálculo	9
5. Zona de habitabilidad	14
5.1. Profundidad del tránsito	15
5.2. Radio del planeta	16
5.3. Radio de la órbita del planeta	16
5.4. Habitabilidad del planeta	17
Bibliografía	19

1. Objetivo

- Trazar y analizar una curva de luz de un planeta en tránsito.
- Descubrir propiedades críticas de un planeta que podría hacer que el planeta sea habitable o no a partir de los datos del tránsito.

2. Introducción

Conocemos un planeta *habitable* en el Universo, es decir, un planeta que es adecuado para sostener la vida tal y como la conocemos. Este planeta habitable es la Tierra. Durante siglos, muchas personas han especulado que puede haber muchos planetas en otros sistemas estelares. Hasta finales del siglo XX, no había pruebas de que planetas de cualquier tipo pudieran existir alrededor de otras estrellas, y mucho menos, planetas habitables en el sentido en el que conocemos nuestra Tierra. Esto no es sorprendente. Es casi imposible ver exoplanetas porque se encuentran a enormes distancias, inmersos en el más débil y perdido resplandor de las estrellas alrededor de las cuales orbitan. Hasta julio de 2007, sólo cuatro exoplanetas habían sido observados con métodos de imagen directa y que correspondían con planetas gigantes orbitando alrededor de estrellas muy débiles, con radios de las órbitas muy grandes. Pero a pesar de que no es fácil observar exoplanetas directamente, se han detectado muchos de ellos por determinados efectos que tienen sobre las estrellas que orbitan.

Aleksander Wolszczan, un astrónomo polaco anunció en 1992 el descubrimiento de 3 objetos sub-estelares de baja masa orbitando el púlsar *PSR 1257 + 12* (Wolszczan and Frail 1992) mediante la medición de la variación periódica en el tiempo de llegada de los pulsos de radio de un púlsar, una estrella de neutrones muy densa que normalmente emite impulsos muy regulares en la longitud de ondas de radio. Estos fueron los primeros planetas extrasolares descubiertos y el anuncio fue toda una sorpresa. Se cree que estos planetas se formaron de los restos de la explosión de supernova que produjo el púlsar.

Los primeros planetas extrasolares alrededor de estrellas de la secuencia principal fueron descubiertos en la década de 1990, en una dura competición entre equipos suizos y norteamericanos. El primer planeta extrasolar fue anunciado por Michel Mayor y Didier Queloz, del grupo suizo, el 6 de octubre de 1995 (Mayor and Queloz 1995). La estrella principal era 51 Pegasi y el exoplaneta se designó con el nombre 51 Pegasi b. Unos meses más tarde el equipo americano, liderado por Geoffrey Marcy de la Universidad de California anunció el descubrimiento de 2 nuevos planetas. La carrera por encontrar nuevos planetas no había hecho más que empezar. Numerosos anuncios en prensa y televisión han divulgado algunos de estos descubrimientos, considerados en su conjunto como una de las revoluciones de la astronomía a finales del siglo XX.

La mayoría de los descubrimientos de exoplanetas han sido el resultado de observaciones a su estrella progenitora. En las leyes de Kepler, el Sol se fija en un punto en el espacio y el planeta gira alrededor de ella. Pero ¿Por qué el Sol ostenta tal privilegio? Kepler tenía algunas ideas muy místicas sobre el Sol y sobre la posición que ocupa, con las cuales justificó su lugar especial en el Sistema Solar. Sin embargo Newton, en el marco de la Tercera Ley de Kepler, demostró que el Sol no ocupa una posición privilegiada. Cuando un planeta orbita alrededor de su estrella, su gravedad afecta a la estrella para que los dos cuerpos orbiten entre sí en realidad. Por supuesto, el cuerpo más grande domina el sistema y el cuerpo más pequeño se mueve mucho más que el grande. Pero el pequeño movimiento de la estrella mientras el planeta en órbita, en teoría, puede ser detectado.

Aquí describimos algunos de los métodos de detección de planetas extrasolares:

- **Velocidades radiales**

Este método se basa en el Efecto Doppler. El planeta, al orbitar la estrella central, ejerce también una fuerza gravitacional sobre ésta de manera que la estrella gira sobre el centro de masa común del sistema. Las oscilaciones de la estrella pueden detectarse mediante leves cambios en las líneas espectrales según la estrella se acerca a nosotros (corrimiento hacia el azul) o se aleja (corrimiento al rojo). Este método

ha sido el más exitoso en la búsqueda de nuevos planetas, pero sólo es eficaz en los planetas gigantes más cercanos a la estrella principal, por lo que sólo puede detectar una leve fracción de los planetas existentes.

■ **Astrometría**

Dado que la estrella gira sobre el centro de masa se puede intentar registrar las variaciones de posición y el oscilar de la estrella. A pesar de que estas variaciones son muy pequeñas, la astrometría permitió encontrar un planeta extrasolar en 2009, denominado VB 10b (Pravdo and Shaklan 2009).

■ **Tránsitos**

Consiste en observar fotométricamente la estrella y detectar sutiles cambios en la intensidad de su luz cuando un planeta orbita por delante de ella. El primer tránsito fue detectado por Charbonneau et al. (2000), aunque el planeta ya había sido descubierto previamente por el método de velocidades radiales (HD 209458b).

El método de tránsitos, junto con el de la velocidad radial, pueden utilizarse para caracterizar mejor la atmósfera de un planeta, como en los casos de HD 209458b y los planetas OGLE-TR-40 y OGLE-TR-10. Este método, al igual que el de la velocidad radial, encuentra de forma más eficiente planetas de gran volumen, pero tiene la ventaja de que la cercanía del planeta a la estrella no es relevante, por lo que el espectro de planetas que puede detectar aumenta considerablemente. Los avances tecnológicos en fotometría han permitido que la sonda KEPLER, lanzada en 2009, tenga sensibilidad suficiente como para detectar planetas del tamaño de la tierra, hecho que se espera que suceda al término de su misión, a finales de 2012.

■ **Medida de pulsos de radio de un púlsar**

Un púlsar (es el pequeño remanente, ultradenso de una estrella que ha explotado como una supernova) emite ondas de radio muy regularmente a medida que gira. Leves anomalías en el momento de sus pulsos de radio que se observan pueden ser utilizados para rastrear los cambios en el movimiento del púlsar causado por la presencia de planetas. El primer sistema planetario se detectó gracias a este método (Wolszczan and Frail 1992).

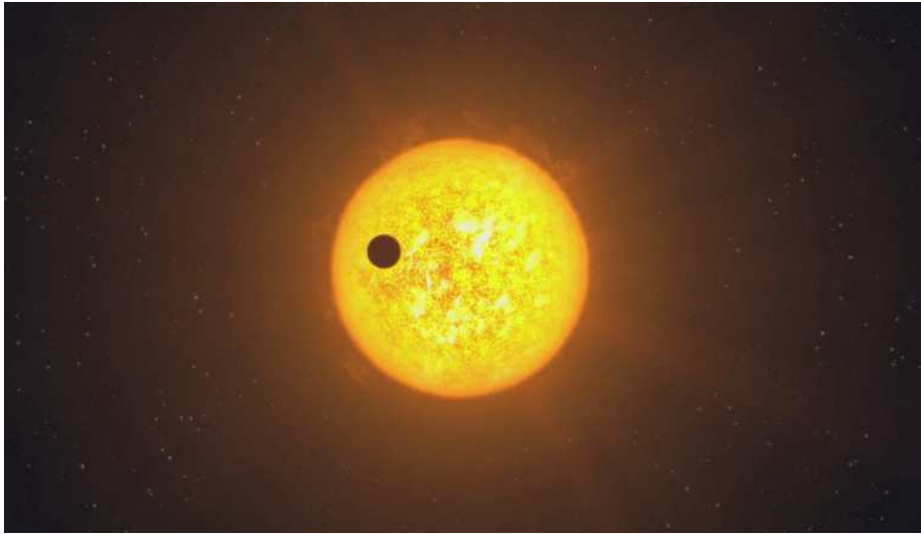


Figura 1: *Imagen artística del exoplaneta en tránsito CoRoT – 9b. Se puede visualizar una animación en alta definición en el siguiente enlace. En él, la primera serie muestra el planeta mientras orbita alrededor de su estrella, mientras que la segunda destaca el tránsito del planeta.*

- **Binarias eclipsantes**

Si un planeta tiene una órbita de gran tamaño que la lleva alrededor de dos miembros de un sistema de binarias eclipsantes, entonces el planeta se puede detectar a través de pequeñas variaciones en el momento de los eclipses de las estrellas entre sí. Hasta diciembre de 2009, tan sólo dos planetas se han encontrado por este método.

- **Microlentes gravitacionales**

El efecto de lente gravitacional ocurre cuando los campos de gravedad del planeta y la estrella actúan para aumentar o focalizar la luz de una estrella distante. Para que el método funcione, los tres objetos tienen que estar casi perfectamente alineados. El principal defecto de este método es que las posibles detecciones no son repetibles por lo que el planeta así descubierto debería ser estudiado adicionalmente por alguno de los métodos anteriores.

- **Detección visual directa**

Desde el principio, obtener imágenes/fotografías de los planetas extrasolares ha sido uno de los objetivos más deseados de la investigación

exoplanetaria. Las fotografías ya sea de luz visible o infrarrojas podrían revelar mucha más información sobre un planeta que cualquier otra técnica conocida. Sin embargo esto ha revelado ser mucho más difícil técnicamente que cualquiera de las otras técnicas disponibles. Las razones de esto son varias, pero entre las principales, se encuentra la diferencia entre el brillo de las estrellas y el de los planetas. En el espectro de la luz visible, una estrella promedio es miles de millones de veces más brillante que cualquiera de sus hipotéticos planetas, y hasta hace poco ningún detector podía identificar los planetas a partir del brillo estelar.

La primera fotografía de un posible planeta extrasolar es una fotografía infrarroja tomada a la enana marrón 2M1207 por el Very Large Telescope en 2004. El cuerpo fotografiado (2M1207b), es un joven planeta de gran masa (4 masas jovianas) orbitado a 40 UA de la estrella 2M1207. Este planeta está a unos 2 500 Kelvin de temperatura, debido a su reciente formación, calculada en aproximadamente 10 millones de años. Los expertos consideran que 2M1207 y 2M1207b son un ejemplo atípico, pues en este sistema, la estrella y el planeta están lejos (40 veces la distancia de la Tierra al Sol) y ambos emiten cantidades comparables de radiación infrarroja, pues la estrella es una enana marrón, y el planeta es todavía muy cálido, y por tanto, ambas son claramente visibles en la fotografía. Sin embargo, planetas de edad y órbitas comparables a la terrestre son todavía imposibles de detectar.

■ **Perturbaciones gravitacionales en discos de polvo**

Este método podría incluirse perfectamente en el de detección visual directa.

En estrellas jóvenes con discos circunestelares de polvo a su alrededor es posible detectar irregularidades en la distribución de material en el disco circunestelar ocasionadas por la interacción gravitatoria con un planeta. Se trata de un mecanismo similar al que actúa en el caso de los satélites pastores de Saturno. De este modo ha sido posible inferir la presencia de 3 planetas orbitando la estrella Beta pictoris y de otro planeta orbitando la estrella Fomalhaut (HD 216956). En estrellas aún más jóvenes la presencia de un planeta gigante en formación sería detectable a partir del hueco de material gaseoso que dejaría en el disco

de acrecimiento.

En la actualidad existen numerosos proyectos de las agencias espaciales NASA y ESA desarrollando misiones capaces de detectar y caracterizar la abundancia de planetas, así como de detectar planetas de tipo terrestre (el primero descubierto hasta abril de 2010: Gliese876d). Las dos misiones más importantes hasta el momento son la misión europea COROT, y la misión norteamericana KEPLER, ambas utilizando el sistema de tránsitos. La ambiciosa misión DARWIN/TPF, prevista para una fecha posterior al 2014, será capaz de analizar las atmósferas de estos planetas terrestres, teniendo la capacidad de detectar vida extraterrestre mediante el análisis espectral de estas atmósferas. Estos datos permitirán abordar estadísticamente cuestiones profundas como la abundancia de sistemas planetarios parecidos al nuestro, o el tipo de estrellas en los que es más fácil que se formen planetas. Los últimos descubrimientos en referencia a la detección de planetas extrasolares se pueden consultar en La enciclopedia de los Planetas Extrasolares.

3. Tarea para el portafolios

Detectar un tránsito en un campo fotografiado por la misión espacial SPITZER analizando variaciones en la luminosidad de tres estrellas seleccionadas. Adjuntar las medidas fotométricas y las curvas de luz de cada una de las estrellas y justificar en cuál de ellas estaría sucediendo el tránsito del exoplaneta a tenor de los datos obtenidos.

Identificar el exoplaneta que “acabamos de descubrir” utilizando la herramienta ALADIN y las bases de datos de internet. Justificar si el planeta se encuentra dentro de la zona de habitabilidad o no analizando los datos obtenidos en la práctica.

4. Tránsitos de exoplanetas con ALADIN

4.1. El programa ALADIN

En esta práctica vamos a utilizar el programa de visualización de imágenes astronómicas ALADIN en su versión 6.0, disponible en:

<http://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>)

El objetivo en esta sección es desarrollar el método que seguiremos para detectar el tránsito de un planeta extrasolar a partir de imágenes tomadas por un telescopio. En nuestro caso, utilizaremos imágenes del Telescopio Espacial SPITZER (SST por sus siglas en inglés, lanzado el 25 de agosto de 2003), que es un observatorio espacial infrarrojo de la NASA y que va equipado con un telescopio reflector de 85 cm de diámetro.

Nuestra intención es analizar la luminosidad de distintas estrellas y encontrar información relativa a la existencia de planetas orbitando alrededor de ellas a partir de variaciones en la luminosidad. El campo elegido muestra tres estrellas más brillantes, que son las que analizaremos. Estudiaremos un total de 20 imágenes.

4.2. Cargar y visualizar las imágenes de SPITZER

Seguiremos el método descrito en la actividad guiada número 2 de “Las Lunas de Júpiter” de la asignatura Sistema Solar. Brevemente los pasos a seguir serían:

- Arrancar el programa ALADIN (Software), ya sea la versión instalada en nuestro ordenador o el applet proporcionado en su página web.
- Una vez descargadas las imágenes FITS necesarias, las abrimos con el menú “File >Open”. Seleccionamos File en la parte superior de la ventana y cargamos las distintas imágenes que tenemos. Una vez finalizada

la carga, cerramos la ventana.

- Ajustar y visualizar correctamente la imagen. Para ello, seleccionamos la primera imagen en el visor de ALADIN. Seleccionamos un zoom que nos permita ver la totalidad de la imagen. Utilizando el botón “Pixel” del applet de ALADIN seleccionamos “Color Map: Reverse” y “Contrast: Log”.

4.3. Obtener medidas fotométricas de cada estrella

Para hacer más cómoda la tarea, vamos a denotar a las estrellas del campo de SPITZER como STAR 1, STAR2 y STAR 3. Estos nombres se corresponderán con las estrella más brillantes según se muestra en la Fig. 2. Por lo tanto, tendremos 60 medidas fotométricas en total.

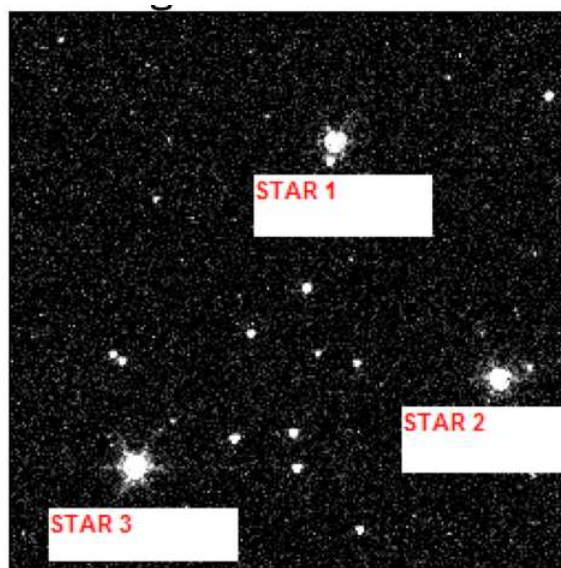


Figura 2: *Nombres y posiciones de las tres estrellas seleccionadas para el estudio fotométrico.*

Para hacer la fotometría utilizaremos un método sencillo. Primero seleccionamos “Image >Photometry measurement >by circle” y creamos un círculo que incluya, por ejemplo, a la STAR 3 y en el que llegemos a alcanzar las 60 000 o 61 000 cuentas en el parámetro “Sum” (suma). Este círculo que acabamos de crear estará asociado a una nueva capa en el visor de ALA-

DIN y podremos moverlo por el campo de una imagen y del resto de imágenes. Es importante que siempre utilicemos **la misma** “apertura” para realizar las medidas fotométricas ya que esto nos garantizará la homogeneidad en los resultados. Esto lo conseguimos utilizando siempre el mismo círculo creado para realizar las medidas fotométricas.

4.4. Análisis de los datos utilizando una hoja de cálculo

Puesto que las hojas de cálculo son el software que más utilizado por el usuario medio, describiremos el proceso de análisis de datos utilizando este tipo de software. Por supuesto, el alumno que lo desee, puede utilizar cualquier otro tipo de software de análisis de datos (Mathematica, Python, Octave, Matlab, awk, Gnuplot, etc...). Podemos anotar los resultados en una tabla (u hoja de cálculo) similar a la Tabla 1.

Cuadro 1: Hoja de cálculo con las medidas fotométricas de la imagen del campo de SPITZER.

Imagen	STAR 1		STAR 2		STAR 3	
	medida	“normalización”	medida	“normalización”	medida	“normalización”
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
Media						

1. Anotar las medidas en la hoja de cálculo

Es importante ir anotando las medidas que tomamos de cada estrella en una hoja de cálculo. Con esto obtendremos una tabla similar a la que presentamos en la Fig. 3.

	STAR 1	STAR 2	STAR 3
1	31040	39022	62343
2	30916	39018	62273
3	31075	39042	62313
4	30935	38971	62394
5	30694	38923	62290
6	30698	39107	62385

Figura 3: Resultados obtenidos al calcular la fotometría de las estrellas en las primeras imágenes.

2. Dibujar las curvas de luz de las estrellas

Una curva de luz de una estrella es la representación de la variación de luminosidad con respecto al tiempo observado. Para conseguir dibujar la curva de luz basta con representar en un gráfico el número de cuentas obtenido con respecto al número de imagen. En cualquier hoja de cálculo podremos insertar un gráfico de tipo “nube de puntos” o “dispersión”. Seleccionando en el eje X el número de imagen y en el eje Y el valor medido en la fotometría. Podemos ver un ejemplo en la Fig. 4.

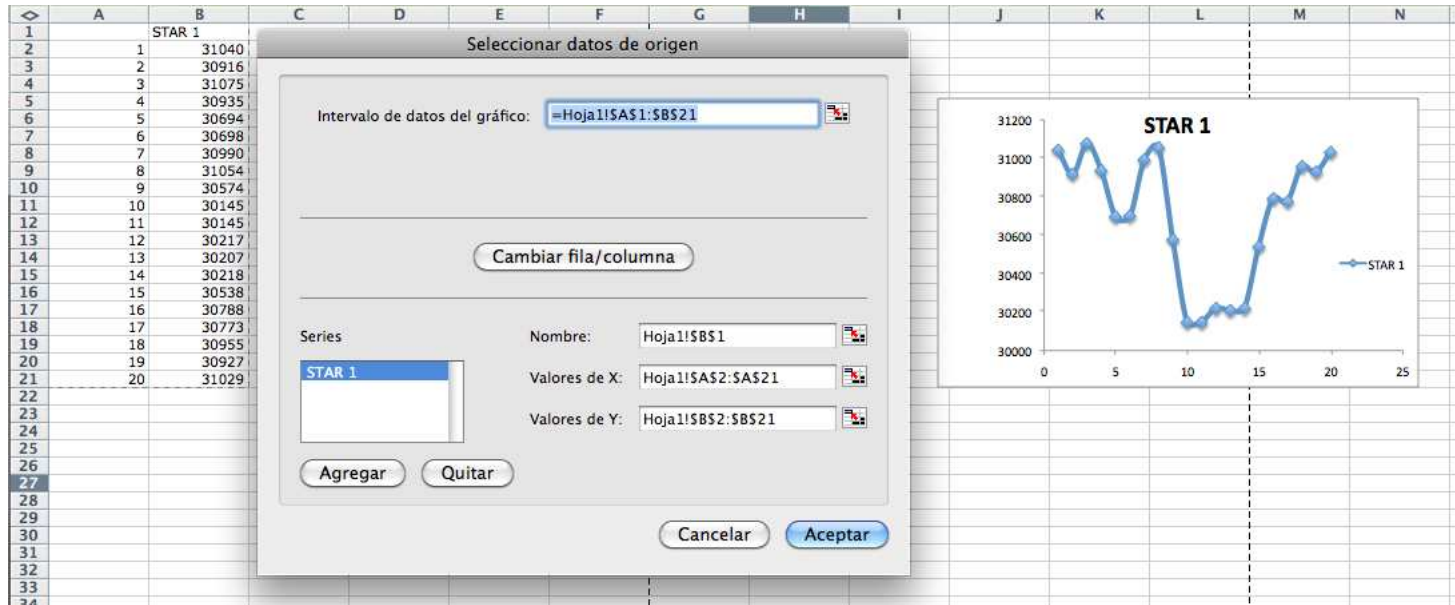


Figura 4: Ejemplo de gráfico en una hoja de cálculo.

3. Analizar las variaciones de luminosidad de las distintas estrellas

Como podréis comprobar (Fig. 5), hay diferencias notables entre las variaciones de luminosidad de las estrellas 1, 2 y 3. Claramente, la curva de luz de una de estas estrellas es diferente a la del resto. Además, se pone de manifiesto que la caída en intensidad en esta estrella es mantenida durante un cierto intervalo de tiempo, lo cual es propio de los tránsitos de un planeta. Las otras dos curvas son más o menos constantes y varían respecto a un valor medio.

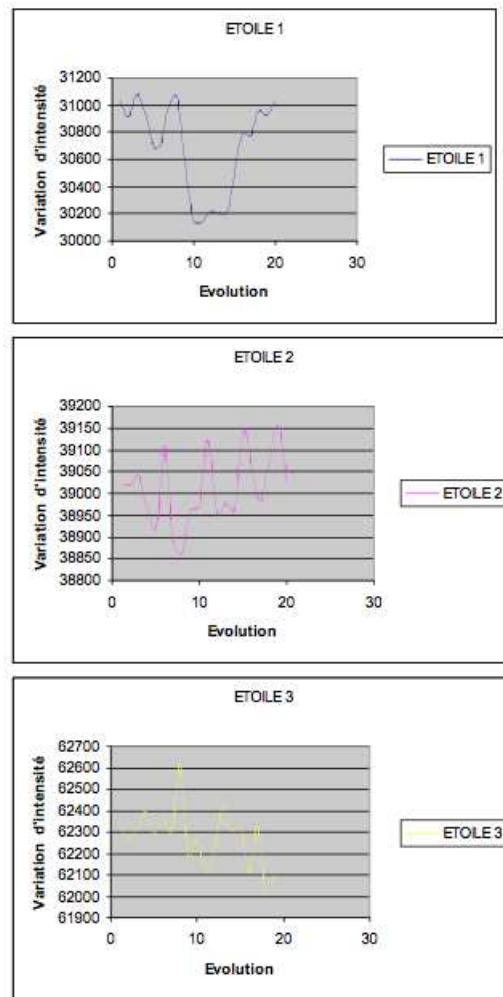


Figura 5: Ejemplo de las curvas de luz obtenidas para las 3 estrellas.

4. Comparando los gráficos

Desde un punto de vista científico, es necesario destacar las particularidades de la estrella en la que hemos detectado el supuesto tránsito comparando los tres gráficos en una misma escala. Por lo tanto, realizaremos un método de “normalización” que básicamente consistirá en restarle a cada medida obtenida la media de las medidas tomadas. Este proceso resulta especialmente sencillo en una hoja de cálculo utilizando funciones del propio software.

Es importante que quede claro que en este proceso no buscamos una normalización en el sentido estadístico, ya que esto enmascararía el tránsito del planeta colocándolo en escalas similares a las variaciones de las otras dos estrellas.

Utilizando los valores obtenidos, podemos dibujar las tres curvas de luz (a las que previamente hemos restado la media) en un mismo gráfico. Aquí podremos visualizar claramente el efecto producido en la señal por el tránsito del exoplaneta. Podemos añadir más detalles al gráfico insertando barras de error. Podemos realizar un cálculo estimado del error calculando la media de las desviaciones estándar de las tres series de datos obtenidos. Es importante que para la estrella en la que se produce el tránsito se tome la desviación estándar **solo** de las primeras imágenes (por ejemplo, de las ocho primeras), ya que las siguientes se ven afectadas por el tránsito del planeta. De este modo, obtendremos un gráfico parecido al que se muestra en la Fig. 6.

5. Zona de habitabilidad

A partir de los catálogos que ofrece ALADIN intenta identificar la estrella en la que hemos descubierto el tránsito. Y obtén sus parámetros físicos fundamentales, estos valores los necesitarás para determinar si el exoplaneta descubierto se encuentra en la zona de habitabilidad.

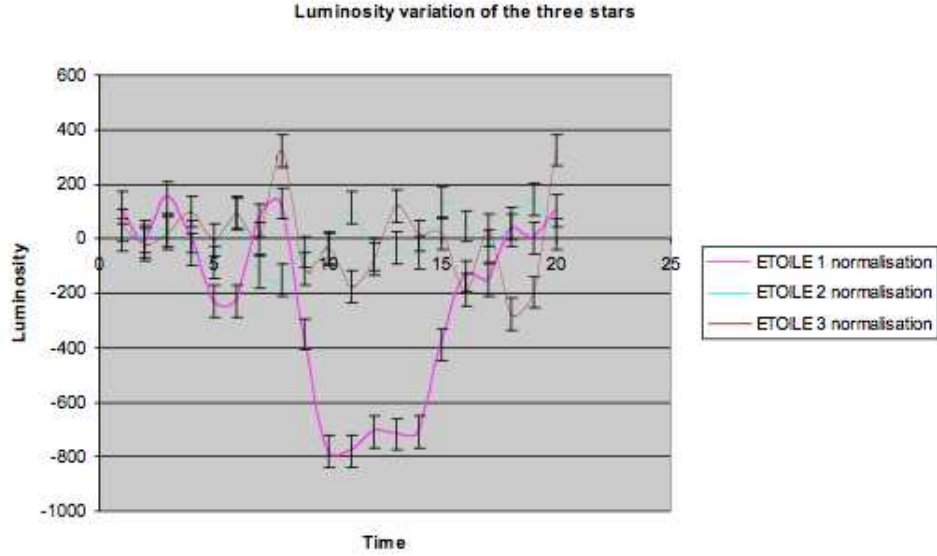


Figura 6: *Curvas de luz de las tres estrellas comparadas tras el proceso de “normalización”.*

5.1. Profundidad del tránsito

Primeramente deberemos calcular la profundidad del tránsito del exoplaneta a partir de los valores medidos. Para ello, mediremos el mayor cambio de brillo o de intensidad a partir del número de cuentas de la imagen. Este valor lo calcularemos como la fracción de luminosidad antes de tránsito con respecto a la luminosidad en el momento más profundo en la curva de luz, i.e.:

$$TD = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \quad (1)$$

donde C_1 es el número de cuentas mayor de la curva de luz (momento de máximo brillo de la estrella) y C_2 el número de cuentas menor de la curva de luz (coincidirá con el momento más profundo durante el tránsito).

5.2. Radio del planeta

La profundidad del tránsito está relacionada con el tamaño del planeta mediante una sencilla relación: el área de la estrella bloqueada por el planeta durante el tránsito es exactamente el área del disco aparente del planeta. De este modo, la proporción entre el área del disco aparente del planeta y el disco de la estrella vendrá determinada directamente por la profundidad del tránsito (disminución de luminosidad). Por tanto:

$$TD = \frac{A_p}{A_s} \quad (2)$$

donde A_p es el área del disco aparente del planeta y A_s el área del disco aparente de la estrella. Dado que el área de un disco viene dada por la expresión $A = \pi r^2$, tendremos:

$$TD = \frac{\pi r_p^2}{\pi r_s^2} = \left(\frac{r_p}{r_s}\right)^2 \quad (3)$$

donde r_p es el radio del planeta y r_s el radio de la estrella.

Con toda esta información y conociendo el radio de la estrella que hospeda a nuestro recién descubierto planeta, podremos estimar el radio del exoplaneta. (Como aproximación podemos considerar que $R_{\odot} \sim 10 R_J$, donde R_J es el radio de Júpiter).

5.3. Radio de la órbita del planeta

Como sabemos, el periodo de un planeta y la distancia del planeta a la estrella están relacionados por la tercera Ley de Kepler, de modo que si determinamos el periodo del planeta podríamos obtener el radio de su órbita. En nuestro caso, una sola curva de luz no es suficiente para determinar el periodo del planeta alrededor de su estrella. Para una buena determinación, la estrella debería ser observada durante muchos días, semanas o meses para poder establecer que los tránsitos ocurren de forma regular y obtener así el periodo orbital. En nuestro caso, utilizaremos la bibliografía de internet para determinar con precisión el periodo de nuestro exoplaneta. Podemos usar la

“La Enciclopedia de los Planetas Extrasolares (<http://exoplanet.eu/>), las referencias de Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) u otras fuentes.

Una vez encontrado el periodo orbital del planeta, utiliza la Tercera Ley de Kepler para determinar el radio de su órbita en U.A., no olvides expresar P en años sidéreos para obtener a en U.A. poder usar la fórmula:

$$1 = \frac{P^2}{a^3} \quad (4)$$

5.4. Habitabilidad del planeta

A la vista de los resultados obtenidos en las secciones anteriores, ¿Se encuentra el planeta en la zona de habitabilidad para el tipo de estrella a la que orbita?. Para responder a esta pregunta utiliza los parámetros estelares que previamente has encontrado en alguna base de datos y la distancia del planeta a su estrella que has calculado en el apartado anterior. También puedes hacer uso de algún gráfico de límites de habitabilidad, como por ejemplo, el que se muestra en la Fig. 7 o en la Fig. 8. Se pueden consultar también algunos artículos clásicos, como por ejemplo Kasting et al. (1993) o algunos más recientes como Selsis et al. (2007), para profundizar más en este campo.

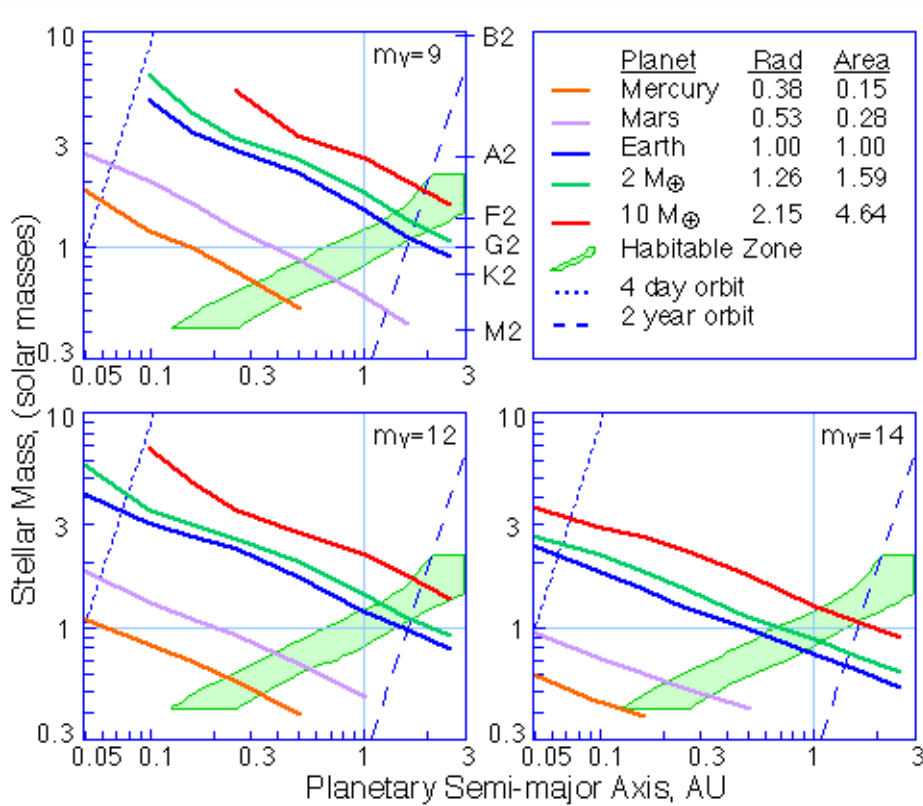


Figura 7: Límites de habitabilidad en función de la masa de la estrella central y su distancia al planeta. Imagen de la web del satélite KEPLER, disponible en <http://www.kepler.arc.nasa.gov/>.

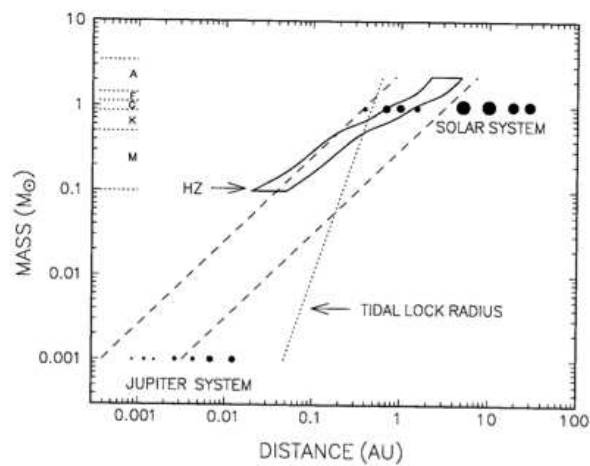


Figura 8: Límites de habitabilidad en función de la masa de la estrella central y su distancia al planeta. Figura de Kasting et al. (1993).

Bibliografía

- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., and Mayor, M.: 2000, *Astrophysical Journal Letters* **529**, L45
- Gary, B. L.: 2007, *Exoplanet Observing for Amateurs*, Mira Digital Publishing, St. Louis, MO. First edition available at http://brucegary.net/book_EOA/x.htm
- Gilmour, I. and Sephton, M. A.: 2004, *An Introduction to Astrobiology*, Cambridge University Press
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., and Donner, K.: 2007, *Fundamental Astronomy, Fifth Edition*, Springer-Verlag
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., and Reynolds, R. T.: 1993, *Icarus* **101**, 108
- Mayor, M. and Queloz, D.: 1995, *Nature* **378**, 355
- Pravdo, S. H. and Shaklan, S. B.: 2009, *Astrophysical Journal* **700**, 623
- Selsis, F., Kasting, J. F., Levrard, B., Paillet, J., Ribas, I., and Delfosse, X.: 2007, *Astronomy & Astrophysics* **476**, 1373
- Software, ALADIN, *está disponible en <http://aladin.u-strasbg.fr/>. Es software libre mantenido por el Centre de Données astronomiques de Strasbourg.*
- Web, *La Enciclopedia de los Planetas Extrasolares: <http://exoplanet.eu/>*
- Wikipedia: 2010, *Planeta extrasolar* — *Wikipedia, La enciclopedia libre*, [Internet; descargado 24-mayo-2010]
- Wolszczan, A. and Frail, D. A.: 1992, *Nature* **355**, 145