

(#313). EL SISTEMA PLANETARIO DE TRAPPIST-1

[MONOTEMA] El descubrimiento del sistema TRAPPIST-1 ha generado gran interés debido, fundamentalmente, a que los siete planetas detectados tienen características similares a la Tierra y podrían albergar vida. Esos planetas orbitan alrededor de una estrella enana tipo M, y además lo hacen de manera resonante y con acoplamiento por fuerzas de marea. En este post describo los detalles más relevantes de este hallazgo, y explico de forma breve los principales métodos de detección empleados en este campo de la física, así como también analizo la posible habitabilidad de los planetas encontrados. Muestro, por tanto, de manera didáctica, la complejidad de obtener resultados concluyentes cuando todavía existe incertidumbre importante en los datos, pero al mismo tiempo ilustro que a través de la observación, simulación numérica y análisis estadísticos, se puede obtener un dibujo aproximado de una parte de la galaxia que está a unos 39 años luz de nosotros.

Introducción

El descubrimiento de tres exoplanetas en la zona habitable de la estrella TRAPPIST-1A por Gillon et al. (2016), ha sido uno de los eventos más destacados en el campo de la astrofísica en los últimos años. Tan sólo unos meses más tarde, Gillon et al. (2017) publicaron que habían detectado hasta 7 planetas orbitando esa estrella, los cuales podrían contener agua líquida.

De este modo, el hallazgo de los exoplanetas de TRAPPIST-1 constituye un caso muy atractivo para ilustrar algunas de las actividades fundamentales de la investigación en astrofísica, así como para explicar conceptos clave asociados a la búsqueda de lugares en el espacio con el potencial de albergar vida.

En este artículo voy a describir los detalles de ese descubrimiento, definiendo los términos más importantes que se emplean para su correcto entendimiento, y discutiendo algunas de las contradicciones que muestran los estudios. Lo haré además, de manera didáctica, con el fin de facilitar su conocimiento.

El objetivo de esta investigación es, por tanto, hacer comprensible el significado de este hallazgo científico, analizando brevemente las múltiples implicaciones que de él se derivan.

Descripción del sistema planetario de TRAPPIST-1

Gillon et al. (2016) monitorizaron el brillo de la estrella TRAPPIST-1A durante 245 horas en 62 noches desde el 17 de septiembre al 28 de diciembre de 2015. Esa estrella se encuentra a una distancia estimada de la Tierra de 39.46 años-luz, y es una enana ultra fría tipo M situada en la constelación de Acuario. Su edad se estima en 7.6 ± 2.2 Gyr (Burgasser & Mamajek, 2017), es decir, de varios miles de millones de años, y es ciertamente más pequeña y menos brillante que el Sol. Así, Gillon et al. (2016) describieron su luminosidad, masa y radio como 0.05%, 8% y 11.5% en relación al Sol, respectivamente (los datos actualizados sobre todos los parámetros se encuentran en www.trappist.one).

Como indica Sholkmann (2017), este descubrimiento ha sido posible gracias al trabajo conjunto de varios telescopios terrestres y espaciales: TRAPPIST (*TRansiting Planets and PlanestIsimals Small Telescope*) North system (Chile), el telescopio TRAPPIST-North (Marruecos), el Himalayan Chandra Telescope (India), el Very Large Telescope (Chile), el UK Infrared Telescope (Hawaii), el Spitzer Space Telescope, los telescopios William Herschel y Liverpool (La Palma, España), y el telescopio del South African Astronomical Observatory.

A través del método de tránsito primario, Gillon et al. (2016)

detectaron inicialmente 3 exoplanetas orbitando la estrella: TRAPPIST-1b, TRAPPIST-1c y TRAPPIST-1d.

Posteriormente, Gillon et al. (2017) reportaban la detección de 4 exoplanetas más: TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f, TRAPPIST-1g, y TRAPPIST-1h, completando un sistema de 7 planetas que, al menos en número, es similar al Sistema Solar. La cadencia temporal del proceso de descubrimiento y la publicación de los estudios en revistas científicas puede consultarse en www.trappist.one, así como las características actualizadas de esos planetas (en las Tablas 1 y 2 mostramos algunas de ellas).

Tabla 1. Características de la estrella TRAPPIST-1A

Ascensión recta	$\alpha = 23\text{h } 06\text{m } 29.28\text{s}$	Radio	$0.117 \pm 0.004 R_{\odot}$
Declinación	$\delta = -05^{\circ} 02' 28.5''$	Densidad	$50.7 (-2.2, +1.2) \rho_{\odot}$
Constelación	Acuario	Temperatura efectiva	$2559 \pm 50 \text{ K}$
Distancia	$12.1 \pm 0.4 \text{ pc}$	Luminosidad	$0.000525 \pm 0.000036 L_{\odot}$
Masa	$0.080 \pm 0.007 M_{\odot}$	Edad	$7.6 \pm 2.2 \text{ Gyr}$

1 Gyr = 1000 millones de años; 1 pc (Parsec) = 3.26156 años/luz; El subíndice \odot se refiere al equivalente del Sol de la medida empleada.

Fuente: www.trappist.one/#system

Tabla 2. Características de los planetas de la estrella TRAPPIST-1A

	1b	1c	1d	1e	1f	1g	1h
--	----	----	----	----	----	----	----

Periodo orbital	1.51087081 ± 0.00000060 días	2.4218233 ± 0.00000017 días	4.049610 ± 0.000063 días	6.099615 ± 0.000011 días	9.206690 ± 0.000015 días	12.35294 ± 0.00012 días	18.767 ± 0.004 días
Duración del tránsito	36.40 ± 0.17 minutos	42.37 ± 0.22 minutos	49.13 ± 0.65 minutos	57.21 ± 0.71 minutos	62.60 ± 0.60 minutos	68.40 ± 0.66 minutos	75.6 ± 1.2 minutos
Inclinación orbital	89.65 ± 0.25°	89.67 ± 0.17°	89.75 ± 0.16°	89.86 ± 0.11°	89.680 ± 0.034°	89.710 ± 0.025°	89.76 ± 0.05°
Excentricidad orbital	< 0.081	< 0.083	< 0.070	< 0.085	< 0.063	< 0.061	Desconocida
Semieje mayor	0.01111 ± 0.00034 UA	0.01521 ± 0.00047 UA	0.02144 ± 0.00065 UA	0.02817 ± 0.00085 UA	0.0371 ± 0.001 UA	0.0451 ± 0.0014 UA	0.059 ± 0.003 UA
Radio	1.086 ± 0.035 R _⊕	1.056 ± 0.035 R _⊕	0.772 ± 0.030 R _⊕	0.918 ± 0.039 R _⊕	1.045 ± 0.038 R _⊕	1.127 ± 0.041 R _⊕	0.752 ± 0.032 R _⊕
Masa	0.85 ± 0.72 M _⊕	1.38 ± 0.61 M _⊕	0.41 ± 0.27 M _⊕	0.62 ± 0.58 M _⊕	0.68 ± 0.18 M _⊕	1.34 ± 0.88 M _⊕	Desconocida
Densidad	0.66 ± 0.56 ρ _⊕	1.17 ± 0.53 ρ _⊕	0.89 ± 0.60 ρ _⊕	0.80 ± 0.76 ρ _⊕	0.60 ± 0.17 ρ _⊕	0.94 ± 0.63 ρ _⊕	Desconocida
Irradiación	4.25 ± 0.33 S _⊕	2.27 ± 0.18 S _⊕	1.143 ± 0.088 S _⊕	0.662 ± 0.051 S _⊕	0.382 ± 0.030 S _⊕	0.258 ± 0.020 S _⊕	0.165 ± 0.025 S _⊕
Temperatura de equilibrio	400.1 ± 7.7 K	341.9 ± 6.6 K	288.0 ± 5.6 K	251.3 ± 4.9 K	219.0 ± 4.2 K	198.6 ± 3.8 K	173 ± 4 K

1 UA (Unidad Astronómica) = 149 597 870 700 m (equivale a la distancia media entre la Tierra y el Sol); El subíndice ⊕ se refiere al equivalente de la Tierra de la medida empleada.

Fuente: www.trappist.one/#system

Un análisis sencillo de la Tabla 2 nos indica que los planetas de TRAPPIST-1 tienen una inclinación prácticamente perpendicular al cielo (visto desde la Tierra). Los periodos orbitales son de muy pocos días, dada la corta distancia con respecto a la estrella que podemos tomar de la medida del semieje mayor. Periodo y semieje mayor se relacionan por la Tercera Ley de Kepler.

Todos los planetas tienen órbitas más excéntricas que la Tierra; en nuestro planeta la excentricidad es de 0.0167, es decir, casi circular. No obstante, tal y como comentan Gupta et al. (2001), la Tierra ha sufrido ciclos de excentricidad, por lo que no es un parámetro constante.

Radios, masas y densidades son similares a las de nuestro planeta, aunque los datos para TRAPPIST-1h son mucho más inciertos.

En cuanto a la irradiación y a la temperatura de equilibrio, existe gran variación debido a la diferencia en distancias con respecto a la estrella. Recordemos que la temperatura de equilibrio de la Tierra considerando el albedo (porcentaje de radiación reflejada) es de 254 K (vanLoon & Duffy, 2011). Por tanto, los planetas TRAPPIST-1d, TRAPPIST-1e y TRAPPIST-1f, tendrían temperaturas de equilibrio ciertamente similares a la Tierra. La irradiación juega un papel fundamental en la consideración de potencial habitabilidad del planeta, como posteriormente veremos.

La correlación entre varios de los parámetros de los exoplanetas es altamente compleja. Por ejemplo, Mancini (2017) encontró una posible asociación entre el radio y la temperatura de equilibrio, aunque esa relación no se muestra para el caso de TRAPPIST-1, ya que la correlación de Spearman (ρ) es no significativa $\rho = 0.32$ ($p=0.48$), Méndez & Rivera-Valentín (2017), por su parte, indicaron que existe una correlación positiva entre la excentricidad de la órbita y la irradiación recibida de la estrella, y encuentran que la temperatura de equilibrio media de un exoplaneta decrece con la excentricidad. Para el caso de TRAPPIST-1, $\rho = 0.6$ ($p=0.21$), para ambas correlaciones, por lo que tampoco son estadísticamente significativas. En cuanto a la relación entre la densidad y el radio, Weiss & Marcy (2014) encontraron que para planetas con radios menores a $1.5 R_{\oplus}$, como el caso de los planetas detectados en TRAPPIST-1, la densidad se incrementa con el radio de manera lineal. Sin embargo, $\rho = 0.2$ ($p=0.70$) y la correlación lineal de Pearson $r=-0.23$ ($p=0.94$), es decir, resultados de nuevo no significativos.

No obstante, lo ideal sería volver a calcular esas correlaciones con los datos brutos (pero ya recalibrados)

sobre cada medición, y no sobre los parámetros medios presentes en la Tabla 2. Así, se tendrían muchas más observaciones y unos errores estándares mucho más pequeños, y de este modo mayor potencia para detectar asociaciones significativas.

TRAPPIST-1 presenta resonancia orbital entre sus planetas. Este es un fenómeno que indica que existe una relación fraccional de números enteros entre los periodos de revolución de las órbitas. En nuestro Sistema Solar hay varios casos de resonancia, como entre Neptuno y Plutón, cuya relación de períodos es 3:2 (Varadi, 2007), o entre las lunas de Júpiter; Ganímedes, Europa e Io, cuya relación es 1:2:4 (Matí, Giuppone & Beaugé, 2013). Es decir, por cada rotación de Ganímedes sobre Júpiter, Europa rota 2 veces e Io 4 veces. A este último tipo de resonancia de tres cuerpos en esa fracción de números enteros se le denomina resonancia de Laplace.

Luger et al. (2017) encontraron que los planetas de TRAPPIST-1 están en resonancia con la relación 24, 15, 9, 6, 4, 3, 2. Es decir, por cada 24 órbitas que da TRAPPIST-1b, TRAPPIST-1c da 15, TRAPPIST-1d da 9, y así sucesivamente hasta completar la serie. No son los únicos exoplanetas con resonancia orbital; como indica Scholkmann (2017) también ocurre en Kepler-223, Kepler-80, GJ 876 y HD 82943.

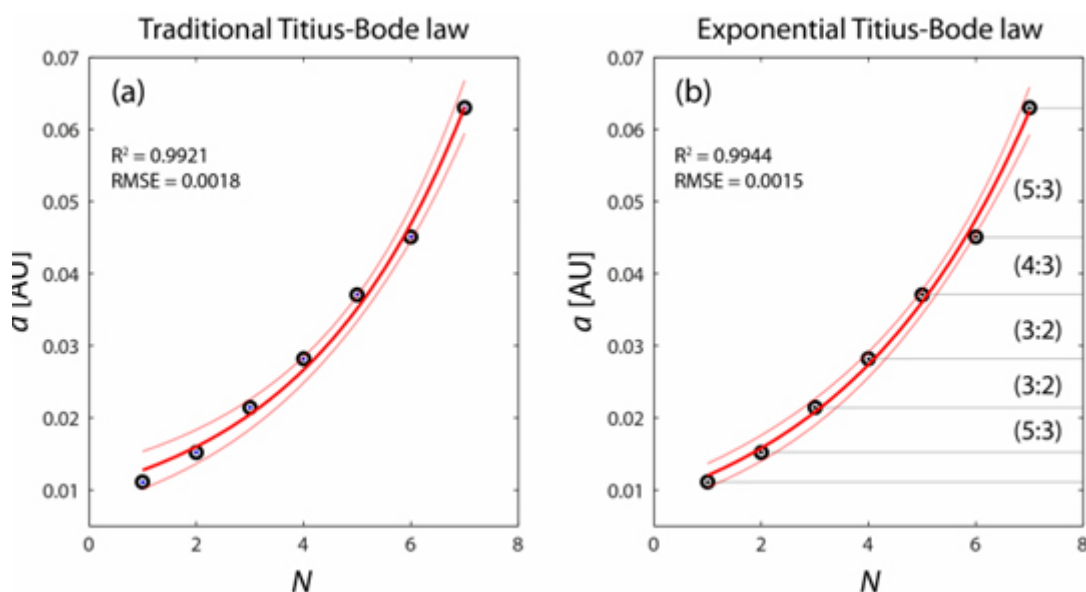
Por tanto, en TRAPPIST-1 existe un sistema resonante, que además conlleva que el espacio orbital entre esos planetas también siga una relación similar, dada por la Tercera Ley de Kepler: $T^2/a^3 = constante$, donde T es el periodo orbital y a es el semieje mayor. Según Tamayo et al. (2017) esta resonancia es un factor de estabilidad del sistema.

Finalmente, los planetas de TRAPPIST-1 también se han analizado para estudiar su ajuste con diferentes versiones de la ley de Titius-Bode. Recordemos que esta ley refleja una relación matemática para describir la distancia entre planetas, a través de la progresión aritmética (0, 3, 6, 12,

48, 96, 192...). Cada número es el doble del anterior, y en el sistema solar se produce un relativo buen ajuste (hasta Urano) con las distancias entre los planetas si se añade 4 y se divide por 10 a cada número de la serie.

Realmente esta ley ha sido testada por Huang & Bakos (2014) sobre 56 sistemas de exoplanetas múltiples reportados por la misión Kepler. De las 141 predicciones sólo 5 fueron confirmadas, lo que, más allá de los posibles sesgos, los autores consideraron como motivo suficiente para cuestionar esta ley. Sin embargo, Scholkmann (2017) consigue ajustar una variación exponencial de la ley de Titius-Bode al sistema TRAPPIST-1 obteniendo un ajuste muy bueno mediante el coeficiente de determinación: $R^2=0.9944$ (Figura 1).

Scholkmann (2017) testó las medidas del semieje mayor usando dos versiones de la ley: $f(n)=\alpha+\beta 2^n$, $f(n)=\alpha e^{\beta n}$, y los ajustes fueron muy buenos vía R^2 : 0.9921, frente a 0.9944. Como no reportó ningún test estadístico para comparar ambos coeficientes, como el que propusieron Steiger & Fouladi (1992), entonces podría ser demasiado apresurado concluir que hay diferencias entre ambas versiones de la ley, dada la gran similitud entre ambos coeficientes de ajuste.



Fuente: Scholkmann

Figura 1. Ajuste de la ley de Titius-Bode a los planetas de TRAPPIST-1

Métodos de detección

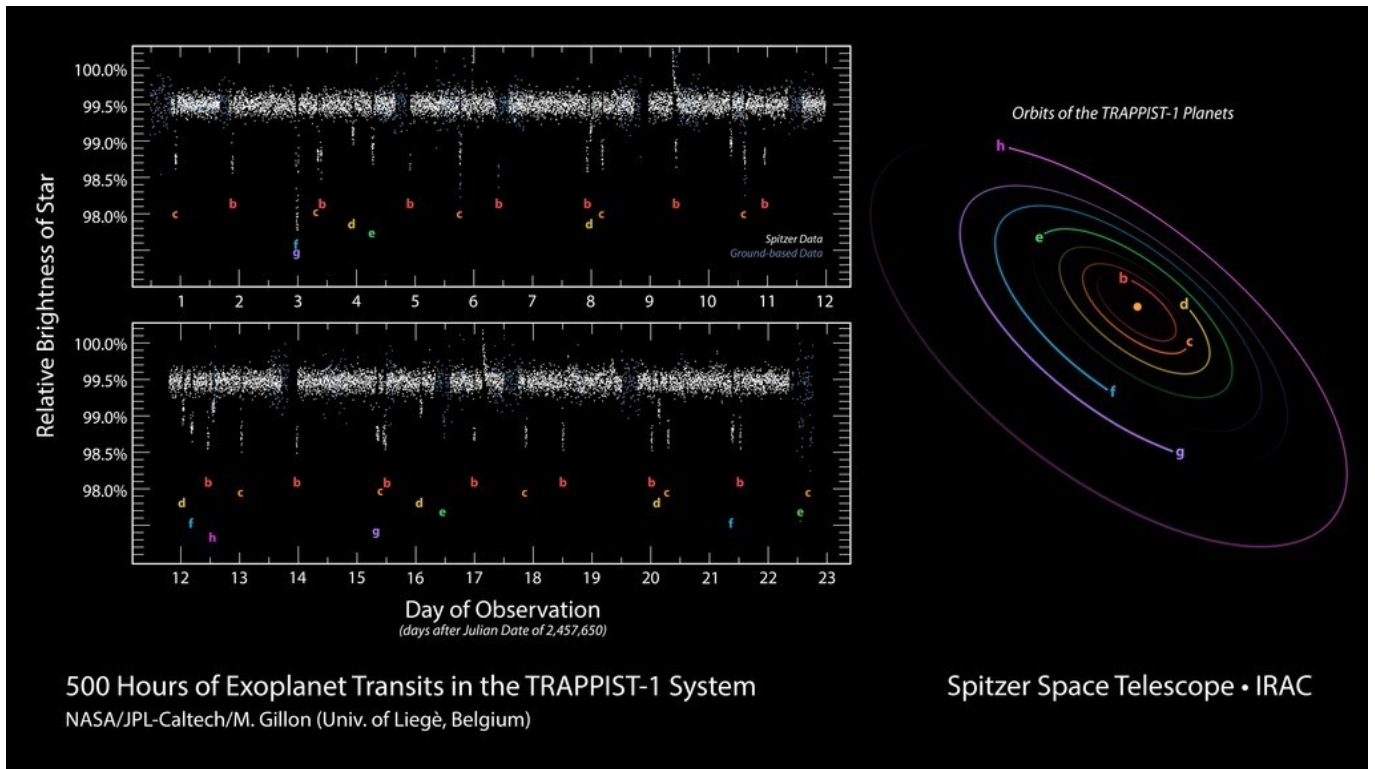
Los exoplanetas son planetas que están fuera de nuestro Sistema Solar. Las distancias, por tanto, son casi siempre muy grandes para poder observarlos directamente, por lo que se habla de “detección” en lugar de “observación”. No obstante, existe un buen número de ellos de los que se tiene esa constancia observacional. Así, en la actualidad, y según www.exoplanet.eu, hay 91 planetas pertenecientes a 84 sistemas planetarios diferentes. Esos planetas son generalmente muy masivos (del orden de entre 3 y 79 masas de Júpiter), aunque el rango de distancias es también muy dispar, comenzando desde los 5.91 pc. La excepción es Kepler-70c y Kepler-70b con masas de 0.0021 y 0.014 masas de Júpiter, respectivamente. Dado que la masa de la Tierra es 0.00315 la masa de Júpiter, ambos exoplanetas tendrían tamaños con cierta similitud al nuestro

Es importante indicar que no todos esos exoplanetas que se agrupan como observados directamente lo son en sentido estricto, sino que algunos de ellos en lugar de observarse se detectan a través de la luz que reflejan de su estrella (Charpinet et al., 2011).

Los planetas de TRAPPIST-1 no fueron detectados por imagen directa, sino que se empleó el método de tránsito primario, que básicamente consiste en medir la variación en el brillo de la estrella cuando un objeto (en este caso un planeta) pasa por delante. A partir de esos datos se puede inferir el radio del exoplaneta, pero no la masa. Tal y como indica Luger (2017), para detectar planetas en tránsito se necesita una precisión fotométrica relativa de 0.1%, y para ello hay que quitar el ruido de las señales producido por la propia

instrumentación.

En la Figura 2 se muestra la variación del brillo de la estrella observada por el telescopio Spitzer Space, de la NASA, que opera en el ámbito del infrarrojo, cuando hay tránsito de planetas.



Fuente: www.nasa.gov

Figura 2. Observaciones del tránsito de exoplanetas en el sistema TRAPPIST-1

Para inferir la masa se ha de emplear el método de variación del tiempo de tránsito, que mide los cambios en el tiempo que tarda un planeta en realizar un tránsito sobre su estrella. Si hay variación en ese tiempo entonces es un indicador de que hay un efecto gravitacional de otros planetas. Así, los investigadores consiguieron estimar la masa de todos los exoplanetas de TRAPPIST-1, excepto la del más lejano: TRAPPIST-1h.

El tránsito primario y la variación del tiempo de tránsito son, de este modo, dos métodos de detección que suelen ir de la mano para completar la detección de exoplanetas. De hecho,

según www.exoplanet.eu, 2774 exoplanetas han sido detectados de esta manera, por lo que es, sin duda, la metodología más empleada en este campo de la física.

Esta técnica se suele emplear en conjunción con la espectroscopía de transmisión, para analizar la composición química de las atmósferas de esos exoplanetas. Cuando se produce un tránsito, la luz de la estrella pasa a través de la atmósfera del planeta, y parte de ellas es absorbida por los átomos o moléculas de ésta, haciendo que el radio del planeta parezca mayor en determinadas longitudes de onda. Sin embargo, como explican Rackham, Apai & Giampapa (2017), la espectroscopía de transmisión no está exenta de problemas, principalmente debido a que el espectro medio de la estrella antes del tránsito no tiene por qué coincidir con la luz incidente en la atmósfera planetaria durante el tránsito, es decir, el espectro de cualquier porción pequeña del disco estelar no será idéntico al espectro del disco completo.

Tras el método del tránsito, la siguiente forma de detección por número de exoplanetas encontrados es el método de la velocidad radial, el cual consiste en analizar el cambio en el espectro de luz de la estrella por efecto Doppler (también se llama espectroscopía Doppler). La existencia de planetas orbitando produce un efecto gravitatorio en la estrella. Así, la estrella orbita también sobre el centro de masas del sistema. Si la estrella se desplaza hacia el observador (es decir, hacia nosotros que estamos en la Tierra), se producirá un desplazamiento hacia el azul del espectro de luz (menor longitud de onda), mientras que si se aleja se producirá un desplazamiento hacia el rojo (mayor longitud de onda). La precisión de este método puede ser del orden de 1m/s, pero como indican Feng et al. (2017), se necesitarían precisiones del orden de 10 cm/s para detectar más planetas análogos a la Tierra en zonas habitables de estrellas cercanas. No obstante, el espectrógrafo HARPS, situado en Chile, y pese a tener una precisión por encima de 10 cm/s, sigue produciendo

descubrimientos (Cloutier et al., 2017). Feng, Tuomi & Jones (2017), recientemente, han propuesto el método "Agatha", que optimiza el sistema de detección de señales con respecto al ruido, como forma de mejorar los datos recogidos por otros sistemas que computan la velocidad radial. Jones et al. (2017), por su parte, proponen emplear los modelos multivariantes gaussianos para incrementar la sensibilidad en la detección.

Este método de la velocidad radial permite estimar las masas de los exoplanetas una vez determinada la masa de la estrella, y según www.exoplanet.eu, hay 739 planetas detectados con este método. La astrometría, que analiza el cambio de posición de una estrella, es desde el punto de vista matemático extremadamente similar al método de la velocidad radial (Gould, 2008). Sólo el exoplaneta HD 176051 b ha sido confirmado usando únicamente astrometría (www.exoplanet.eu).

Al margen de los comentados, existen otros métodos de detección, aunque por el momento con mucho menor uso debido a diferentes factores.

Así, el método basado en el análisis de emisión de radiación electromagnética de un púlsar se restringe únicamente a púlsares, es decir, estrellas de neutrones que emiten radiación periódica en el rango de radiofrecuencia, rayos X y rayos gamma. Como comentan Starovoit & Rodin (2017), los planetas en este tipo de estrellas son un fenómeno raro en comparación con otros miles de planetas descubiertos alrededor de otras estrellas en otras etapas de su evolución. Hasta el momento, sólo 28 exoplanetas han sido detectados por este método (www.exoplanet.eu).

El método de las lentes gravitacionales, por su parte, emplea la relatividad general para detectar la presencia de objetos masivos. cuando la luz que proviene de estrellas distantes se curva en el entorno de esos objetos (Beaulieu et al., 2010). Según www.exoplanet.eu, 65 planetas han sido confirmados por

este método.

En suma, los investigadores tienen ante así diferentes metodologías de detección, en ocasiones dependiendo su empleo del tipo de estrella al que se apunte. Incluso a veces se emplean una combinación de varias de ellas, como en el caso de la detección y caracterización del planeta GJ676A b (Sahlmann, 2016). Hemos descrito las que probablemente son las más empleadas, pero existen otras, como por ejemplo la polarimetría (Hough et al., 2006). La mejora de los sistemas de detección permitirá identificar más exoplanetas, tal y como indican Feng, Tuomi & Jones (2017).

La zona de habitabilidad

En cada sistema extra solar detectado se puede estipular una zona de habitabilidad, es decir, un rango de distancias donde los planetas que se encuentran dentro de ese espacio podrían albergar vida. Sin embargo, la estipulación de la zona de habitabilidad, en cuanto a las características que hemos de considerar, está sujeto todavía a discusión. Si a esto unimos la incertidumbre con respecto a los parámetros que describen a los exoplanetas, nos encontramos ante una situación sujeta a múltiples especulaciones.

Yadav (2017) explica de forma sencilla los criterios para considerar zonas habitables. La presencia de agua en estado líquido es la clave para la habitabilidad. De este modo, la luminosidad de la estrella marca el rango de distancias estimadas donde la temperatura de los planetas permitiría encontrar agua en ese estado. En nuestro sistema solar, Venus y Marte tuvieron agua líquida en la superficie en algún momento en el pasado. Ese rango de distancia con respecto al Sol comprende entonces desde los 0.7 UA de Venus hasta los 1.5 UA de Marte. Sin embargo, y como sigue explicando Yadav (2017), que esté en la zona de habitabilidad no significa que sea realmente un planeta habitable.

El motivo de este matiz es que se deben conjuntar otros factores. Yadav (2017) comenta que es importante que exista un mecanismo de estabilización del clima. En la Tierra el ciclo del carbonato-silicato se ha propuesto como ese proceso. Pero ni Venus ni Marte tienen un clima estabilizado por este mecanismo ni tienen una superficie habitable. Venus tiene una temperatura superficial de unos 733 K con un fuerte efecto invernadero, mientras que Marte la tiene demasiado fría (200 K). Por tanto, aunque Venus y Marte estarían en la zona habitable desde un punto de vista de detección de exoplanetas, no serían habitables en realidad.

Además, habría que considerar la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Los gases de efecto invernadero son indicadores de habitabilidad. El más importante de ellos es el hidrógeno molecular (H_2). Sólo los planetas masivos o muy fríos son capaces de lanzar H_2 desde el interior del planeta. Ni Venus, ni la Tierra, ni Marte lo hacen. El H_2 es un gas muy potente de efecto invernadero porque absorbe radiación sobre un amplio rango de longitudes de onda, y no se condensa hasta una temperatura relativamente alta y en un rango de presión de 1-100 bar. Esto significa que un planeta puede tener una superficie líquida a una distancia varias veces mayor que un planeta con CO_2 en la atmósfera. De este modo, la zona de habitabilidad puede extenderse desde los 0.5 UA hasta los 10 UA sobre una estrella para planetas con H_2 en la atmósfera (Yadav, 2017).

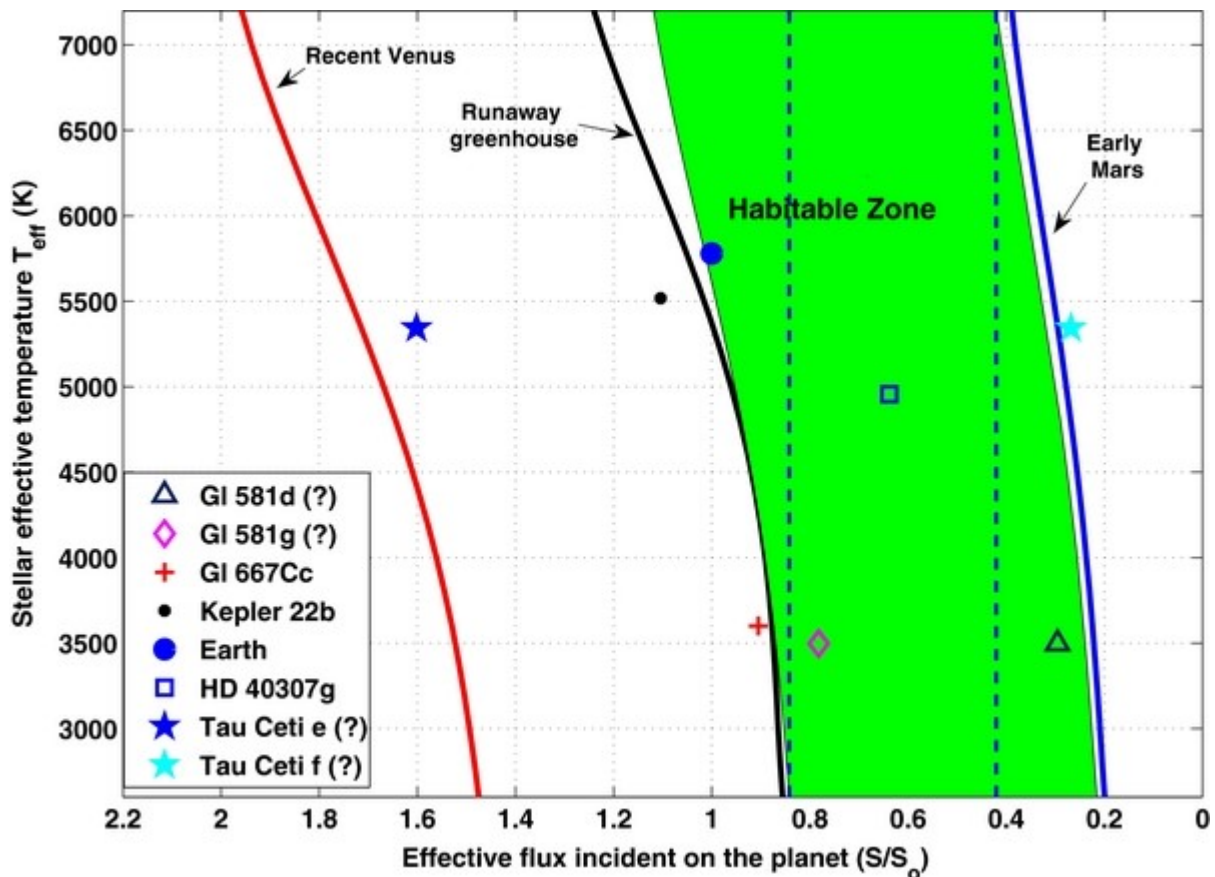
Otro importante indicador de vida, concluye Yadav (2017), son los gases con biofirma, es decir, que son producidos por alguna forma de vida. En la Tierra los gases con biofirma más activos son el O_2 , O_3 , N_2O y CH_4 . Otros gases con biofirma podrían ser el CH_3SH o CH_3Cl . Sin embargo, como veremos a continuación, esta caracterización de Yadav (2017) es un tanto incompleta ante la cantidad de incógnitas que nos muestra el sistema de TRAPPIST-1.

Dado que las enanas tipo M constituyen el 75 de las estrellas de la galaxia (Ditmman et al., 2017), los sistemas como TRAPPIST-1 pueden ser muy prevalentes, y de ahí el interés especial en caracterizar su habitabilidad.

Kopparapu et al. (2013) definen de manera muy general la zona habitable como una región alrededor de una estrella en la que un planeta con una masa similar a la Tierra y con una atmósfera con CO_2 , H_2O y N_2 , pueda tener agua líquida en su superficie. Estos autores indican que, en nuestro sistema solar, los límites para la zona de habitabilidad no estarían entre los 0.5 UA hasta los 10 UA que proponía Yadiv (2017), sino en un rango más estrecho: entre 0.99 UA y 1.70 UA. El motivo es que esos límites los marcarían la pérdida de agua (límite inferior) y el máximo efecto invernadero (límite superior). El máximo efecto invernadero se refiere a que a partir de ahí el efecto empieza a “fallar” en el sentido de que el dióxido de carbono comienza a condensarse fuera de la atmósfera y entonces la superficie del planeta se hace demasiado fría para albergar agua en estado líquido.

Turbet et al. (2017b) restringen aún más la distancia superior y la bajan a 1.27 -1.40 UA. El motivo es que en planetas similares a la Tierra que orbitan una estrella como el Sol podrían permanecer en estados de glaciación permanente por encima de esas distancias, ya que el dióxido de carbono se condensaría en los polos, formando capas permanentes de hielo, lo que a su vez limitaría el efecto invernadero, y con esto la posibilidad de calentar lo suficiente el planeta para producir el deshielo.

Kopparapu et al. (2013), tras realizar sus cálculos, proponen una caracterización de la habitabilidad en función de la temperatura efectiva de la estrella y de la irradiación o flujo efectivo recibido por el planeta (Figura 3).



Fuente:

Kopparapu et al. (2013).

Figura 3. Caracterización de la zona de habitabilidad

Kopparapu et al. (2013) realizaron esa simulación para estrellas con temperaturas efectivas entre 2600 y 7200 K. Dado que TRAPPIST-1 (descubierto después de la publicación de esa investigación) tiene una temperatura efectiva estimada de 2559 ± 50 K, podríamos ubicarlo justo en el eje de abscisas de la Figura 1 y, por tanto, estipular que serían habitables los planetas que estuvieran en un rango aproximado de 0.8 y 0.2 de irradiancia. Así, los planetas TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f, y TRAPPIST-1g, estarían dentro de la zona de habitabilidad (ver Tabla 2 para consultar los datos de irradiancia).

Según Quarles et al. (2017), el planeta TRAPPIST-1f sería el menos compatible con la vida, al no tener las características rocosas de los otros, y que puede no tener agua en la superficie. Es probable que el agua líquida sólo exista como nubes en la parte más alta de ese planeta. Quarles et al. (2017) proponen que TRAPPIST-1e es el mejor prospecto para la

habitabilidad en el sistema, asumiendo que exista una atmósfera que pueda absorber la alta emisión de rayos X de la estrella. Pero de nuevo los autores admiten que las incertidumbres sobre las masas son grandes. Reducir esa incertidumbre es crucial en el futuro para discernir si se trata de un planeta rocoso al estilo de Mercurio o completamente dominado por el agua.

De este modo, aunque un planeta esté en la zona habitable en función de la irradiación incidente, el poseer características rocosas y la necesidad de tener una atmósfera que sirva como escudo protector de la radiación ionizante de la estrella se muestran como factores fundamentales. Los propios autores del descubrimiento admiten en Guillon et al. (2016) que las propiedades atmosféricas de esos planetas dependen de varios factores desconocidos. No es fácil, por tanto, aseverar la habitabilidad de esos exoplanetas. Es más, existe la posibilidad de que un planeta que esté fuera del rango apropiado de irradiación de la estrella pueda tener agua líquida. Luger et al (2017), explican a este respecto que a TRAPPIST-1h le llega una densidad de potencia de su estrella de 200 W/m^2 , que está por debajo de los 300 W/m^2 que como mínimo se requieren para tener agua líquida en la superficie bajo una atmósfera de CO_2 , H_2O y N_2 , pero que si la excentricidad de la órbita fuera alta se podría obtener esos 100 W/m^2 por acoplamiento. Como indican los autores, no es el caso de TRAPPIST-1h, pero es importante señalar esa idea ya que la excentricidad de las órbitas también puede jugar un papel relevante para considerar habitabilidad.

Pero hay aún otro factor añadido que hay que tener en cuenta, y es la resonancia espín-órbita 1:1 o rotación síncrona. Para el caso de un planeta orbitando una estrella, esta resonancia ocurre cuando ese planeta completa una revolución sobre el astro en el mismo tiempo que su rotación sobre su eje de espín (Antognini, Biasco & Chierchia, 2013). Este hecho (aplicado

esta vez a la interacción satélite-planeta) es lo que explica que la Luna muestre siempre la misma cara a la Tierra.

Este tipo de acoplamientos se forman por las llamadas fuerzas de marea, y representan un factor en contra de la habitabilidad del planeta porque hace que haya unas grandes diferencias de temperatura entre ambas caras, lo que a su vez podría provocar importantes vientos. Según Wall (2017), Michael Gillon, el principal autor del descubrimiento del sistema TRAPPIST-1 piensa que aún no está claro que todos esos planetas pueden tener este tipo de acoplamiento, aunque es probable que así sea. No obstante, y en palabras del propio Gillon, incluso en esas condiciones podría haber vida si existe una atmósfera que pueda transportar calor de la cara alumbrada hacia la cara oscura, es decir, paliar parcialmente el gradiente de temperatura en ambos lados del planeta.

En cualquier caso, no hay certeza sobre esa posible rotación sincrónica. De hecho, Barnes (2017) indica que para planetas con órbitas circulares es más probable que exista ese acoplamiento, pero a medida que las órbitas se hacen más excéntricas se liberarían o rotarían súper sincrónicamente. Barnes (2017) comparte la idea mostrada en estudios previos de que ese umbral estaría en una excentricidad igual o menor a 0.12, ciertamente muy superior a las encontradas para los planetas de TRAPPIST-1 (ver Tabla 2). Por tanto, esto reforzaría que esos planetas estuvieran en resonancia espín-órbita 1:1.

El calentamiento por marea, es una de las consecuencias de la existencia de esas fuerzas de marea, y puede hacer que los planetas que a priori se consideran habitables no lo sean en realidad. Como los planetas de TRAPPIST-1 tienen excentricidad mayor que cero, se produce un efecto de disipación de calor en su interior, que puede ocasionar evaporación de agua irreversible. Barr, Dobos & Kiss (2017), estimaron la cantidad de calor disipado en los exoplanetas de TRAPPIST-1, indicando que los planetas TRAPPIST-1b y TRAPPIST-1c tendrían demasiado

flujo de calor, lo que los convertiría en inhabitables.

El acoplamiento por fuerzas de marea también puede tener un papel importante en la existencia de un campo magnético en los exoplanetas. Al igual que ocurre en la Tierra, el campo magnético es fundamental para proteger el planeta de las partículas cargadas de alta energía del viento de la estrella y también de la radiación electromagnética ionizante y los rayos cósmicos. Dirscoll & Barnes (2015), en su estudio de simulación sobre exoplanetas en enanas tipo M con masas entre 0.1 y 0.6 la masa del Sol, encuentran que ese acoplamiento permite una disipación de energía del manto que hace enfriar el núcleo. Si se produce un súper enfriamiento del núcleo entonces la dinamo que origina el campo magnético dejaría de funcionar, lo que es más probable que ocurra en órbitas excéntricas. Por ejemplo, Marte, con una órbita más excéntrica que la Tierra (0.0934 frente a 0.0167), se enfrió de tal manera hace 4000 millones de años que cesó la actividad de su dinamo magnética. Esto hizo que Marte perdiera su campo magnético y evolucionara de manera muy diferente a nuestro planeta (Michalski, et al., 2017). Cuando esos planetas tienen órbitas circulares, la dinamo funcionaría de manera similar a como lo hace en la Tierra.

La carencia de un campo magnético puede incrementar en más de 3 órdenes de magnitud la incidencia de la radiación en la atmósfera (Grießmeier, et al., 2016a). Las características de esa atmósfera determinarían la dosis de radiación que llegaría a la superficie. Como indican (Grießmeier, et al., 2016b), si la atmósfera es similar a la terrestre la dosis de radiación se incrementa por un factor de dos, mientras que si la atmósfera es más débil el efecto sería mucho más serio, con un aumento de dos órdenes de magnitud de la radiación incidente, con lo que ello supondría para la habitabilidad. Aunque todavía se desconoce la presencia o no de campo magnético para esos planetas, sí que Khodachenko et al. (2007) indicaron que para los planetas acoplados por fuerzas de marea el campo

magnético probablemente sería débil.

La que sí que tiene un campo magnético es la propia estrella TRAPPIST-1, estimado en 600 G (Garraffo et al., 2017), lo que podría crear un ambiente tremendamente hostil en los exoplanetas debido a que la presión de los vientos de la estrella estaría entre 10^3 y 10^5 veces la que recibe la Tierra del Sol. Además, varios planetas están expuestos a las ondas de Alfvén. Así, las atmósferas de los planetas de TRAPPIST-1 podrían estar mucho más expuestas a la pérdida de gases y a la evaporación. Sin embargo, Dong et al. (2017), tras realizar también simulaciones numéricas, concluyen que los planetas más exteriores de TRAPPIST-1 serían capaces de retener sus atmósferas en una escala temporal de miles de millones de años, pese a la exposición a la erosión por el viento de la estrella. Concretamente, TRAPPIST-1g sería el mejor prospecto (también TRAPPIST-1h pero este planeta tiene otros factores en contra).

Cierto tipo de radiación, como los rayos ultravioletas (UV), es esencial para la vida en determinadas dosis. Las estrellas enanas tipo M, como TRAPPIST-1, es probable que no irradien lo suficiente a sus planetas en ese rango de longitudes de onda. Como indican Ranjan, Wordsworth & Sasselov (2017), los planetas de enanas tipo M reciben entre 100 y 1000 veces menos flujo UV que lo que recibió la Tierra en sus primeras etapas. Dado que la evidencia reciente sugiere que los rayos UV tuvieron un papel fundamental en el origen del RNA (ácido ribonucleico), los investigadores se preguntan en la actualidad si ese bajo flujo UV es un factor en contra para la vida en esos exoplanetas.

En cualquier caso, y como concluyen Ranjan, Wordsworth & Sasselov (2017), también es posible que las llamaradas transitorias de radiación UV que emiten las enanas tipo M pueda ser suficiente para ese primer empujón a la vida. La composición de la atmósfera sería, entonces, fundamental; una

atmósfera similar a la de la Tierra en densidad protegería de los rayos UV haciendo llegar a la superficie un flujo similar al de nuestro planeta. Sin embargo, una atmósfera más erosionada o una atmósfera anóxica (sin oxígeno) haría la vida muy hostil en la superficie, incluso a los organismos extremófilos (O'Malley-James & Kaltenegger, 2017). Pero incluso en una atmósfera que fuera resistente a la erosión y a la radiación ionizante sería difícil que se acumularan significativamente gases de efecto invernadero, como CO₂, CH₄ o NH₃ (Turbet et al., 2017a).

El cómo afectaría a la atmósfera de un exoplaneta los flujos de rayos X y UV extremos en los primeros años de vida de una estrella tipo M podría ser decisivo para la consideración de habitabilidad. Airapetian et al. (2017) postulan que esos flujos de radiación ionizante pueden erosionar la atmósfera, afectando a la eficiencia del efecto invernadero y la dosis de UV que llega a la superficie. Además, se perdería oxígeno y nitrógeno de esa atmósfera, lo que haría al exoplaneta inhabitable en varios cientos de millones de años.

Schwieterman et al. (2017) reconocen que la interacción de todos estos factores descritos es muy compleja, y que está sujeta a muchas incertidumbres. Por ejemplo, ciertos gases que son considerados como biofirmas, también pueden ser producidos de manera abiótica, es decir, sin presencia de vida. Así el CH₄ que se produce del metabolismo anaerobio microbiano (es decir, a partir de organismos vivos) también puede formarse de manera abiótica por procesos fotoquímicos. Esto hace que se puedan producir falsos positivos, o lo que es lo mismo, que se considere que esas biofirmas provienen de procesos biológicos cuando en realidad no es así. Por eso es importante obtener información de más de uno de esos gases, porque en la medida en que haya más evidencia de la existencia de varios de ellos disminuye la probabilidad de que haya falsos positivos. La existencia de información adicional, como el estudio del límite rojo de cada planeta podría ser crucial para determinar

si un planeta produce oxígeno a partir de organismos vivos (vegetación). El límite rojo se refiere al aumento de la reflectividad de la superficie del planeta en las longitudes de onda del infrarrojo cercano, y es un indicador de la existencia de vegetación (Takizawa et al., 2017). En la Tierra, la luz visible es mayoritariamente absorbida por las plantas para producir la fotosíntesis, mientras que en el infrarrojo cercano se dispersa mucha mayor cantidad.

Los estudios sobre potencial habitabilidad a veces también se contradicen. Por ejemplo, si el planeta TRAPPIST-1g sería el mejor prospecto para la vida en investigaciones como las de Dong et al. (2017), TRAPPIST-1e lo sería para Quarles et al. (2017) y Turbet et al. (2017a), y TRAPPIST-1d para Barr, Dobos & Kiss (2017), y Alberti et al. (2017). Estos últimos autores realizan un modelo para simular el clima de los siete exoplanetas sobre diferentes condiciones de efecto invernadero. Sin embargo, y como hemos mencionado con anterioridad, TRAPPIST-1d no estaría en la zona de habitabilidad según el criterio de Kopparapu et al. (2013).

De cualquier modo, si la vida ha germinado en uno de esos planetas de TRAPPIST-1, la probabilidad de su extensión al resto del sistema a través de la panspermia interplanetaria es más alta que, por ejemplo, en el sistema Tierra-Marte. Por tanto, si ha surgido vida en uno de esos planetas, podría haberse extendido a los demás (Lingam & Loeb, 2017).

Finalmente, la evolución de la vida hacia estados más complejos o inteligentes requiere también de una serie de condiciones, no sólo biológicas, sino además geofísicas. (Stevenson & Large, 2017). Así, la diversidad geológica (que se relaciona con el crecimiento del contenido de información del entorno) puede ser un factor determinante para que la vida evolucione hacia formas más complejas. Exoplanetas que combinen placas tectónicas y superficies secas con zonas oceánicas tienen mayor probabilidad de desarrollar vida inteligente.

Conclusión

El descubrimiento del sistema TRAPPIST-1 ha sido uno de los eventos más notables en la búsqueda de exoplanetas en los últimos años, debido esencialmente a que los siete planetas detectados tienen características similares a la Tierra y podrían albergar vida. Esos planetas orbitan alrededor de una estrella enana tipo M, haciéndolo de manera resonante y con acoplamiento por fuerzas de marea.

La combinación de la observación del tránsito en el rango del infrarrojo, y de la variación del tiempo de tránsito han sido claves para caracterizar, respectivamente, el radio y la masa de esos planetas. Con la ayuda también de la espectroscopía de transmisión y de simulaciones numéricas diferentes investigadores están tratando de plantear posibles hipótesis acerca de la composición de la atmósfera, y también para determinar la influencia del campo magnético, el viento y la radiación ionizante de la estrella sobre los planetas.

La búsqueda de exoplanetas y el análisis de su habitabilidad requiere de la mezcla de la astrofísica, química, biología y geofísica, en un enfoque interdisciplinario (Kaltenegger et al., 2010). Por ello, es común encontrar estudios con cierto grado de contradicción en sus conclusiones, a falta de más datos y de simulaciones numéricas con nuevos escenarios. Sin embargo, y como hemos visto, un cuerpo importante de investigaciones coincide en considerar a TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f y TRAPPIST-1g como los mejores prospectos de habitabilidad.

La exploración del sistema TRAPPIST-1 continúa, y próximamente se verá impulsada por los nuevos datos que pueda aportar el telescopio espacial James Webb, que previsiblemente se lanzará en 2019. Asimismo, y como indican Del Genio et al. (2017), la caracterización de exoplanetas más cercanos, como Próxima Centauri b también ayudarán a modelizar la habitabilidad del sistema TRAPPIST-1.

Referencias

Airapetian, V. S., et al. (2017). How hospitable are space weather affected habitable zones? The role of ion escape. *The Astrophysical Journal Letters*, 836, L3, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L>

Alberti, T. et al. (2017). Comparative climates of TRAPPIST-1 planetary system: results from a simple climate-vegetation model. *The Astrophysical Journal*, 844 (1), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa78a2>

Antognini, F., Biasco, L. & Chierchia, K. (2013). The spin-orbit resonances of the Solar system: A mathematical treatment matching physical data. *Journal of Nonlinear Science*, 24, 473, <https://doi.org/10.1007/s00332-014-9196-7>

Barnes, R. (2017). Tidal locking of habitable exoplanets. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 129, 509, <https://doi.org/10.1007/s10569-017-9783-7>

Barr, A. C., Dobos, V. & Kiss, L. L. (2017). Interior structures and tidal heating in the TRAPPIST-1 planets. *Astronomy & Astrophysics*, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731992>

Beaulieu, J. P. et al. (2010). From frozen super Earth to habitable Earth via microlensing. *International Conference In the Spirit of Lyot*. Paris.

Burgasser, A. J. & Mamajek, E. E. (2017). On the age of the TRAPPIST-1 system. *The Astrophysical Journal*, 845 (2), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7fea>

Charpinet et al. (2011). A compact system of small planets around a former red-giant star. *Nature*, 480, 496-499, doi: [10.1038/nature10631](https://doi.org/10.1038/nature10631)

Cloutier, R. et al. (2017). Characterization of the K2-18 multi-planetary system with HARPS. *Astronomy & Astrophysics*,

Aceptado para publicación.

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731558>

Del Genio, et al. (2017). Habitable climate scenarios for Proxima Centauri b with a dynamic ocean. *Astrobiology*, [arXiv:1709.02051](https://arxiv.org/abs/1709.02051) [astro-ph.EP].

Dittman, J. et al. (2017). A temperate rocky super-Earth transiting a nearby cool star. *Nature*, 544 (760), 33-336, <https://doi.org/10.1038/nature22055>

Dong, C. et al. (2017). Atmospheric escape from the TRAPPIST-1 planets and implications for habitability. Working Paper, [arXiv:1705.05535](https://arxiv.org/abs/1705.05535) [astro-ph.EP].

Driscoll P. E. & Barnes R. (2015). Tidal heating of Earth-like exoplanets around M stars: Thermal, magnetic, and orbital evolutions. *Astrobiology*, 15 (9), 739-760. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1325>

Feng, F. et al. (2017). Color difference makes a difference: Four planet candidates around τ Ceti. *The Astronomic Journal*, 155 (4), 135, <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa83b4>

Feng, F., Tuomi, M. & Jones, H. R. A. (2017). Agatha: disentangling periodic signals from correlated noise in a periodogram framework. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470 (4), 4794–4814, <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1126>

Garraffo, C. et al. (2017). The threatening magnetic and plasma environment of the TRAPPIST-1 planets. *The Astrophysical Journal Letters*, 843 (2), <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa79ed>

Gillon, M. et al., (2016). Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. *Nature*, 533, 221–224, <https://doi.org/10.1038/nature17448>

Gillon, M. et al., (2017). Seven temperate terrestrial planets

around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542, 456–460, <https://doi.org/10.1038/nature21360>

Gould, A. (2008). On the difference in statistical behavior between astrometric and radial-velocity planet detections. Working Paper, [arXiv:0807.4323](https://arxiv.org/abs/0807.4323) [astro-ph].

Grießmeier, J. M. et al. (2016a). Galactic cosmic rays on extrasolar Earth-like planets. I. Cosmic ray flux. *Astronomy & Astrophysics*, 582, A44, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425451>

Grießmeier, J. M. et al. (2016b). Galactic cosmic rays on extrasolar Earth-like planets. II. Atmospheric implications. *Astronomy & Astrophysics*, 587, A159, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425452>

Gupta, A. K. et al. (2001). Earth eccentricity cycles and indian summer monsoon variability over the past 2 million years: Evidence from deep-sea benthic boraminifer. *Geophysical Research Letters*, 28 (21), 4131-4134, <https://doi.org/10.1029/2001GL013315>

Hough, J. H. et al. (2006). PlanetPol: A very high sensitivity polarimeter. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118, 847, <https://doi.org/10.1086/507955>.

Huang, C. X. & Bakos, G. A. (2014). Testing the Titius-Bode law predictions for Kepler multiplanet systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442 (1), 674–681, <https://doi.org/10.1093/mnras/stu906>

Jones, D. E. et al. (2017). Improving exoplanet detection power: Multivariate gaussian process models for stellar activity. Working Paper, [arXiv.org/abs/1711.01318](https://arxiv.org/abs/1711.01318)[astro-ph.IM].

Kaltenegger, L. et al. (2010). Deciphering spectral fingerprints of habitable exoplanets. *Astrobiology*, 10 (1),

<https://doi.org/10.1089/ast.2009.0381>

Khodachenko, M. L. et al. (2007). Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. I. CME impact on expected magnetospheres of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones. *Astrobiology*, 7 (1), 167–184. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0127>

Kopparapu, R. K. et al. (2013). Habitable zones around main sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, 765 (2), 131, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/131>

Libert, A. S. & Renner, S. (2013). Detection of Laplace-resonant three-planet systems from transit timing variations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430 (2), 1369–1375, <https://doi.org/10.1093/mnras/sts722>

Lingam, M. & Loeb, A. (2017). Enhanced interplanetary panspermia in the TRAPPIST-1 system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (26), <https://doi.org/10.1073/pnas.1703517114>

Luger, R. et al. (2017). A seven-planet resonant chain in TRAPPIST-1. *Nature Astronomy*, 1, 0129, <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0129>

Mancini, L. (2017). On the relationship between the planetary radius and the equilibrium temperature for transiting exoplanets. *International Journal of Modern Physics D*, 26, 1741012, <https://doi.org/10.1142/S0218271817410127>.

Martí, J. G., Giuppone, C. A. & Beaugé, C. (2013). Dynamical analysis of the Gliese-876 Laplace resonance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433 (2), 928–934, <https://doi.org/10.1093/mnras/stt765>

Méndez, A. & Rivera-Valentín, E. G. (2017). The equilibrium temperature of planets in elliptical orbits. *The Astrophysical*

Michalski, J. R. et al. (2017). The Martian subsurface as a potential window into the origin of life. *Nature Geoscience*, 11, 21-16, <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0015-2>

O'Malley-James, J. T. & Kaltenegger, L. (2017). UV Surface habitability of the TRAPPIST-1 system. *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 469 (1), L26-L30, <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx047>

Papaloizou, J. C. B., Szuszkiewicz, E. & Terquem, C. (2017). The TRAPPIST-1 system: Orbital evolution, tidal dissipation, formation and habitability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Aceptado para publicación, <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2980>

Quarles, B. et al. (2017). Plausible compositions of the seven TRAPPIST-1 planets using long-term dynamical simulations. *The Astrophysical Journal Letters*, 842 (1), <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa74bf>

Rackham, B. V. Apai, D. & Giampapa, M. S. (2017). The transit light source problem: False spectral features and incorrect densities for M dwarf transiting planets. Working Paper, [arXiv.org/abs/1711.05691](https://arxiv.org/abs/1711.05691)[astro-ph].

Ranjan, S. Wordsworth, R. & Sasselov, D. D. (2017). The Surface UV environment on planets orbiting M dwarfs: Implications for prebiotic chemistry and the need for experimental follow-up. *The Astrophysical Journal*, 843 (2), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa773e>

Sahlmann, J. et al. (2016). The mass of planet GJ676A b from ground-based astrometry. *Astronomy & Astrophysics*, 595, A77, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628854>.

Scholkmann, F. (2017). Harmonic orbital resonances and orbital

long-range order of the TRAPPIST-1 exoplanetary system. *Progress in Physics*, 13 (2), 125-129.

Schwieterman, E. W. et al. (2017). Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. Working Paper.

Starovoit, E. D. & Rodin, A. E. (2017). On the existence of planets around the pulsar PSR B0329+54. *Astronomy Reports*, 61 (11), 948-953, <https://doi.org/10.1134/S1063772917110063>.

Steiger, J. H., & Fouladi, R. T. (1992). R2: A computer program in interval estimation, power calculation, and hypothesis testing for the squared multiple correlation. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 4, 581-582.

Stevenson, D. S. & Large, S. (2017). Evolutionary exobiology: Towards the qualitative assessment of biological potential on exoplanets. *International Journal of Astrobiology*, <https://doi.org/10.1017/S1473550417000349>

Takizawa, K. et al (2017). Red-edge position of habitable exoplanets around M-dwarfs. *Scientific Reports*, 7, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07948-5>

Tamayo, D. et al. (2017). Convergent migrations renders TRAPPIST-1 long-lived. *The Astrophysical Journal Letters*, 840 (2), <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa70ea>

Turbet, M. et al. (2017a). Climate diversity on cool planets around cool stars with a versatile 3-D global climate model: The case of TRAPPIST-1 planets. Working Paper, [arXiv:1707.06927](https://arxiv.org/abs/1707.06927) [astro-ph.EP].

Turbet, M. et al. (2017b). CO₂ condensation is a serious limit to the deglaciation of Earth-like planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 476, 11-21, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.050>

VanLoon, G. W. & Duffy, S. J. (2011). *Environmental Chemistry*.

A global perspective. Third Edition. New York: Oxford University Press.

Varadi, F. (2007). Periodic orbits in the 3:2 orbital resonance and their stability. *The Astronomical Journal*, 118 (5), <https://doi.org/10.1086/301088>

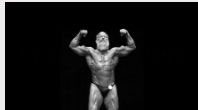
Wall, M. (2017, febrero 22). Major Discovery! 7 Earth-Size Alien Planets Circle Nearby Star. Descargado desde: <https://www.space.com/35790-seven-earth-size-planets-trappist-1-discovery.html>

Weiss, L. M. & Marcy, G. W. (2014). The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 Earth radii. *The Astrophysical Journal Letters*, 783 (1), <https://doi.org/10.1088/2041-8205/783/1/L6>

Yadav, T. (2017). Search for exoplanets: Atmospheres, habitability and detections. Working Paper. Central Michigan University.

Cómo citar este artículo: Martínez, J. A. (2018, febrero 21). El sistema planetario de TRAPPIST-1. Descargado desde www.cienciasinmiedo.es/b313

Todos los posts relacionados



[\(#352\). TESTOSTERONA Y CONSUMO CONSPICUO EN HOMBRES](#)



[\(#318\). CAMPOS MAGNÉTICOS Y ABORTO; SIGUE SIN ESTAR CLARO](#)



[\(#316\). IGNORAR LA TOXICIDAD DE LOS ADYUVANTES FALSEA LOS PERFILES DE SEGURIDAD DE LOS PESTICIDAS](#)



[\(#315\). GOBERNANDO CONTRA LA SALUD](#)



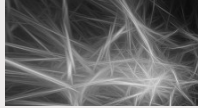
[\(#313\). EL SISTEMA PLANETARIO DE TRAPPIST-1](#)



[\(#310\). MÁS ALLÁ DEL REDUCCIONISMO EN BIOLOGÍA](#)



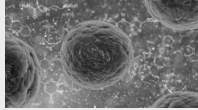
[\(#304\). CONOCIMIENTO ECOLÓGICO TRADICIONAL COMO PERSPECTIVA AMBIENTAL](#)



[\(#296\). ESTRÉS OXIDATIVO ANTE EXPOSICIONES CORTAS A RADIOFRECUENCIA](#)



[\(#294\). NEUROLOGÍA DE LA MALDAD; PISTAS SOBRE LAS RAÍCES DE LA MALDAD INDIVIDUAL](#)



[\(#285\). CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS ALTERAN EL CANAL IÓNICO DEL CALCIO](#)



[\(#284\). TROMBOEMBOLISMO VENOSO ASOCIADO A LA ESTATURA](#)



[\(#275\). DARWIN Y LA MICROBIOLOGÍA](#)



[\(#241\). LA IMPORTANCIA DE LA MICROBIOTA INTESTINAL](#)



[\(#18\). PESTICIDAS EN LA ESCUELA](#)