



Hackeando exoplanetas

IES Mariana Pineda (Granada)

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. 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.

El astrónomo polaco Aleksander Wolszczan anunció en 1992 el descubrimiento de 3 objetos subestelares de baja masa orbitando el púlsar PSR1257+12 mediante la medición de la variación periódica en el tiempo de llegada de sus pulsos¹ 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 suizo², el 6 de octubre de 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 un nuevo planeta. La carrera por encontrar nuevos planetas no había hecho más que empezar³. Numerosos anuncios en prensa y televisión han divulgado algunos de estos descubrimientos, considerados en su conjunto como una de las revoluciones de la astronomía de finales del siglo XX.

¿Qué es un exoplaneta?

De acuerdo con la ESA (European Space Agency⁴), un exoplaneta es un planeta situado fuera de nuestro sistema solar que orbita una estrella diferente al Sol. Se denominan también planetas extrasolares. Su estudio es clave para entender la formación planetaria y buscar vida.

Clasificación de los exoplanetas

En función de su tamaño, clasificamos los planetas en cuatro tipos mayoritarios (ver figura 1):



Figura 1: Clasificación de exoplanetas

¹Un púlsar es una estrella de neutrones muy densa que normalmente emite impulsos muy regulares en la longitud de ondas de radio.

²Recibieron, por ello, el Premio Nobel de Física *por sus descubrimientos en referentes en el campo de la cosmología física y en particular por el descubrimiento de un exoplaneta que orbita una estrella de tipo solar.*

³A fecha de mayo de 2026 existen 6278 exoplanetas confirmados; esta base de datos se va actualizando en <https://exoplanet.eu/home/>.

⁴https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Que_son_los_exoplanetas

- Los **gigantes gaseosos** son los exoplanetas más grandes. Poseen radios superiores a seis veces el radio de la Tierra y están compuestos casi en su totalidad de hidrógeno y helio. Júpiter y Saturno serían gigantes gaseosos.
- Los **minineptunos** tienen radios entre dos y seis veces el radio de la Tierra. Además de H y He poseen cantidades importantes de amoníaco, metano, ... Son los más abundantes descubiertos hasta ahora. Urano y Neptuno serían neptunos.
- Las **supertierras** varían entre 1,25 y 1,5 veces el radio de la Tierra. No tienen por qué ser rocosos, por lo que el nombre de supertierra quizás no sea el más conveniente. No existen de este tipo de objetos en el sistema solar, que sepamos.
- Los más pequeños de todos son los exoplanetas **terrestres**, con radios inferiores a 1,25 veces el radio de la Tierra y una composición rocosa. Solo representan un 4 % de los exoplanetas descubiertos, lo que indica que nuestras técnicas de detección están todavía bastante sesgadas hacia exoplanetas grandes. Mercurio, Venus, Tierra y Marte serían terrestres.

La Unión Astronómica Internacional (UAI) define un exoplaneta como un objeto con una masa inferior a 13 masas de Júpiter. Por encima de esta masa, el objeto puede fusionar deuterio, convirtiéndose en una enana marrón.

Métodos de detección de exoplanetas

Aunque existen varios métodos para detectar exoplanetas, la ventaja es que no son excluyentes entre sí: utilizar varios métodos diferentes refuerza la existencia de un exoplaneta. Nos centraremos en los dos más usuales:

Método de los tránsitos

Se trata del método que ha resultado más efectivo para el descubrimiento de exoplanetas. Consiste en observar fotométricamente la estrella y detectar sutiles cambios en su intensidad cuando un planeta que orbita a su alrededor se interpone en nuestra línea de visión, produciendo un pequeño eclipse conocido como **tránsito**. En la figura 2 se muestra el tránsito de Venus.



Figura 2: Tránsito de Venus el 5 de junio de 2012

El tránsito de un planeta por delante de su estrella produce un patrón en la curva de luz característico: en cuanto el planeta comienza a eclipsar parte de la luz de la estrella (primer contacto) se produce un descenso brusco de la intensidad medida; tras este descenso, la intensidad se estabiliza, para posteriormente volver a aumentar rápidamente a su nivel inicial (ver figura 3).

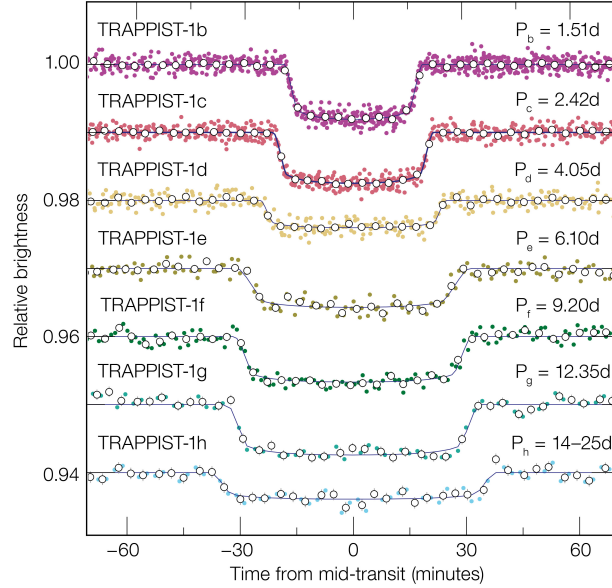


Figura 3: Curvas de luz de los 7 planetas del sistema planetario TRAPPIST-1

El primer tránsito fue detectado por Charbonneau, aunque el planeta ya había sido descubierto previamente por el método de velocidades radiales (HD 209458b). Este método 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 diversas misiones utilicen esta técnica:

- **TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite):** Misión actual de la NASA diseñada específicamente para escanear las estrellas más brillantes y cercanas a la Tierra en busca de exoplanetas en tránsito.
- **Kepler/K2:** Fue la misión pionera de la NASA que descubrió la gran mayoría de los exoplanetas conocidos hasta la fecha utilizando este método.
- **Cheops (CHaracterising ExOPlanet Satellite):** Misión de la ESA (Agencia Espacial Europea) que se dedica a caracterizar exoplanetas ya conocidos mediante el método de tránsito.
- **CoRoT:** Misión pionera de la ESA que también utilizó la fotometría de tránsito para encontrar planetas.
- **James Webb Space Telescope (JWST):** Aunque su objetivo principal es la caracterización, utiliza tránsitos para analizar la atmósfera de exoplanetas.

- **Ariel Space Mission:** Una futura misión de la ESA enfocada en estudiar la atmósfera de exoplanetas detectados previamente.
- **CARMENES:** Desarrollado por un consorcio de once instituciones alemanas y españolas y coliderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), se diseñó para buscar planetas de tipo terrestre en la zona de habitabilidad. Se encuentra en el Observatorio de Calar Alto (Almería).

El método de los tránsitos permite obtener información física muy importante del sistema. Además, permite estimar el ángulo de inclinación del plano orbital (i), puesto que un eclipse sólo se produce si la órbita planetaria es (prácticamente) coplanaria con nuestra línea de visión ($i \sim 90^\circ$). Por este mismo motivo, el método de los tránsitos sólo puede detectar aquellos planetas que tengan una determinada orientación con respecto a nuestra línea de visión.

Radio del planeta

La profundidad del tránsito está relacionada con el tamaño del planeta. 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 está determinada directamente por la profundidad del tránsito (disminución de luminosidad). Por tanto:

$$TD = \frac{A_p}{A_s} \quad (1)$$

donde TD es la profundidad del tránsito, 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:

$$TD = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 \quad (2)$$

donde R_p es el radio del planeta y R_s , el radio de la estrella. Así pues, conociendo el radio de la estrella que hospeda al planeta podremos estimar su radio.

Radio de la órbita del planeta

El período orbital (P) de un planeta y la distancia del planeta a la estrella (a) están relacionados por la tercera Ley de Kepler, de modo que si determinamos el período del planeta podríamos obtener el radio de su órbita si conocemos la masa de la estrella que orbita (M_s). Así, si expresamos P en años sidéreos y M_s en masas solares, tenemos la expresión:

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

de donde podemos obtener a en unidades astronómicas⁵.

⁵Una unidad astronómica, UA, es la distancia promedio entre la Tierra y el Sol; su valor es, aproximadamente, de 150 millones de km

Temperatura de equilibrio del planeta

Sabiendo la distancia a la que se encuentra un planeta de su estrella, y conociendo la temperatura de ésta (T_s), podemos estimar la cantidad de energía que recibe el planeta y, por tanto, su temperatura (T_p). Suponiendo que el planeta fuese un cuerpo negro⁶ perfecto, la temperatura de equilibrio (T_{eq}) entre la radiación que absorbe de la estrella y la radiación que emite viene dada por:

$$T_{eq} = T_s(1 - A)^{1/4} \sqrt{\frac{R_s}{2a}} \quad (4)$$

donde A es el albedo⁷ del planeta y R_s el radio de la estrella. Hay que tener en cuenta que T_{eq} no es más que una estimación de la verdadera temperatura del planeta (T_p), ya que no tiene en cuenta la existencia o tipo de atmósfera planetaria: la temperatura del planeta sólo se puede obtener con precisión mediante un análisis detallado del espectro de la luz del planeta.

Método de las velocidades radiales

Este método se basa en el efecto Doppler⁸. El planeta, al orbitar la estrella central, ejerce también una fuerza gravitacional sobre ésta de manera que la estrella gira sobre el centro de masas⁹ del sistema. El movimiento periódico de la estrella en torno al centro de masas puede detectarse mediante leves desplazamientos en las líneas espectrales según la estrella se acerca a nosotros (corrimiento hacia el azul) o se aleja (corrimiento al rojo). Se trata, por tanto, de un método que utiliza observaciones espectroscópicas de alta precisión. Esta técnica ha sido la más exitosa en la búsqueda de nuevos planetas, pero es más sensible a los planetas gigantes más cercanos a la estrella principal (al producir mayor perturbación gravitatoria), por lo que sólo puede detectar una fracción de los planetas existentes.

Masa del planeta

La curva de velocidad radial mide, en función del tiempo, cuánto se desplazan las líneas espectrales de la estrella debido al efecto gravitatorio del planeta. Esta

⁶Un cuerpo negro es un objeto teórico ideal que absorbe toda la energía electromagnética incidente, sin reflejar ni transmitir luz. Al estar en equilibrio térmico, emite radiación térmica, denominada radiación de cuerpo negro, cuyo espectro depende exclusivamente de su temperatura, no de su forma o composición. Este concepto es clave en física para estudiar la emisión de energía.

⁷El albedo es la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar, medida como un porcentaje (0 % a 100 %). Las superficies claras (nieve, hielo) tienen un albedo alto, reflejando mucha luz, mientras que las oscuras (bosques, océanos) tienen un albedo bajo, absorbiendo energía. El promedio de la Tierra es de aproximadamente 0,3.

⁸El efecto Doppler es el cambio aparente en la frecuencia (tono) de una onda (sonido o luz) cuando la fuente emisora y el observador se mueven uno respecto al otro. Si se acercan, la frecuencia aumenta (sonido más agudo, luz hacia el azul); si se alejan, disminuye (sonido más grave, luz hacia el rojo).

⁹El centro de masas es un punto geométrico que representa la posición promedio de toda la materia en un sistema u objeto, actuando como si toda la masa estuviera concentrada en ese punto para analizar su movimiento. Se utiliza para simplificar el estudio de la traslación de objetos complejos, coincidiendo con el centro de simetría en cuerpos uniformes.

curva se puede ajustar a una órbita kepleriana, y a partir de los elementos orbitales del ajuste, calcular la masa del planeta, M_p , según la fórmula:

$$M_p \sin i = 4,92 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - e^2} K P^{1/3} M_s^{2/3} \quad (5)$$

donde M_p es la masa del planeta en unidades de masas de Júpiter, i es la inclinación de la órbita, e es la excentricidad¹⁰ de la órbita, K la semiamplitud de la velocidad radial¹¹ en m/s, P el periodo orbital en días, y M_s la masa de la estrella en masas solares.

Es importante fijarse en que, si no se conoce el ángulo de inclinación por algún otro método, la técnica de las velocidades radiales únicamente nos dará una cota inferior a la masa del planeta. Por lo tanto, los sistemas más interesantes serán aquellos con medidas de velocidad radial y con tránsitos fotométricos, ya que en estos casos se puede obtener más información física.

Zona de habitabilidad

La zona de habitabilidad delimita el rango de distancias con respecto a una estrella, en las que es posible la existencia de vida. Para que un exoplaneta sea habitable deben darse varias condiciones:

1. Existencia de agua en estado líquido: si un planeta está a una distancia a de su estrella tal que se encuentra dentro de la zona de habitabilidad, se espera que en este planeta el agua esté en estado líquido (si la hubiera), y por tanto podrían darse las condiciones para la existencia de vida tal y como la conocemos¹². Si un planeta está demasiado cerca de su estrella, recibirá demasiada radiación, mientras que si está más lejos que la zona de habitabilidad, no recibirá suficiente energía y su temperatura estará por debajo del punto de congelación (ver figura 4):

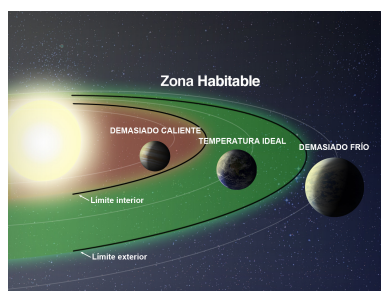


Figura 4: Concepto de zona de habitabilidad

¹⁰La excentricidad orbital es un parámetro numérico que define cuánto se desvía la órbita de un cuerpo celeste (como un planeta o satélite) de un círculo perfecto. Un valor $e = 0$ indica un círculo, mientras que valores entre 0 y 1 representan elipses, donde la forma es más estirada cuanto mayor es la excentricidad. Si $e = 1$ se trata de una parábola, y si $e > 1$ será una hipérbola.

¹¹La velocidad radial de una estrella es su movimiento a lo largo de la línea de visión desde la Tierra, midiéndose mediante el efecto Doppler en su espectro. Un desplazamiento hacia el rojo indica que se aleja, y hacia el azul que se acerca.

¹²El agua es el medio donde ocurren las reacciones químicas necesarias para la vida.

2. Una atmósfera adecuada, pues ayuda a mantener la temperatura estable y proteger de radiación dañina.
3. Tamaño y gravedad: si el planeta es muy pequeño, pierde su atmósfera, y si es muy grande, puede ser gaseoso (como Júpiter) y no tener superficie sólida. Es por ello por lo que los más interesantes son los planetas rocosos tipo Tierra.
4. Estabilidad del sistema estelar: si la estrella es muy activa (muchas llamaradas o radiación), puede dificultar la vida incluso si el planeta está en zona habitable.

El estudio para determinar si un planeta podría albergar vida debe tener en cuenta no sólo si está dentro o no de la zona habitable, sino también las características del planeta, como el tipo de atmósfera, su masa, su campo magnético, etc. Existen muchos estudios actuales sobre la definición de la zona de habitabilidad. En la figura 5 se muestra un diagrama típico de zona de habitabilidad: las líneas punteadas delimitan las zonas habitables en función de la masa de la estrella.

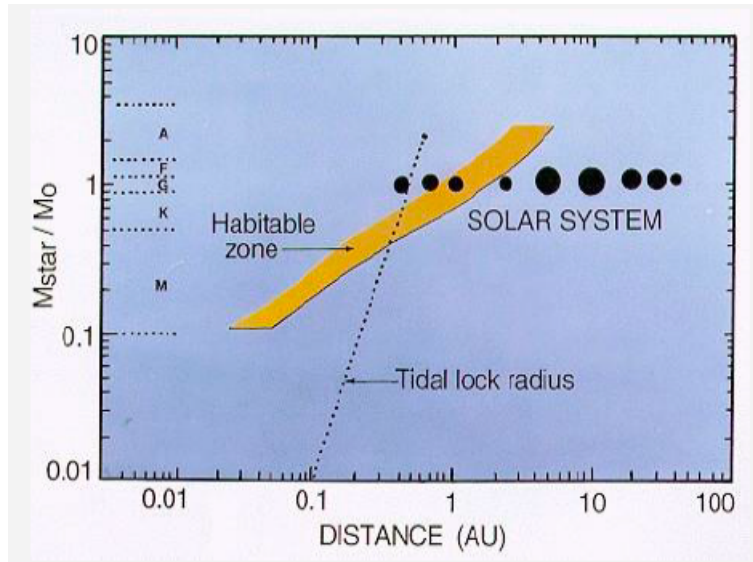


Figura 5: Límites de habitabilidad en función de la masa de la estrella y de su distancia al planeta

Desarrollo de la investigación

La investigación consiste en analizar los datos de un tránsito y la curva de velocidad radial de un planeta, calcular sus parámetros físicos, discutir sus propiedades, deducir qué planeta es consultando bases de datos en Internet y argumentar si el planeta se encuentra en la zona de habitabilidad o no. Hemos utilizado un conjunto de datos, proporcionados por el profesor, quien también nos ha indicado algunos parámetros del planeta:

$$M_S = 0,45M_{\odot}; R_S = 0,46R_{\odot}; T_S = 3350 \text{ K}; P = 2,6439 \text{ días}; e = 0,16$$

Curva de luz de la estrella

A partir de los datos de la luminosidad relativa de la estrella en función del tiempo hemos obtenido la siguiente gráfica:

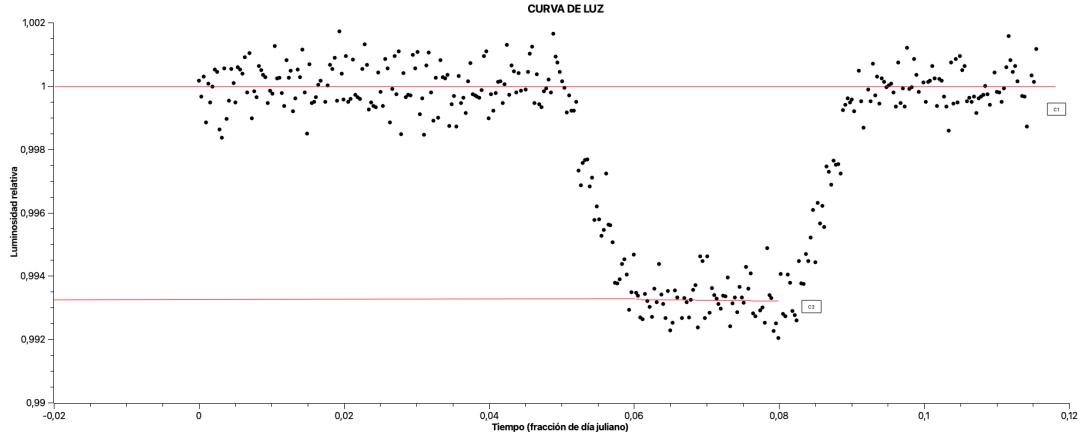


Figura 6: Curva de luz

Del análisis de la gráfica anterior podemos deducir que se intuye la presencia de un planeta por las siguientes razones:

1. La intensidad de la estrella luminosa disminuye en el momento en que el planeta se interpone entre la estrella y nosotros.
2. Durante el tiempo en que el planeta transita por delante de la estrella la intensidad luminosa de ésta apenas varía.
3. La intensidad luminosa vuelve a aumentar una vez que el planeta finaliza su tránsito por delante de la estrella, pues ya no se sitúa entre ésta y nosotros.

Radio del planeta

La profundidad de tránsito (TD) es la relación entre la diferencia de intensidad luminosa (relativa) de la estrella durante el tiempo en que el planeta transita entre ella y el observador y la intensidad luminosa de la estrella. En la gráfica anterior, una vez señaladas las líneas que se corresponden con las intensidades relativas $C_1 = 1$ y $C_2 = 0,993200$, obtenida tras realizar el correspondiente ajuste lineal, observamos que la profundidad de tránsito durante el eclipse es:

$$TD = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = \frac{1 - 0,993200}{1} = 0,006800 \quad (6)$$

La profundidad de tránsito está directamente relacionada con el radio del planeta de acuerdo con la ecuación (2):

$$TD = \left(\frac{R_p}{R_s} \right)^2 \Rightarrow R_p = R_s \sqrt{TD} = 0,46 R_\odot \cdot \sqrt{0,006800} = 0,037933 R_\odot \quad (7)$$

Si tenemos en cuenta que el radio del Sol es de 696340 km, el radio del planeta será:

$$\boxed{R_p = 26413,96 \text{ km}} \quad (8)$$

Radio orbital del planeta

Para hallar la distancia del planeta a la estrella, a , expresada en UA debemos partir de la tercera ley de Kepler (ecuación 3):

$$P^2 = \frac{1}{M_s} a^3 \Rightarrow a = \sqrt[3]{P^2 M_s} \quad (9)$$

donde el periodo, P , del planeta está expresado en años sidéreos y la masa de la estrella, M_s , en masas solares. Sustituyendo los valores aportados nos queda:

$$a = \sqrt[3]{(7,348 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,45} \Rightarrow \boxed{a = 0,02896 \text{ UA} = 4,344 \cdot 10^6 \text{ km}} \quad (10)$$

Este valor tan pequeño nos hace concluir que el planeta se encuentra orbitando muy próximo a su estrella.

Curva de velocidad radial

Hemos representado gráficamente los datos de la velocidad radial de la estrella en función del tiempo, expresado éste en fracciones de días julianos y comenzando en $t = 0$). Posteriormente hemos ajustado la curva (figura 7) a una función sinusoidal del tipo $v = K \sin \omega x$, obteniendo una semi-amplitud de la velocidad radial igual a:

$$K = 17,35 \text{ m/s} \quad (11)$$

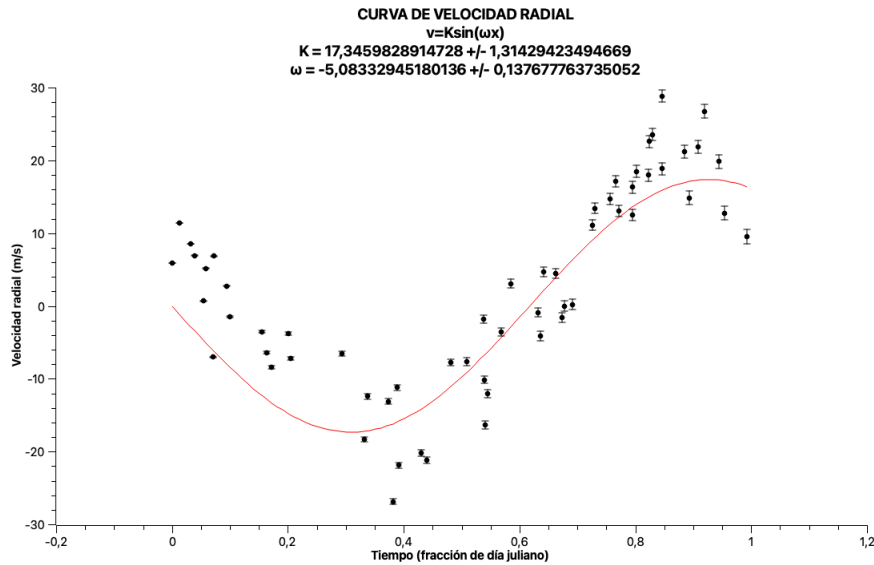


Figura 7: Curva de velocidad radial

Podemos observar que la velocidad radial de la estrella varía periódicamente en el tiempo (el alejamiento/acercamiento del planeta con respecto al observador se traduce en un pequeño desplazamiento de las correspondientes líneas espectrales hacia el rojo o hacia el azul, cuyo valor – medido con un espectroscopio – permite calcular dicha velocidad con ayuda de la expresión del efecto Doppler) debido a la atracción gravitatoria del planeta sobre la estrella.

Masa (mínima) del planeta

Para calcular la masa mínima del planeta debemos considerar que la inclinación de su plano orbital es $i = 90^\circ$; utilizando la ecuación (5) y sustituyendo los valores aportados y calculados, obtenemos el siguiente valor para la masa mínima del planeta:

$$M_p \text{ sen } i = 4,92 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - e^2} K P^{1/3} M_s^{2/3} = 4,92 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - 0,16^2} \cdot 17,352,6439^{1/3} (0,45 M_\odot)^{2/3}$$

$$\boxed{M_p = 0,0635 M_J = 1,3 \cdot 10^{26} \text{ kg}} \quad (12)$$

Densidad del planeta

Suponiendo el planeta esférico, su densidad será, a partir de las ecuaciones (8) y (12), la siguiente:

$$d = \frac{M_p}{V_p} = \frac{M_p}{\frac{4}{3}\pi R_p^3} = \frac{1,3 \cdot 10^{26} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi (26413960 \text{ m})^3} \Rightarrow \boxed{d = 1684,9 \text{ g/cm}^3} \quad (13)$$

De este valor bajo de la densidad deducimos que se trata de un planeta gaseoso (de hecho, tiene una densidad próxima a la de Júpiter).

Temperatura de equilibrio del planeta

Podemos hacer una estimación de la temperatura de equilibrio del planeta empleando la expresión (4) y un albedo nulo ($A = 0$):

$$T_{eq} = T_S (1 - A)^{1/4} \sqrt{\frac{R_s}{2a}} = 3350 (1 - 0)^{1/4} \sqrt{\frac{0,46 R_\odot}{2 \cdot 0,02896 \text{ UA}}} \Rightarrow \boxed{T_{eq} = 2572,96 \text{ K}} \quad (14)$$

donde hemos tenido en cuenta que el radio del Sol es igual a 0,00465247 UA. De este elevado valor para la temperatura podemos inferir que el planeta está lo suficientemente cercano a la estrella como para que su temperatura de equilibrio (ignorando la composición y características de su atmósfera) sea demasiado elevada como para que pueda existir agua en estado líquido en su superficie.

Habitabilidad del exoplaneta

La relación entre la masa de la estrella y la masa del Sol es 0,45, por lo que nos encontraríamos en la zona M de la gráfica de la figura 5; la distancia entre el planeta y la estrella es 0,02896 UA. En la figura 8 hemos representado nuestro planeta con un punto rojo de acuerdo con los dos parámetros anteriores; es claro que no se encuentra en zona habitable (tal y como comentamos en el punto anterior tras calcular su temperatura de equilibrio).

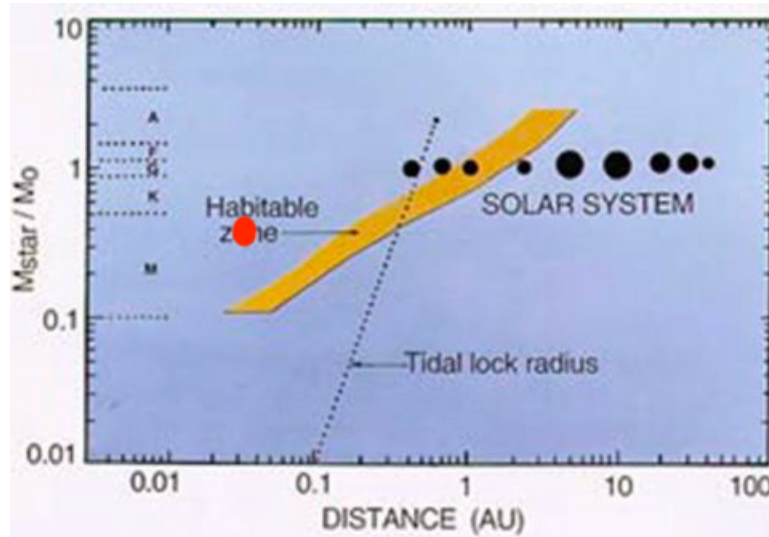


Figura 8: Posición del planeta en el diagrama de habitabilidad

¿De qué planeta se trata?

A partir de los datos proporcionados y calculados hemos consultado en la base de exoplanetas de la NASA <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, resultando que se trata del planeta GJ436b, detectado en 2004 por Butler, Vogt, Marcy, Fischer, Wright, Henry, Laughlin y Lissauer tal como indican en su artículo *A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436*. Se detectó mediante el método de las velocidades radiales, realizando medidas fotométricas Doppler en el observatorio Keck. En dicha página web se muestran otros aspectos interesantes del planeta:

- La inclinación de la órbita es de unos 86° , lo que también hace pensar que el método de los tránsitos podría utilizarse para complementar al método anterior.
- La masa del planeta es 1,2 veces la masa de Neptuno, o unas 21 veces la masa de la Tierra.
- Su baja densidad hace pensar que esté mayoritariamente formado por hidrógeno y helio, y que en su interior contenga hielo y rocas.
- La estrella en torno a la que orbita tiene una antigüedad de unos 3000 millones de años, y es de magnitud 10,7. Se encuentra a 10,14 parsecs de la Tierra.