

PLANETAS DE OTROS SOLES

JUAN MARÍA MARCAIDE OSORO *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

PLANETAS

Nuestro Sol tiene a su alrededor 8 planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. En 1930, cuando estaba a punto de inaugurarse el famoso planetario de Chicago, se descubrió Plutón y hasta el año 2006, en el que los astrónomos redefinieron el concepto de planeta, se le consideró el noveno planeta del Sol, un planeta muy singular en una órbita muy excéntrica. Desde finales del siglo XX, la evidencia creciente de que había otros cuerpos celestes de comparable masa —incluso ligeramente mayor— y características a las de Plutón hizo que se reconsiderara el concepto de planeta y que finalmente se excluyera a Plutón como tal.

EXOPLANETAS

¿Cuántos planetas habría alrededor de otros soles? Ya en 1584 Giordano Bruno respondió a esa pregunta de un modo afirmativo, pero sin más evidencia que su convicción: “Hay incontables soles e incontables Tierras orbitando alrededor de sus soles de la misma manera que los planetas de nuestro sistema...” Bruno acabó en la hoguera. Tampoco había acabado muy bien Galileo poco antes por proponer ideas menos radicales, y eso que tenía evidencia observacional de que Júpiter era un planeta que a su vez tenía alrededor lunas que se regían por las mismas leyes que los planetas con respecto al Sol. Esas leyes se resumen en la tercera ley de Kepler: “El cubo del semieje mayor de la

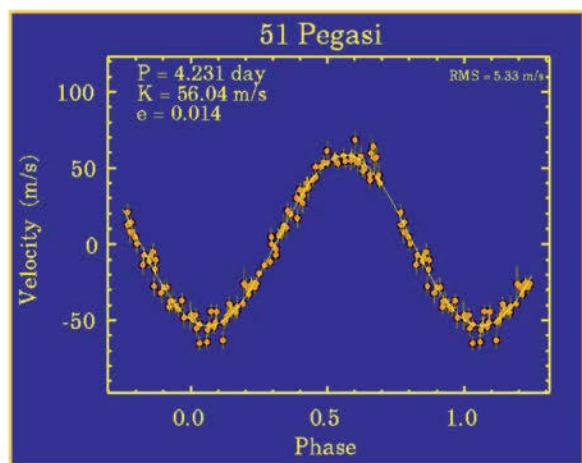
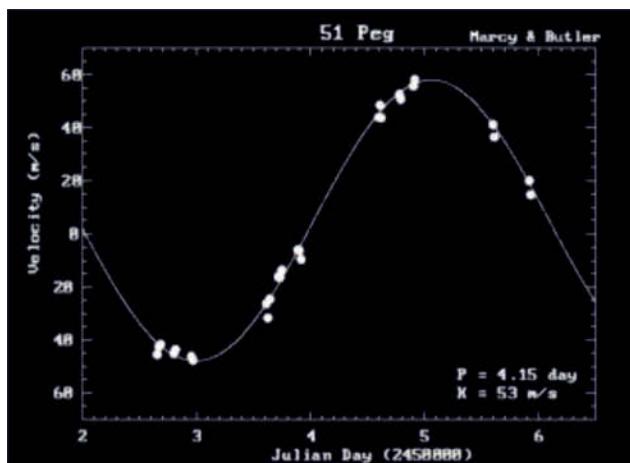


Figura 1. Curva de velocidad radial de la estrella 51 Pegasí. A la izquierda, cuando este primer exoplaneta fue descubierto por Mayor y Queloz y confirmado por Marcy y Butler en 1995. A la derecha, un resultado más reciente.

órbita del planeta es proporcional al cuadrado del periodo". Aquella pregunta se la hicieron muchos a lo largo de los siglos, pero sin detecciones seguras no pudo contestarse durante mucho tiempo.

La mayoría de los astrónomos de la segunda mitad del siglo XX hubieran contestado afirmativamente a la pregunta "¿Hay otros planetas en el Universo?" pues sabían que el Sol no es más que una estrella entre cien mil millones de estrellas parecidas en la Galaxia y sabían también que las estrellas se forman a partir de nubes de gas y polvo y que en ese proceso de formación no hay razón física alguna para que no se formen planetas. Sin embargo, la detección indirecta del primer exoplaneta alrededor de un sol (un planeta alrededor de la estrella 51 Pegasi) fue recibida con cierta incredulidad. El descubrimiento sensacional de los suizos Mayor y Queloz en 1995, basado en pocos puntos de velocidades radiales que mostraban el movimiento reflejo de la estrella 51 Pegasi con velocidades máximas de 53 m/s, pronto se vio confirmado por los astrónomos americanos Marcy and Butler (ver Figura 1). (Para comparar diremos que el movimiento reflejo del Sol debido a Júpiter es de 12 m/s.)

Mayor y Queloz encontraron que la estrella 51 Pegasi orbita alrededor de algún centro de masa con un movimiento muy leve que indica que el otro cuerpo no es una estrella sino algo mucho más pequeño. Este objeto más pequeño es un planeta, al que se llamó 51 Peg b (inaugurando así una nueva nomenclatura para exoplanetas, la de añadir una letra minúscula tras el nombre de la estrella) que tiene una órbita de 0.05 unidades astronómicas, un periodo de 4.2 días, y por tanto una masa algo mayor que la mitad de Júpiter. Se trata de un sistema binario con una estrella como la nuestra (de tipo espectral G) y un planeta gaseoso como Júpiter orbitando a una distancia menor que la que órbita Mercurio alrededor del Sol. Fue algo totalmente inesperado. Pero no había otro modo de interpretar los datos.

A decir verdad, seguramente los primeros exoplanetas se descubrieron en 1992 alrededor de un púlsar. Pero un púlsar, o sea una estrella de neutrones muy magnetizada en rotación muy rápida, no es un sol ni de lejos. El radioastrónomo Wolszczan encontró que los datos de los pulsos del púlsar PSR1257+12 sólo podían ajustarse si se introducía un movimiento orbital

del púlsar debido a otros cuerpos mucho menos masivos en rotación alrededor de él. Para obtener el ajuste final hacían falta 3 cuerpos de masas planetarias. Resultaba en conjunto un sistema muy exótico y la detección era indirecta y dependiente de un análisis complejo de los datos. En contraste, la detección de Mayor y Queloz era difícil por la precisión requerida pero conceptualmente simple. Y fue confirmada rápidamente por otros colegas que también aportaron al poco tiempo otras detecciones parecidas en otras estrellas. Pronto pareció que podría haber muchos sistemas planetarios como el nuestro. La carrera por descubrir más exoplanetas empezo. Al principio los nuevos exoplanetas fueron pocos, pero en el momento de dar esta conferencia, 15 años después del descubrimiento del primero, el número de exoplanetas descubiertos era 430. En el momento de escribir este texto, un año después, el número ha aumentado a unos 700. Nuevos instrumentos y nuevas técnicas astronómicas son la razón de este crecimiento extraordinario. Sin embargo, la detección directa es todavía muy difícil y se cuentan con los dedos de una mano los casos detectados directamente. Veamos varios métodos de detección de exoplanetas.

MÉTODO DIRECTO: IMAGEN DE UN EXOPLANETA

El método más directo para detectar un planeta es obtener una imagen del planeta alrededor de una estrella. Pero el método directo es difícil por la razón siguiente: las luminosidades relativas de las estrellas y los planetas son muy distintas porque sus temperaturas y tamaños son muy distintos. La emisión de una estrella como el Sol, de tipo espectral G, es la correspondiente a un cuerpo negro de unos 6000K. La emisión de los planetas tiene dos componentes, una debida a la reflexión de la luz del Sol (o sea con la forma del cuerpo negro centrado el pico en la misma longitud de onda que la estrella) y otra debida a la emisión del planeta con su temperatura característica de cuerpo negro a temperatura más baja (unos cientos de grados) cuyo pico aparece centrado por tanto en longitudes de onda infrarrojas. En el visible, por cada fotón que se recibe del planeta se reciben miles de millones de fotones de la estrella con lo que el contraste es excesivo. La situación no es tan mala en el rango infrarrojo del espectro, aunque todavía el con-

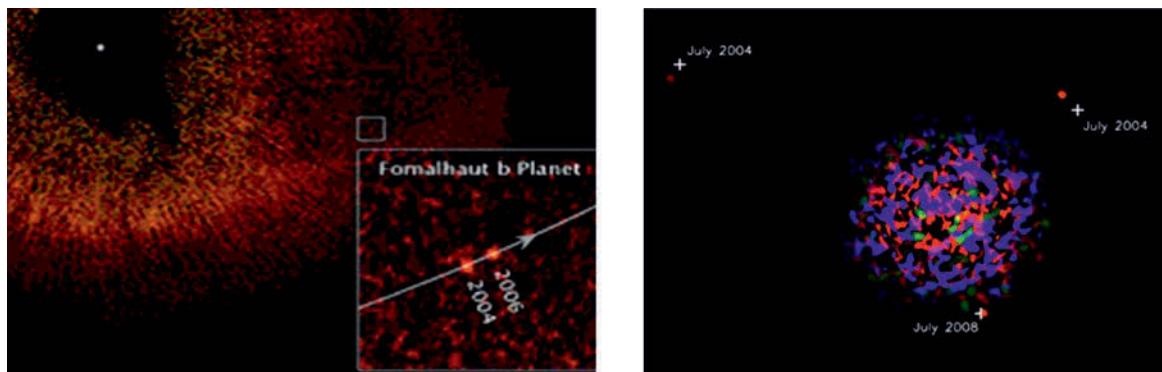


Figura 2. Imágenes directas en el infrarrojo de los planetas Fomalhaut b (izquierda) y HR8799 b, c y d (derecha).

traste es enorme y obliga a utilizar técnicas complejas de bloqueo del brillo de la estrella.

Por esta razón, las pocas detecciones directas han tenido lugar en el infrarrojo y con complejas técnicas de filtrado de la luz estelar. Las figuras 2 y 3 muestran estas detecciones en la que se ven planetas orbitando alrededor de estrellas. Mucha de la emisión en las imágenes son artefactos de la técnica utilizada.

Una de las características de la utilización de este método es que no detecta los planetas muy cercanos a la estrella por razón de resolución y contraste de la

imagen. Ello se puede ver bien en la Figura 3 en la que se compara el sistema Fomalhaut-Fomalhaut b con el sistema solar. La detección directa tiene un sesgo a favor de planetas pesados en órbitas grandes.

MÉTODOS INDIRECTOS

Hay varios métodos indirectos. De todos ellos el más sencillo y el que más éxito ha cosechado es el de velocidades radiales que utilizaron ya Mayor y Queloz y que es muy común en el estudio de estrellas binarias donde no es necesaria tanta precisión. Con este método se habían descubierto 370 de los 430 exoplanetas en el momento de esta conferencia. Otros son: método de tránsito, astrometría, microlentes gravitatorias. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes.

A. Velocidades radiales

Debido al efecto Doppler, del mismo modo que el sonido emitido por una ambulancia a gran velocidad se oye con distinto tono si la ambulancia se acerca o se aleja de uno, las ondas electromagnéticas emitidas por una estrella se detectan con distinto tono (frecuencia o longitud de onda) según la estrella esté estacionaria o se mueva con respecto al observador. El desplazamiento Doppler de una estrella debido al movimiento de esta alrededor del centro de la galaxia se conoce de antemano y se puede considerar constante (para un periodo de tiempo limitado); su efecto es desplazar de un modo constante las líneas espectrales de la estrella. Sin embargo, si algún cuerpo pesado (o algunos

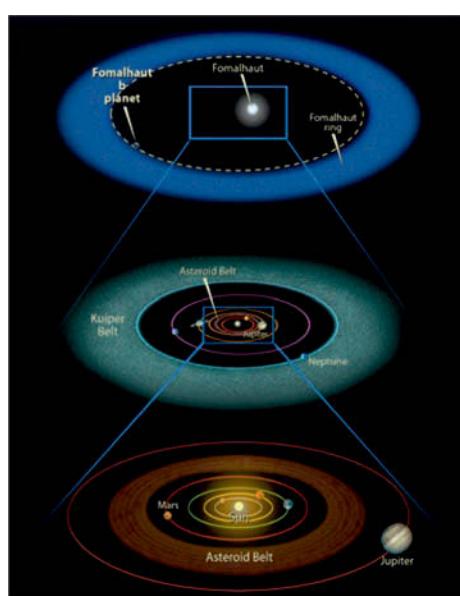


Figura 3. Comparación de la órbita de Fomalhaut b con el sistema solar.

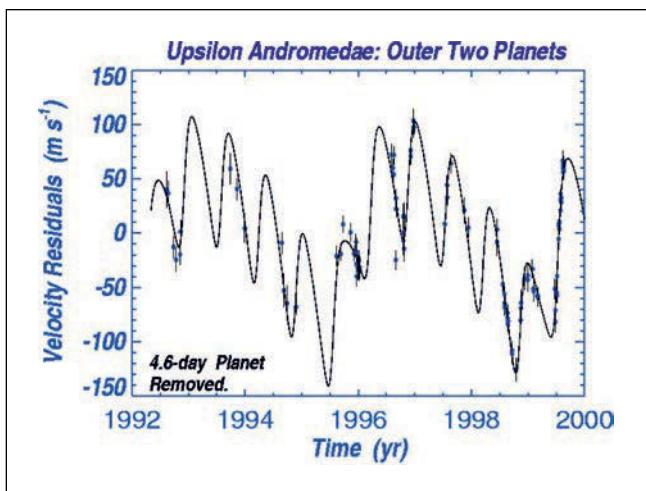


Figura 4. Velocidades radiales de un sistema planetario múltiple. Se muestran los datos correspondientes a los dos planetas más externos, es decir, corregidos de la aportación del planeta más interior.

cuerpos pesados) orbitan alrededor de la estrella, ésta se moverá con respecto al baricentro del sistema con un movimiento periódico que se podrá medir por la variación regular de la longitud de onda de las líneas espectrales de la estrella. El movimiento será en algún caso (como en 51 Pegasi de la Figura 1) casi sinusoidal y en otros casos será periódico pero más complicado en función de la inclinación y excentricidad de la órbita del planeta o planetas y del número de estos. La Figura 4 muestra las curvas de velocidades radiales de los dos planetas más externos alrededor de Upsilon

Andromedae. De las curvas originales se ha quitado la contribución (de mayor frecuencia) debida al planeta más interior.

Todavía hay sistemas más complejos como el de 55 Cancri con 5 planetas. Se muestra en la Figura 5 las órbitas que se determinan para cada planeta.

Cuanto más cerca esté un planeta de su estrella su velocidad orbital será mayor y su periodo menor y cuanto más pesado sea el planeta más velocidad refleja provocará en la estrella. Por tanto, como cuanto más grande es una velocidad refleja tanto más fácil es detectarla, la detecciones basadas en este método tienen el sesgo claro a favor de planetas pesados en órbitas pequeñas, justo el contrario que el método directo que hemos mencionado antes o el método basado en astrometría que mencionaremos más tarde.

B. Tránsitos

Del mismo modo que todo el mundo observó a simple vista el tránsito de Venus frente al disco solar en junio de 2004, se puede observar un exoplaneta que transita frente a su estrella cuando la inclinación de la órbita del exoplaneta vista desde la Tierra (o satélite en órbita de ella) es cercana a 90 grados. Cuanto menor sea la órbita del exoplaneta mayor es la probabilidad de que tenga un tránsito. Por tanto, también este método favorece a órbitas pequeñas. Durante el tránsito lo que se observa es una disminución de la luminosidad de la estrella. Esta disminución depende del tipo espectral de la estrella, es decir de su temperatura de superficie, y del tamaño del exoplaneta que bloquea la radiación y puede ser del orden del 1-2%. Esta disminución es fácil de detectar si el exoplaneta es grande y la emisión de la estrella es estable, lo que no siempre será el caso. Por ejemplo, el tránsito de Júpiter sobre el disco solar visto por un observador distante con una gran sensibilidad en el detector daría una imagen como la de la Figura 6 en la que la disminución de la luminosidad sería del 1.5%

La primera detección de un tránsito para una estrella que ya mostraba evidencia de tener en órbita un exoplaneta tuvo lugar en 1999. La estrella en cuestión es HD209458 y su curva de velocidad radial

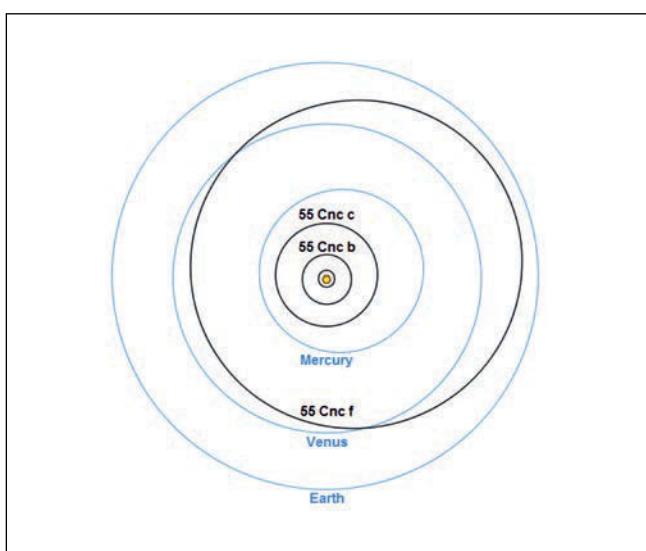


Figura 5. Posiciones relativas de los planetas de 55 Cnc comparadas a los planetas rocosos del sistema solar.

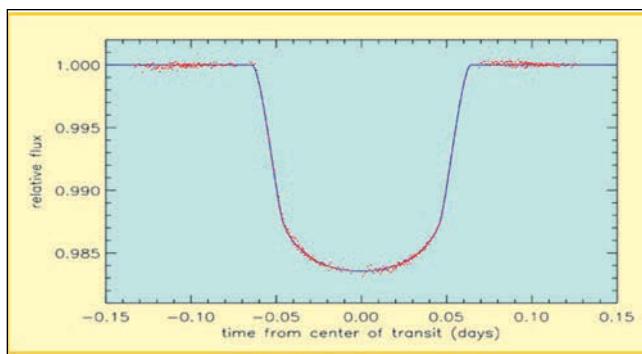


Figura 6. Disminución de flujo relativo de la emisión del Sol debido a un tránsito de Júpiter para un hipotético observador fuera del sistema solar.

se muestra en la Figura 7. El corto periodo de 3.5 días y la pequeña excentricidad de su órbita lo hacía idóneo para buscar un tránsito. Con las mediciones del tránsito pudieron determinarse los parámetros del exoplaneta mucho mejor. Así se determinó que HD209458 b orbita con una inclinación de 86.6 grados, tiene una masa de unas 0.7 veces la masa de Júpiter y un radio de

1.35 veces el radio de Júpiter, lo que resulta en una densidad de 0.35 g/cc, sin parangón en el sistema solar.

El exoplaneta más pequeño que se ha detectado con tránsitos es Corot-7 b. Se trata de una super-tierra de un radio sólo 1.9 veces el radio de la Tierra y una masa sólo 5 veces la masa de la Tierra que orbita una estrella activa de 8 masas solares con el cortísimo periodo de 0.85 días. El tránsito detectado con el satélite COROT se muestra en la Figura 8.

También se pensó que si un exoplaneta tuviera atmósfera se podría medir el efecto de ésta sobre la radiación que se recibe de la estrella, pues al pasar la luz de la estrella por la atmósfera del exoplaneta la absorción podría ser distinta a distintas longitudes de onda. Los astrónomos ya han demostrado que es así y han encontrado varios casos en los que han podido ver que la absorción es distinta a distintas longitudes de onda. La Figura 9 muestra un ejemplo.

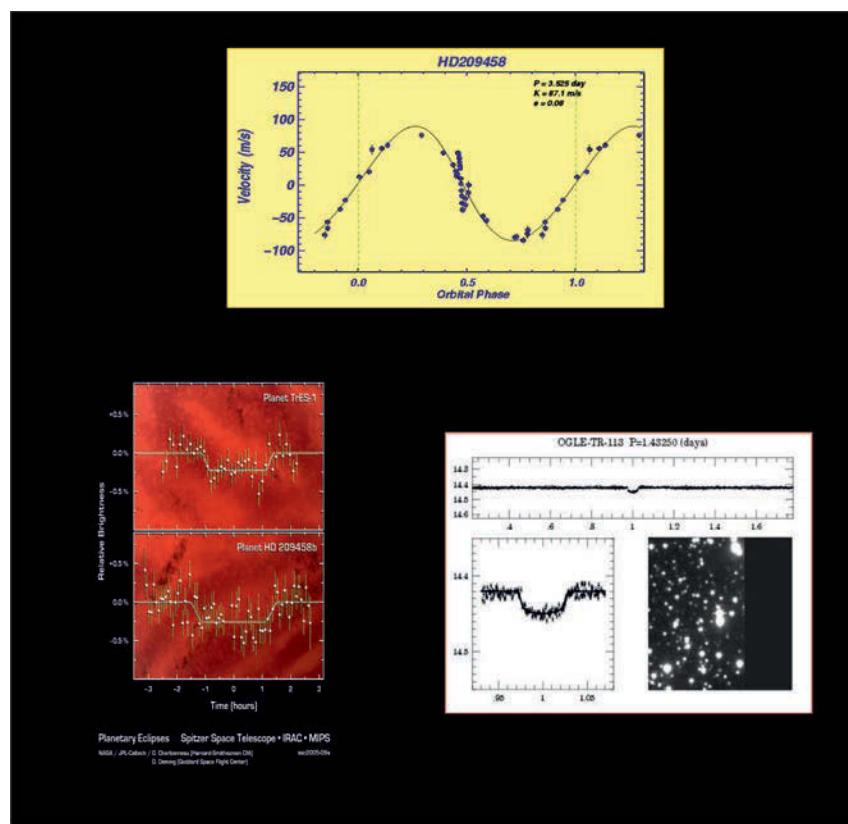


Figura 7. Curva de velocidad radial de la estrella HD209458 (arriba) y cambio de brillo relativo en tránsito (abajo, izquierda). Asimismo, se muestran los tránsitos de otros dos exoplanetas.

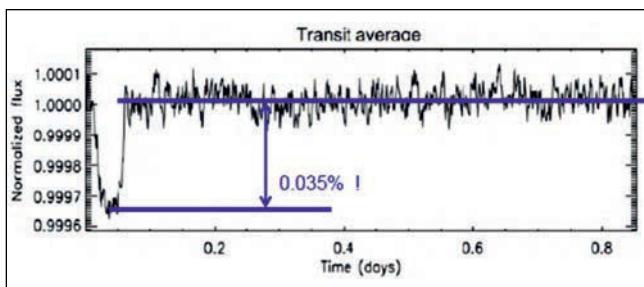


Figura 8. Caída de la medición del flujo de Corot-7 durante un tránsito de Corot-7 b.

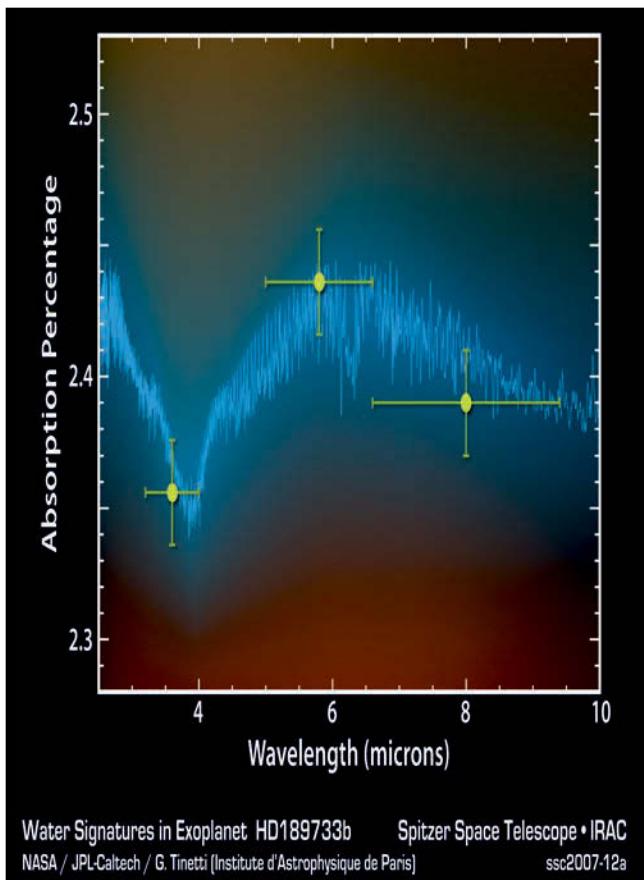


Figura 9. Evidencia de vapor de agua en el exoplaneta HD189733b. Las cruces indican los datos de absorción, que son de distinto nivel en tres bandas distintas. El espectro azulado es el espectro del modelo de atmósfera del exoplaneta. El exoplaneta tiene una masa 15% mayor que Júpiter, un radio 16% mayor que Júpiter, un periodo de 2.2 días y un semieje orbital de 0.03 unidades astronómicas. La temperatura de superficie se estima en unos 1000 grados.

C. Astrometría

Medir la posición de un astro en la esfera celeste, y los cambios en esa posición, es una actividad clásica

en la astronomía. Por tanto, la astrometría debería ser un método importante en el estudio de los exoplanetas si las precisiones necesarias fueran alcanzables. Se han diseñado telescopios espaciales con instrumentación interferométrica en el infrarrojo para este propósito, pero los proyectos no se han llegado a completar. Se han diseñado instrumentos de astrometría diferencial como PRIMA, para que sean utilizados en interferómetros como el Very Large Array Interferometer (VLTI) en Cerro Paranal, Chile, pero todavía no han podido demostrar su potencial debido a dificultades técnicas. Es técnicamente difícil por las altas precisiones exigidas. Tampoco la radio interferometría de muy larga base (VLBI), que tanto éxito ha tenido en astrometría de precisión de otros objetos celestes como cuasares, radiogalaxias, radioestrellas, etc. ha producido resultado alguno en exoplanetas y el límite del objeto menos masivo detectado hasta la fecha es AB Dor C, con una masa que justamente le permite ser estrella y no enana marrón, es decir lejos todavía de las masas de los exoplanetas. Parece que va a pasar un tiempo hasta que la astrometría haga contribuciones sustanciales al estudio de exoplanetas. Ahora bien, si las hiciera algún día sería detectando objetos en el extremo opuesto a los detectados con los sesgos de los métodos de velocidades radiales y tránsitos, es decir con objetos en órbitas más grandes. Esperemos que su aportación, aunque tardía, algún día sea interesante.

D. Lentes gravitatorias

Por lente gravitatoria se entiende un sistema gravitatorio que, interviniendo entre un objeto (mucho más distante que él) y el observador, desvía los rayos de luz del objeto de modo que el observador ve varias imágenes del objeto lejano. (Además, las imágenes observadas están amplificadas). Para ello ha de darse una gran alineación entre los tres elementos: objeto, lente y observador. Cuando la alineación es perfecta y la lente compacta el objeto se observa como un anillo de Einstein. Para ligeras desviaciones de la alineación el anillo se rompe en un número impar de imágenes (aunque el número es impar, siempre una imagen es muy débil y alineada con la lente y por tanto casi imposible de detectar). La primera lente gravitatoria se descubrió en 1979. Entonces el objeto fue un cuásar y la lente una galaxia grande en medio de un cúmulo de galaxias (el número actual de lentes gravitatorias

extragalácticas supera el centenar). Pero, como Einstein lo caracterizara en 1930 aunque pensara que jamás podría ser detectado, lo mismo se puede dar una lente gravitatoria si el objeto es una estrella y la lente otra estrella. Si la estrella lente está acompañada por un planeta entonces la respuesta es más compleja y variable.

Para una lente extragaláctica las distancias son enormes y las posiciones de objeto y lente fijas en la práctica. Para una lente galáctica de estrellas las posiciones cambian y por tanto el efecto sólo se puede observar una vez, lo que es una gran desventaja porque las observaciones no son reproducibles. Sin embargo, la marca que puede dejar el efecto es inconfundible y puede permitir caracterizar el planeta adecuadamente. En la Figura 10 se muestra esquemáticamente lo que pasa con el brillo de la estrella objeto cuando se dan las geometrías que se muestran en las cinco situaciones. Por tanto, la fotometría de la estrella objeto es la que delata el fenómeno y permite caracterizar al planeta. En la parte superior de la figura se ve la respuesta fotométrica. Se dan esencialmente 2 contribuciones: una respuesta que hace que el brillo primero aumente y luego disminuya progresivamente mientras la estrella del sistema lente se cruza en la línea de visión al objeto y otra respuesta, que se suma a la anterior, de dos picos

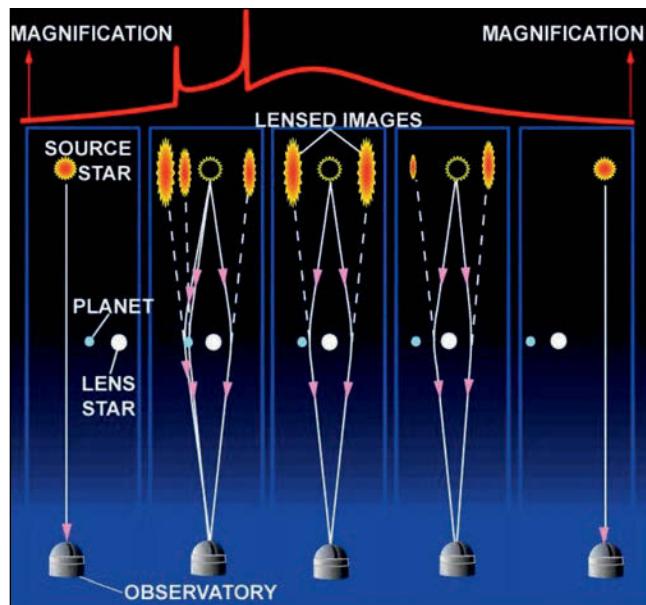


Figura 10. Brillo esperado (magnificación, arriba) para una estrella que se observe a través de una lente gravitatoria que consta de una estrella y un planeta (se muestran cinco configuraciones de alineación posibles).

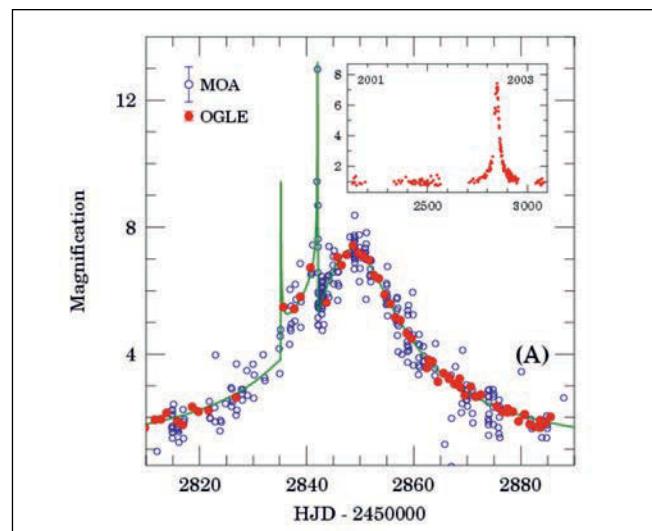


Figura 11. Brillo medido para una estrella (OGLE 2003-BLG-235) que se observa a través de una lente gravitatoria que consta de una estrella y un planeta. Los círculos en rojo o azul son los datos. La línea verde indica el mejor ajuste a los datos. Los dos picos estrechos de la línea verde (que tuvieron lugar en Julio de 2003) corresponden a la magnificación debida al paso del planeta por la línea de visión al objeto. La masa del planeta se estima en 1.5 veces la masa de Júpiter. La distancia al planeta se estima en 20 mil años-luz. No deja de ser sorprendente la detección de un planeta tan lejano por este método.

estrechos que corresponden al momento efímero en que la alineación es perfecta con el planeta. Parecería que con tantas restricciones no podría haber muchos casos observables. Lo que es notable es que se han observado ya unos diez casos, de los cuales uno de los más limpios es el que se muestra en la Figura 11, que de hecho corresponde al esquema de la Figura 10.

ZONAS HABITABLES

Se ha encontrado gran variedad entre los exoplanetas descubiertos. La mayoría son del tipo júpiter-caliente (masas comparables a Júpiter y temperaturas de superficie muy altas del orden de 1000 K) pues corresponde al sesgo introducido por los métodos de velocidades radiales y de tránsito. También el método de imagen directa sesga hacia objetos pesados, aunque no tan calientes, en órbita alrededor de estrellas enanas. Se han encontrado diez veces más sistemas planetarios de un sólo exoplaneta que sistemas planetarios complejos. Sin embargo, debe haber planetas tipo tierra a distancias de varias unidades astronómicas, que pasan desapercibidos a las técnicas pre-

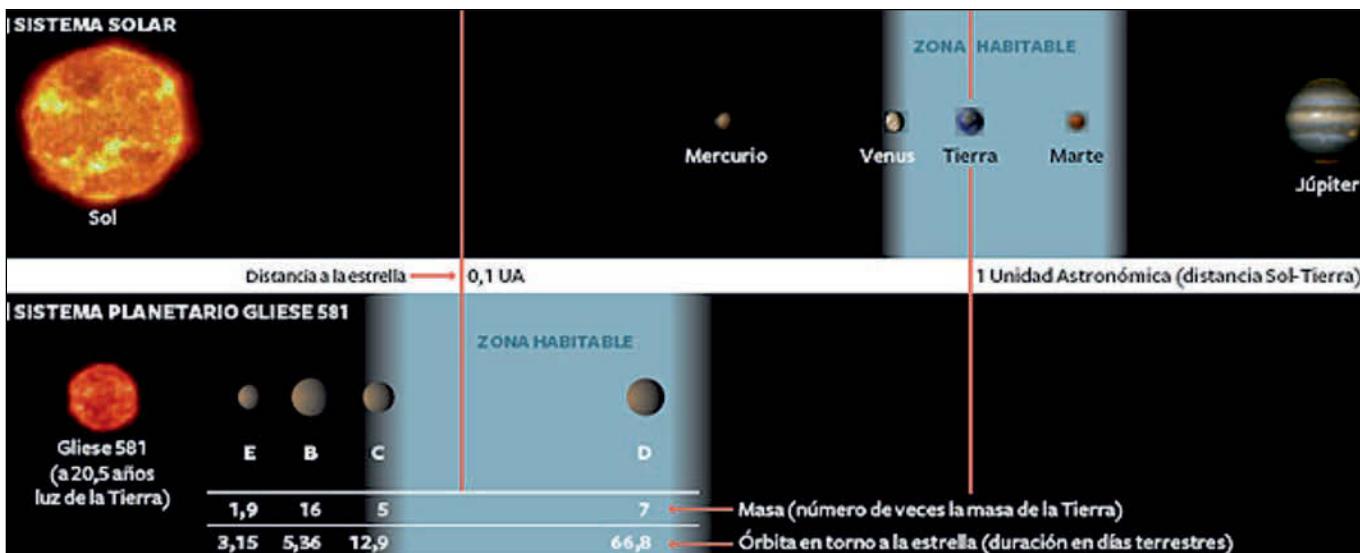


Figura 12. Zonas habitables del Sol y de Gliese 581.

sententes. Aún así se conoce un planeta de 1.9 veces la masa de la Tierra en un sistema múltiple alrededor de la enana roja (tipo espectral M4V, mitad de masa que el Sol) Gliese 581 rodeado de otras super-tierras de 5, 8 y 16 masas terrestres en órbitas más externas (ver Figura 12). También la estrella HD40307 (tipo espectral K2.5V, 0.8 masas solares) tiene un sistema planetario con super-tierras de 4, 7 y 9 masas terrestres.

Una cuestión relevante es cómo se puede definir una zona habitable (zona para planetas en los que la vida podría emerger) para cada estrella y cómo se puede determinar que un planeta está en zona habitable. Es el primer paso para algún día estimar uno de los 7 términos de la famosa ecuación de Drake para estimar el número de civilizaciones avanzadas en el universo con las que se podría contactar. Se han presentado distintos modelos de zonas habitables basados en el contenido de CO₂ y de agua, modelos inspirados en la vida como la conocemos en la Tierra. La figura 12 muestra las zonas habitables correspondientes al Sol y a Gliese 581 con algún modelo. Este es un tema muy actual que evolucionará mucho en los próximos años.

CONCLUSIONES

Desde 1992 cuando se descubrió el primer sistema planetario exótico alrededor de un púlsar (confirmado

en 1994) y sobre todo desde 1995 cuando se descubrió un planeta alrededor de una estrella como el Sol, el avance en el estudio de exoplanetas ha sido impresionante. El catálogo actualizado de exoplanetas se puede encontrar en <http://exoplanet.eu/catalog-all.php>. En él, los exoplanetas aparecen en unidades jovianas (veces la masa de Júpiter), por ser las masas de muchos exoplanetas muy comparables a la masa del planeta joviano. Hay que decir que cuando un objeto supera la masa de 13 masas de Júpiter no se considera ya un exoplaneta sino una (estrella) enana marrón, y que cuando la masa del objeto supera las 70 masas jovianas se le considera una estrella normal con reacciones nucleares de hidrógeno en su núcleo.

El exoplaneta menos pesado tiene 0.006 unidades jovianas o 1.9 unidades terrestres. Se trata de un exoplaneta en un sistema planetario formado por 4 super-tierras, alguna de las cuales podría estar en zona de habitabilidad. El esfuerzo en el estudio de exoplanetas se hace en todas las direcciones y con todas las técnicas, si bien algunas todavía no han alcanzado madurez, como la astrometría. El estudio de exoplanetas en zonas de habitabilidad ha tomado gran vigor en los últimos años. Cuando se completen los 3 años de funcionamiento del telescopio espacial americano Kepler, en órbita desde 2010, dedicado a estudiar todo el tiempo un pequeño pedacito del cielo en la zona del Cisne con la técnica de tránsitos la cosecha será enorme y los estimados precisos. Indudablemente, esos resultados incrementarán la excitación que los

resultados del telescopio espacial europeo COROT han aportado descubriendo supertierras como COROT7-b en órbita “rasante” alrededor de una estrella de radio doble al del Sol.

Aquella convicción de G. Bruno ha resultado ser cierta: existen otros soles. Su otra convicción en la que

llegó todavía más lejos en su herejía “la Tierra es uno de los infinitos mundos habitables del universo” tardará mucho en probarse, de ser cierta. Esperemos que la humanidad no se destruya a sí misma destruyendo su hermoso planeta antes de que, al menos, se pueda investigar en serio esa conjectura que en 1600 llevó a G. Bruno a la hoguera.