

ARTÍCULO

SISTEMAS PLANETARIOS EXTRA-SOLARES

Frédéric Masset

Investigador titular B

Instituto de Ciencias Físicas - UNAM

Sistemas planetarios extra-solares

Resumen

Desde el 1995, se han descubierto más de 500 planetas extrasolares esencialmente alrededor de estrellas de tipo solar. La caza de planetas y la intensa investigación que se genera para explicar las propiedades de los sistemas planetarios recién descubiertos constituyen una de las ramas más dinámicas y jóvenes de la Astrofísica moderna. En este artículo presentamos los principales métodos de detección de planetas extrasolares, y damos una lista no exhaustiva de algunas sorprendentes propiedades de dichos planetas, entre las cuales se encuentra la detección de numerosos planetas muy cerca de su estrella, con periodos orbitales del orden de pocos días, la detección de muchos planetas con altas excentricidades, la existencia de planetas retrogradadas, etcétera.

Concluimos con las perspectivas que ofrecen misiones espaciales como Kepler, que van a cambiar radicalmente nuestro conocimiento de los sistemas planetarios extra-solares.

Palabras clave: Planetas extra-solares, métodos de detección, discos protoplanetarios

Introducción

Todo aquel que era un niño o adolescente aficionado a la astronomía, antes del 1995, recuerda los libros de divulgación astronómica de entonces, en los cuales solamente se conocían nueve planetas, los inmutables planetas de nuestro sistema solar: desde el caliente Mercurio hasta el remoto y misterioso Plutón. En ese entonces: se sabía que el Universo estaba en expansión y que se había originado en el llamado Big Bang; se conocían las etapas de la vida de una estrella y su fuente de energía; se entendían muchas cosas sobre el medio interestelar; telescopios en varios dominios de energía y radiotelescopios nos proporcionaban un sin fin de información sobre áreas remotas del Universo, pero... no se conocían otros planetas más que los del sistema solar. Era razonable pensar que otras estrellas albergaban planetas como nuestro sol, pero, aunque fuera razonable, era mera especulación, y parecía improbable que algún día eso fuese a cambiar. Sin embargo, el 6 de octubre del 1995, dos astrónomos suizos: Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, emitieron la desde entonces famosísima circular IAU (circular de la Unión Astronómica Internacional) número 6251, en la cual anunciaban haber descubierto un objeto de masa joviana en torno a la estrella 51 Peg (estrella número 51 de la constelación de Pegaso). Dos meses después, Geoff Marcy de la Universidad de California anunció haber descubierto otros dos planetas. Fue el principio de una competencia internacional entre contados grupos de cazadores de planetas, que hasta la fecha ha permitido detectar más de 500 planetas alrededor de otras estrellas, llamados planetas extra-solares o exoplanetas

Métodos de detección

Los métodos de detección de planetas extra-solares son muy variados. Vamos a empezar la lista por orden cronológico: 51 Peg fue descubierto mediante la medición del traslado Doppler de la estrella, y durante muchos años este método fue el que dio lugar a la mayor tasa de descubrimientos.

Método de velocidades radiales

Cuando un planeta órbita alrededor de una estrella, esta última no está fija: ambos cuerpos dan vuelta alrededor de su centro de masa común. Ya que una estrella es típicamente mil veces más masiva que un planeta gigante, el centro de masa está ubicado muy cerca del centro de la estrella (y en muchos casos, adentro del radio físico de la estrella), y por ende, el movimiento de la estrella es mucho más lento que el del planeta. Sin embargo, ya que este último es virtualmente indetectable de manera directa, es el mero movimiento de la estrella lo que nos proponemos detectar, como indicio indirecto de la presencia de un planeta. La velocidad de la estrella, dependiendo de la masa del planeta y de su periodo orbital, puede variar entre varios cientos de metros por segundo, hasta menos de un metro por segundo, es decir, esta velocidad es sumamente difícil de detectar. Se hace mediante el efecto Doppler, que se traduce por un corrimiento al azul o al rojo de las líneas espectrales de la estrella cuando se acerca o aleja del observador, de tal forma que solamente se detecta la componente radial de la velocidad de la estrella. El corrimiento de estas líneas puede representar solamente una milésima parte de su propio ancho, lo cual subraya que la detección de exoplanetas por efecto Doppler es, de por sí, un reto tecnológico. Hasta la fecha (19 de abril del 2011) este método se ha aplicado a 499 planetas, de 419 sistemas planetarios diferentes. Nótese que no necesariamente esto implica que los 499 planetas han sido descubiertos por este método. Un planeta puede descubrirse por otro método (en particular el de los tránsitos) y luego estar confirmado o estudiado con el método de las velocidades radiales. Cabe mencionar que, si bien, este método determinar el periodo, la eccentricidad y el semi-eje mayor de la órbita del planeta, existe una degeneración en cuanto a la inclinación de la órbita: los mismos datos pueden deberse a un planeta ligero cuya órbita se ve casi de canto, o bien a un planeta mucho más masivo cuya órbita está casi paralela al plano del cielo. Ambas configuraciones dan lugar a la misma velocidad radial de la estrella. En términos técnicos, se dice que se determina $M_p \sin i$, donde M_p es la masa del planeta e i es la inclinación de la órbita ($i=90^\circ$ cuando la órbita se ve de canto). Al no poder determinar i , solamente podemos inferir la masa mínima del planeta.

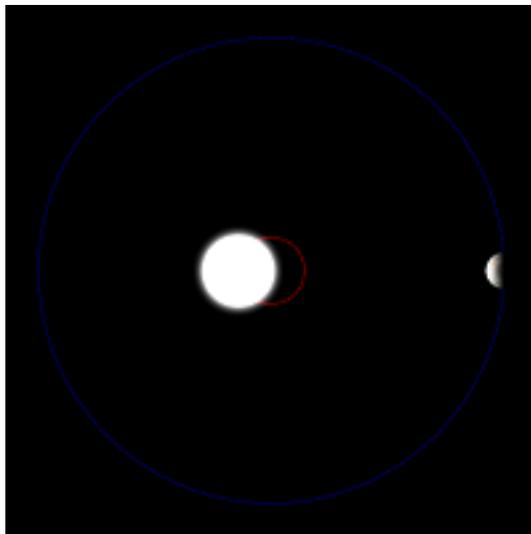


Figura 1. Esta animación muestra el movimiento reflexivo de la estrella alrededor del centro de masa del sistema estrella-planeta. Este centro de masa, fijo, está en el centro del círculo rojo. Fuente : wikipedia

Finalmente, es importante tener en mente el hecho de que existe un fuerte sesgo observacional con la detección de los planetas por velocidades radiales. Cuanto más masivo es un planeta y tiene más cerca órbita alrededor de su estrella, mayor es la amplitud de la velocidad radial, con lo cual este método favorece la detección de planetas masivos orbitando cerca de su estrella.

Tránsitos

En general el plano de la órbita de un planeta detectado por el método de las velocidades radiales no contiene al observador: si pudiéramos resolver (para usar la terminología de los astrofísicos) el sistema, el exoplaneta, en general, nunca pasaría delante del disco de su propia estrella. Sin embargo, existe una probabilidad, baja pero no nula, de que esto pueda ocurrir. En este caso, el planeta pasa periódicamente delante del disco de su estrella (de manera muy similar a lo que ocurre, en nuestro sistema solar, durante un tránsito de Mercurio o Venus). Este tránsito no se resuelve, es decir, que no hay manera de observar el disco de la estrella, que siempre aparece puntual en los telescopios, ni mucho menos el disco más pequeño, en sombra china, del planeta, pero se traduce por una atenuación, medible, del flujo de la estrella cuando el planeta pasa delante (ver figura 2). El primer caso de detección de un tránsito es el del planeta de la estrella HD209458, que había sido descubierto mediante el método de las velocidades radiales. En 1999, el astrofísico David Charbonneau detectó la disminución de la luz de la estrella en la fase de la órbita en que se espera (es decir, cuando la estrella tiene una velocidad radial nula en el punto más remoto al observador, después de un corrimiento al rojo de sus líneas, y antes de un corrimiento al azul). Este tránsito fue una confirmación deslumbrante de que las perturbaciones de velocidades

radiales si se debían a planetas (era un hecho algo controversial hasta ese entonces) y abrió una vía para mediciones que hoy en día nos permiten tener una idea de la estructura interna de los planetas extrasolares.

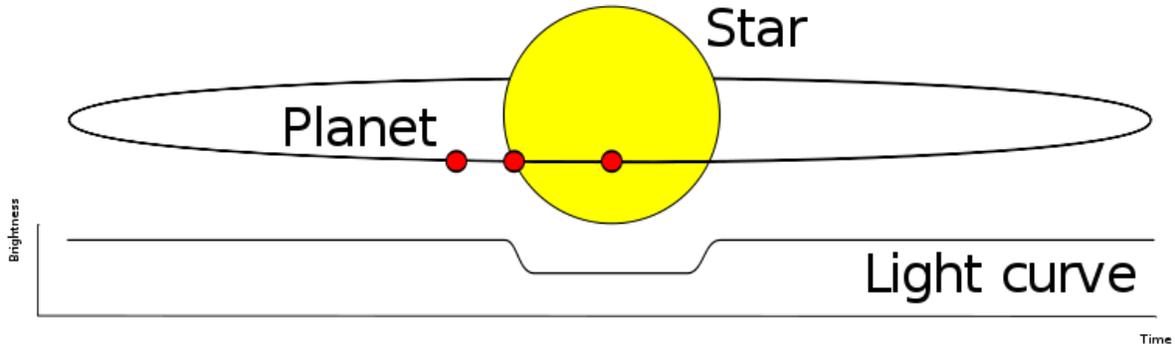


Figura 2. Representación esquemática de un tránsito y de la curva de luz asociada. Se nota la disminución del brillo cuando el planeta pasa delante del disco estelar. Imagen bajo licencia GNU Free Documentation License / Wikipedia

En efecto, la fracción de la luz oculta por el planeta nos permite evaluar el radio de este mismo. Además, cuando existe un tránsito se sabe que $i \sim 90^\circ$ (de hecho se puede medir con una asombrosa precisión la inclinación exacta usando al oscurecimiento al limbo del disco estelar), de lo cual se puede inferir la masa M_p del planeta (y no solamente $M_p \sin i$ como en el caso de las velocidades radiales). De allí se puede inferir la densidad promedio del planeta y, para un conjunto de planetas detectados por tránsito, se puede establecer un diagrama masa-radio y compararlo con modelos teóricos de estructura interna de los planetas.

Existe una gran cantidad de información adicional que se puede inferir cuando un planeta tiene tránsitos. En particular:

- Observando el planeta en algunas líneas (sodio, hidrógeno, etcétera) se puede detectar una atmósfera extensa en forma de cola cometaria.
- A veces se puede detectar en el infrarrojo cercano el tránsito secundario, cuando el planeta pasa detrás de la estrella. De la profundidad de este tránsito (que corresponde a la cantidad de luz emitida por el hemisferio irradiado del planeta) podemos tener una idea de la temperatura superficial del planeta.
- Se ha sugerido que mediciones precisas del tiempo de ingreso y egreso de un tránsito pueden permitir detectar lunas alrededor del planeta: el planeta y una luna orbitan alrededor de su centro de masa, el cual describe una órbita kepleriana alrededor de la estrella. Si el periodo orbital del planeta y el de la luna no son iguales, el planeta a veces se adelanta sobre el

centro de masa, y a veces se atrasa: la medición del tiempo de los tránsitos permite deducir la existencia de lunas.

Finalmente, cabe mencionar que el método de los tránsitos padece del mismo tipo de sesgo observacional que el método de las velocidades radiales: los tránsitos con periodo más corto se detectan más fácilmente, y la probabilidad que un planeta dado transite sobre el disco de su estrella es mayor para los radios orbitales más pequeños.

Efecto de microlente gravitacional

Los rayos de luz no se propagan en línea recta en la vecindad de un cuerpo masivo (lente), sino que experimentan una deflexión que depende de la masa del cuerpo y de su parámetro de impacto. En el caso en que los rayos provienen de una fuente alineada con la lente y el observador, la deflexión de los rayos aumenta la brillantez aparente de la fuente. Este efecto, llamado de microlente gravitacional, ocurre cuando una lente invisible se interpone entre el observador y una estrella de campo. Conforme la lente se acerca (angularmente) a la fuente, se registra un aumento del brillo aparente de esta. Este tipo de evento obedece a las siguientes características:

- La curva de luz es simétrica en el tiempo (se debe a que, sobre la duración del evento, el movimiento relativo de la fuente y de la lente puede considerarse como un movimiento rectilíneo uniforme).
- El aumento de brillo es acromático (el factor de aumento es independiente de la longitud de onda).
- La curva de luz puede modelizarse con alta precisión con pocos parámetros, ya que formalmente la amplificación depende exclusivamente de las distancias de la fuente, de la lente, de la masa del deflector y de la separación angular entre fuente y lente.

Estos estreñimientos permiten descartar variaciones intrínsecas de la fuente cuando se detecta una variación de una estrella de campo susceptible de deberse a un efecto de microlente gravitacional.

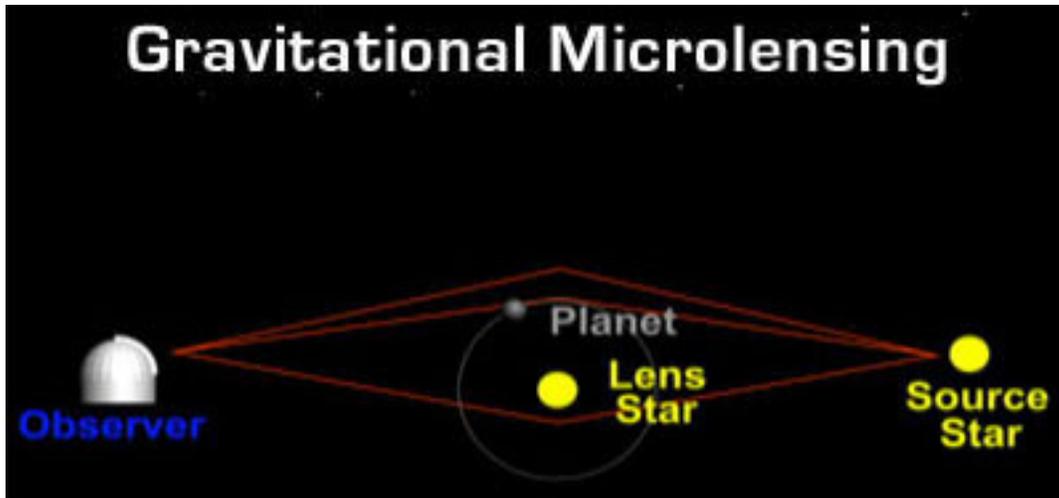


Figura 3. Representación esquemática de un evento de microlente gravitacional. Documento NASA.

Cuando la lente es una estrella con un planeta (ver figura 3), puede que antes o después del evento principal el mismo planeta esté alineado con la fuente y el observador. En este caso se observa un evento secundario, de duración menor y de factor de amplificación menor, que obedece los mismos constreñimientos indicados más arriba. En este caso se puede inferir la masa del planeta y su distancia a la estrella proyectada sobre el plano del cielo. Es importante subrayar que este método, al contrario de los métodos mencionados más arriba, es de índole estadística. El evento solamente se observa una vez, y no necesariamente se puede estudiar la lente por otro método una vez que esté suficientemente separado angularmente de la fuente.

Sin embargo, este método es muy atractivo por las siguientes razones:

- no tiene los mismos sesgos observacionales que el método de las velocidades radiales o el de los tránsitos. En particular es menos sensible a la masa (o radio) del planeta, y puede permitir detectar planetas de baja masa.
- la probabilidad de detección de un planeta es mayor para separaciones más grandes: no existe un fuerte sesgo observacional hacia periodos cortos.
- Siendo de naturaleza estadística, este método permite inferir directamente la probabilidad que una estrella de tipo dado albergue planetas de baja masa, en particular en su llamada zona habitable o más allá.

Hasta la fecha se han detectado 12 planetas por este método, en 11 sistemas planetarios diferentes.

Detección directa

En algunos casos, se han podido hacer directamente imágenes de planetas extrasolares. Estos son generalmente de gran masa y/o jóvenes, y en este caso, el sesgo observacional está a favor de planetas remotos, ubicados al menos a un centenar de unidades astronómicas de su estrella. Un caso espectacular es el de Fom b, planeta gigante detectado alrededor de la estrella Fomalhaut por Paul Kalas y colaboradores, gracias a observaciones por el telescopio espacial Hubble (HST). Se sabía que Fomalhaut tenía un cinturón de polvo, con un radio interno bien marcado de 133 AU. Esto condujo a la astrofísica Alice Quillen, en 2006, a inferir que este cinturón de polvo estaba esculpado por un planeta no más masivo que tres masas de Júpiter orbitando a 119 unidades astronómicas de la estrella. Este planeta se descubrió en 2008, y se pudo observar que ya aparecía en imágenes anteriores del HST, exhibiendo a lo largo del tiempo un movimiento propio perfectamente compatible con un semi-eje mayor de 119 unidades astronómicas (ver figura 4).

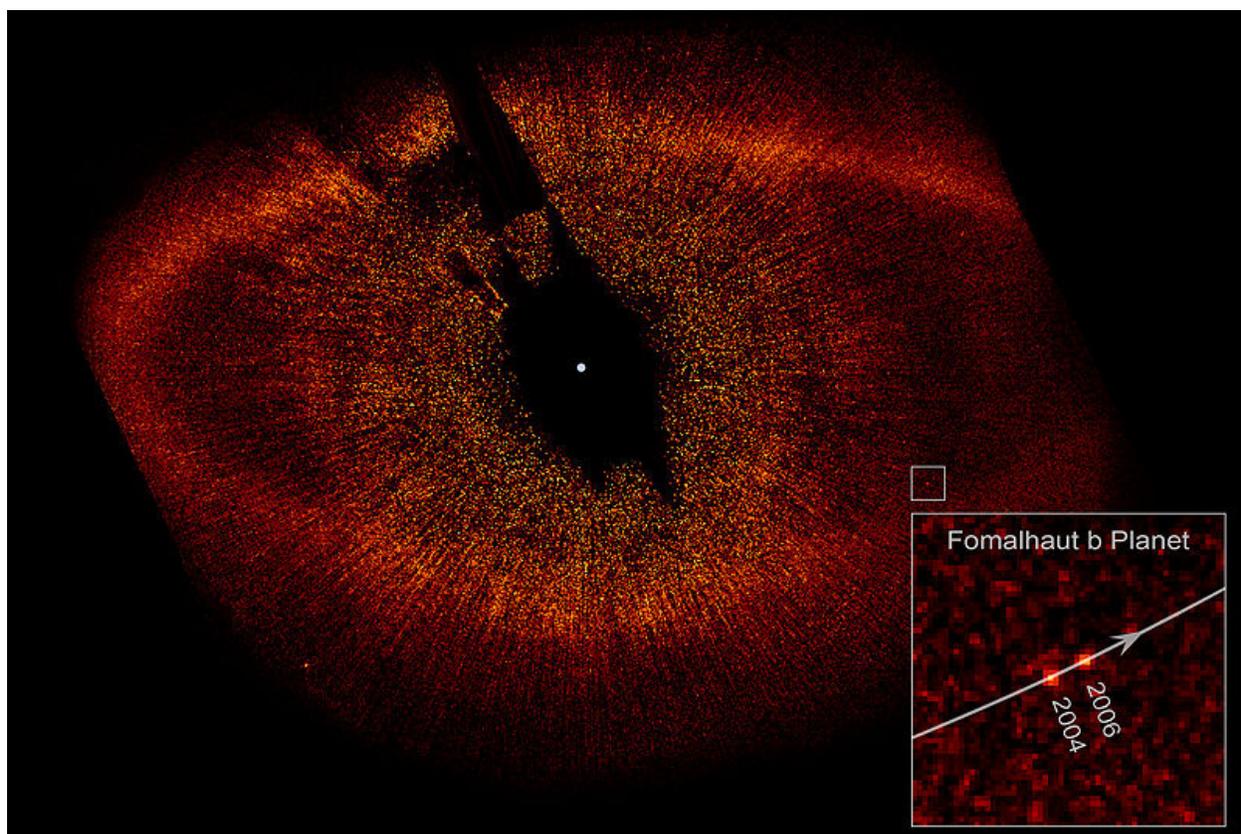


Figura 4. En esta imagen se puede apreciar el pequeño movimiento de Fom b entre los años 2004 y 2006, compatible con una órbita de 119 AU. NASA, ESA, P. Kalas, J. Graham, E. Chiang, E. Kite (University of California, Berkeley), M. Clampin (NASA Goddard Space Flight Center), M. Fitzgerald (Lawrence Livermore National Laboratory), and K. Stapelfeldt and J. Krist (NASA Jet Propulsion Laboratory)

Astrometría

Este método, al igual que el de las velocidades radiales, se basa en el movimiento reflejo de la estrella, que está orbitando el centro de masa común con el planeta. Este movimiento reflejo es sumamente difícil de detectar. Para fijar las ideas, en nuestro sistema solar, el centro de masa del Sol y de Jupiter está aproximadamente a un radio solar del centro del Sol. Esto implica que hay que detectar oscilaciones en la posición de las estrellas del orden de magnitud de su diámetro o radio aparente. El diámetro solar es aproximadamente una centésima parte de una unidad astronómica, con lo cual, a un parsec de distancia, esta oscilación tiene una amplitud, cresta a cresta, de 10 miliarcos de segundo. Esto explica que hasta la fecha no se haya detectado de manera indiscutible un planeta por este método. Hubo muchos anuncios de detecciones por este método, desde 1943, hasta 2009, con un hipotético planeta orbitando alrededor de la estrella VB-10, pero no fue confirmado por el estudio de las velocidades radiales.

Sin embargo, es un método con futuro. Al contrario de las velocidades radiales, permite detectar planetas orbitando casi en el plano del cielo, y proporciona la inclinación de las órbitas, y por ende la masa de los planetas, en lugar de su masa mínima. Grandes proyectos espaciales, como SIM (Space Interferometry Mission) de la NASA, debería alcanzar una precisión de un microarco de segundo, lo cual permitiría detectar planetas de masa terrestre, y la misión GAIA de la ESA estudiará alrededor de mil millones de estrellas de nuestra Galaxia con una precisión de 20 microarcos de segundo.

Sorpresas

La detección hasta la fecha de más de quinientos planetas extrasolares ha llevado consigo numerosas sorpresas. Hasta los autores de ciencia ficción no imaginaban la variedad y las propiedades singulares de algunos sistemas. Vamos a mencionar en esta lista algunas de las sorpresas más sobresalientes que nos proporcionaron.

Planetas calientes

una apreciable fracción de los planetas detectados, entre los cuales el primero (51 Peg), tiene periodos orbitales muy pequeños, de algunos días (compárese con los 88 días de periodo de Mercurio, el planeta más cerca al Sol en nuestro sistema). Aunque era de esperar, por razones de sesgos observacionales, que algunos tuvieran periodos cortos, no hay manera de concebir cómo, en un guión de formación planetaria in situ, se pueden formar planetas tan cerca de su estrella. Los modelos de formación basados sobre la acumulación de un núcleo sólido y la subsecuente acreción de gas del disco están en problemas a estas cortas distancias, donde una buena parte (si no es que todo) del contenido sólido del disco está vaporizado. Modelos alternativos de formación,

basados en la llamada inestabilidad gravitacional, que induce grumos del disco a derrumbarse sobre si mismos a consecuencia de su propia gravedad, podrían actuar en regiones densas y frías del disco, condiciones que no están verificadas, obviamente, a distancias tan cortas. Esto ha llevado a considerar que la mayor parte de estos planetas se han formado más allá en el disco, a distancias donde el proceso de acumulación de un núcleo sólido puede activarse, y que los protoplanetas han migrado, para usar el término usual, bajo el acción de las fuerzas de marea del disco, hasta la vecindad inmediata de la estrella. Aunque hoy en día se entiende bien cómo las fuerzas de marea pueden ser lo suficientemente importantes como para reducir drásticamente el radio orbital de un planeta durante el periodo de existencia del disco protoplanetario, todavía se desconoce por qué en algunos sistemas los planetas migraron y en otros, al parecer, tuvieron una migración despreciable.

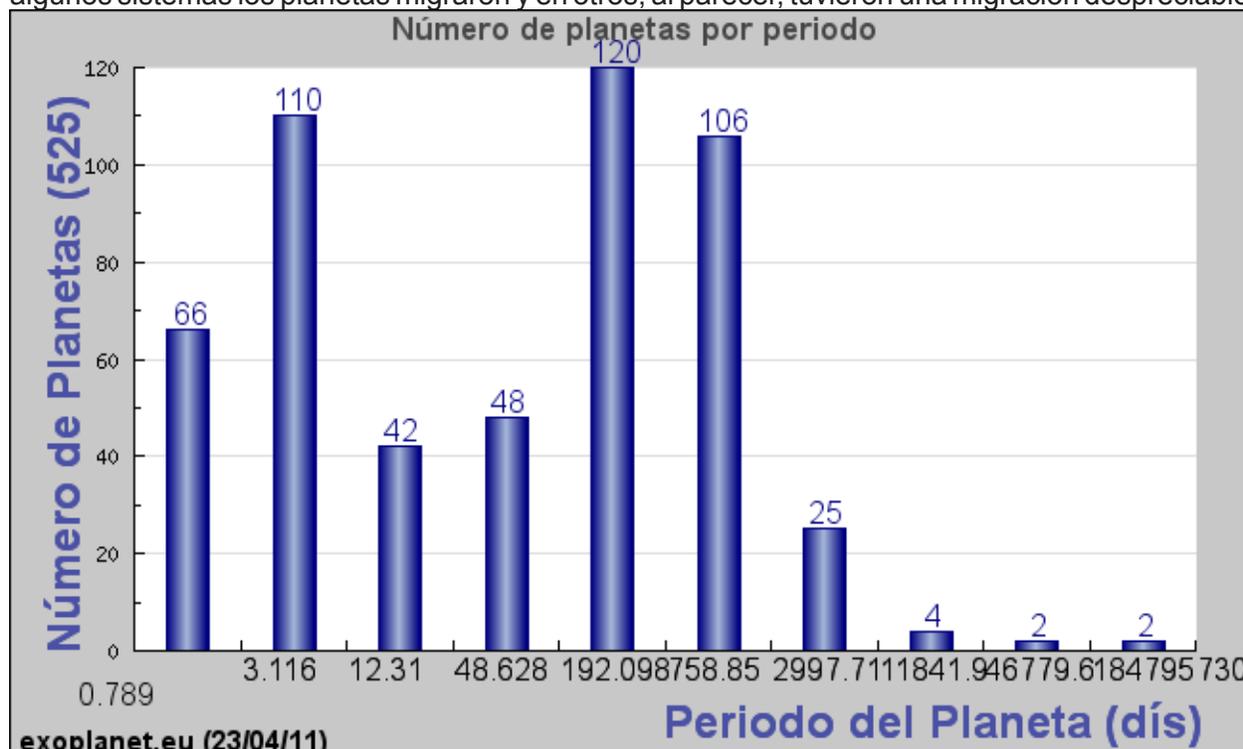


Figura 5. Histograma de los periodos orbitales de 525 de los planetas extrasolares conocidos. Se ve que mas de una tercera parte tiene un periodo orbital inferior a diez dias.

Planetas excéntricos

Otra gran sorpresa que nos han brindado los exoplanetas es su distribución de eccentricidades. Mientras que en el sistema solar, casi todas las órbitas tienen una eccentricidad pequeña, existen numerosos sistemas extrasolares en los cuales planetas gigantes pueden alcanzar eccentricidades altas, algunas reminiscentes de las altas eccentricidades de cometas en nuestro sistema solar. El origen de estas eccentricidades es desconocido. El proceso de formación de un planeta mediante la acumulación de un núcleo sólido debería dar lugar a un cuerpo en órbita casi circular. Se ha

planteado la posibilidad de que los efectos de marea con el disco podrían desestabilizar las órbitas de los planetas masivos y volverlos excéntricos. Sin embargo, de todas las simulaciones numéricas que se han emprendido para comprobar esta hipótesis, ninguna ha permitido obtener planetas excéntricos. Se supone ahora, que el origen más probable de las excentricidades reside en las interacciones entre planetas masivos, que dan lugar al proceso llamado dispersión dinámica, en el cual un subconjunto de los planetas está eyectado del sistema, mientras los otros permanecen en órbitas excéntricas.

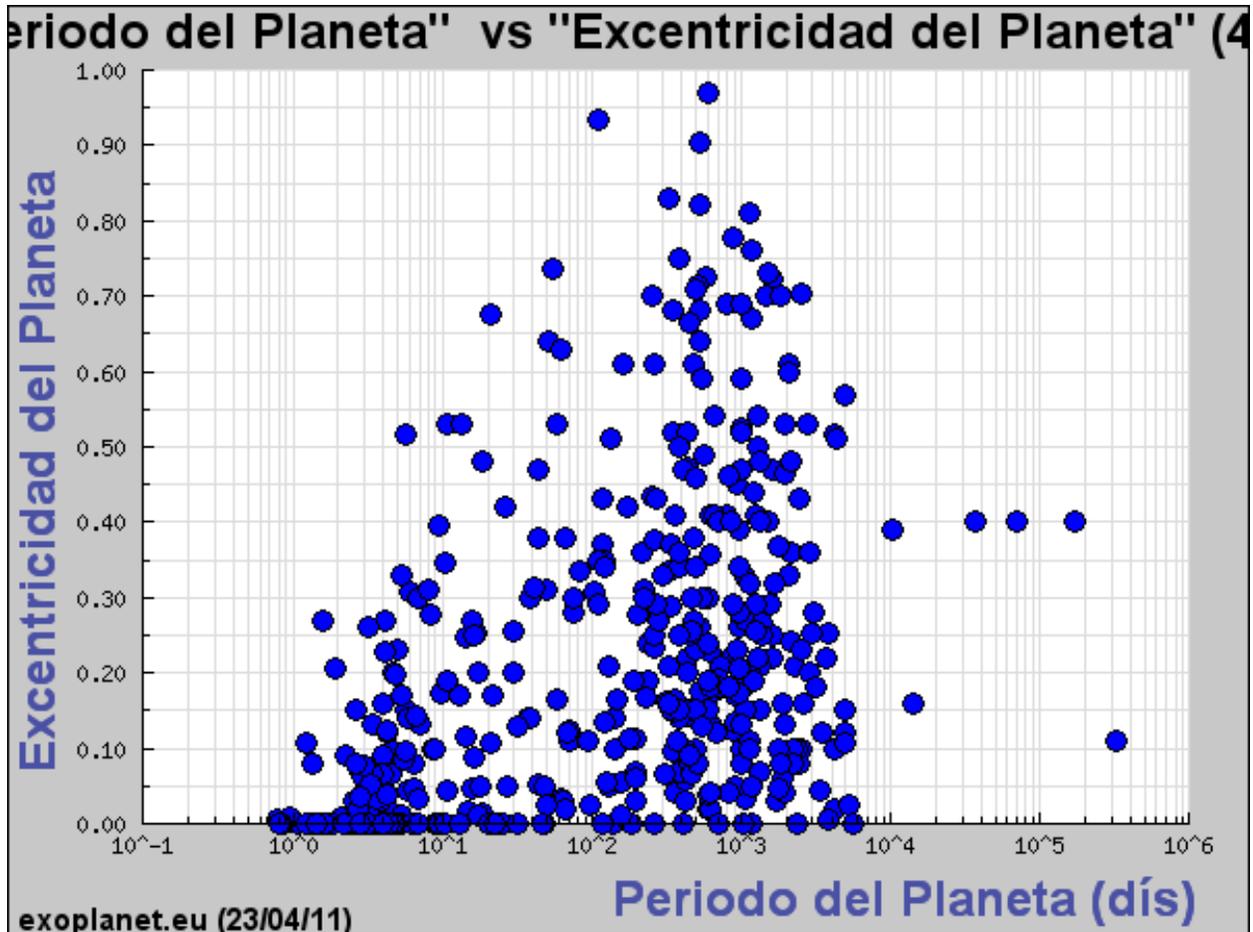


Figura 6. Excentricidad de los planetas en función de su periodo. Se ve una distribución que alcanza valores superiores a 0.9. También se nota que los planetas calientes, con periodos inferiores a diez días, tienen valores promedio de excentricidad mucho menor, y muchos de ellos son circulares. Esto se entiende como debido a la circularización de las órbitas por efecto de marea entre la estrella y el planeta.

Planetas retrógradas

Cuando se estudia un planeta en tránsito simultáneamente por el método de velocidades radiales, aparece un efecto interesante llamado el efecto Rossiter-McLaughlin. Cuando el planeta está ocultando una fracción del lado «azul» de la estrella (el que corresponde a materia

que se acerca a nosotros debido a su propia rotación), el centro de gravedad de la líneas del espectro parece corrido al rojo. Y viceversa, cuando el planeta está ocultando una fracción lado «rojo» de la estrella, tenemos el efecto contrario: la líneas están corridas al azul. Si el planeta y la estrella están dando vueltas en el mismo sentido, es fácil convencerse de que el planeta debería siempre ocultar primero el lado azul de la estrella. De manera más general, el efecto Rossiter-McLaughlin permite evaluar el ángulo entre el eje de la estrella y el eje de la órbita (es decir, el eje perpendicular al plan de la órbita). En el caso en que la órbita yace en el plano ecuatorial de la estrella y la rotación se hace en el mismo sentido, el ángulo es nulo. Aunque esto es aproximadamente el caso para la mayor parte de los planetas en tránsito conocidos, existen unos cuantos para los cuales el ángulo es mayor que 90 grados, es decir, que la órbitas de dichos planetas son retrógradas. Hasta la fecha se desconoce el origen de esta sorprendente configuración. La rotación de la estrella y el sentido en que órbita el planeta deberían coincidir con el sentido de rotación del disco proplanetario. Se ha especulado que el eje de rotación de la estrella puede revertirse bajo el efecto de la interacción magnética entre la estrella y el disco. Al revés, se ha especulado como difusión dinámica entre planetas calientes (de corto radio orbital) podía llevar a revertir algunas órbitas. Es indudable que, conforme vayamos conociendo más sistemas retrógradas, tendremos una valiosa información estadística que nos permitirá constreñir el origen del desalineamiento.

Resonancias de medio movimiento

Hasta la fecha se conocen 49 sistemas planetarios múltiples. El que tiene mayor número de planetas detectados es Kepler-11 con 6 planetas en tránsito. Una apreciable fracción de los planetas en sistemas múltiples exhiben lo que se llama resonancia de medio movimiento. Cuando uno de los planetas da un número entero p de vueltas en torno a la estrella, otro planeta da otro número entero q de vueltas en torno a la estrella. Se suele decir, en este caso, que los planetas tienen una conmensurabilidad $p:q$, o una resonancia de medio movimiento $p:q$. Este tipo de conmensurabilidad es común entre la lunas de planetas gigantes en el Sistema Solar. Existe en particular entre lunas Galileanas de Júpiter, o las de Saturno. En este caso, se entiende el origen de estas conmensurabilidades como algo que se debe a una evolución de las órbitas bajo el efecto de marea con el planeta central. Por ejemplo, lo, el satélite Galileano más cercano a Júpiter, se aleja de este último por efecto de marea. Al llegar en resonancia de medio movimiento con Europa, el segundo satélite, aparece una torca resonante entre ambos satélites, que los «amarran» en resonancia y hace que sigan juntos su camino hacia afuera. El mismo efecto ocurre con planetas embebidos en un disco protoplanetario, a diferencia de que son los efectos de marea con el mismo disco los que hacen variar la órbitas (el llamado efecto de migración planetaria). Cuando existe una migración convergente entre dos protoplanetas (el cociente de su semi-ejes mayores se acerca a uno), los planetas pueden llegar a engancharse

en resonancia de medio movimiento, que conservan luego a lo largo de su evolución por efectos de marea. Este efecto, que se reproduce fácilmente en simulaciones numéricas, es muy importante para brindar información sobre los procesos de migración que prevalecían en el disco en el momento en que los planetas entraron en resonancia. En la mayoría de los casos detectados hasta la fecha, los planetas están en resonancia 2:1.

Datos de estructura interna de los exoplanetas

Como lo mencionamos anteriormente, los datos recolectados para los planetas en tránsito permiten evaluar, independientemente la masa y el radio de estos planetas, con una precisión asombrosa. En el diagrama masa-radio que podemos graficar para estos objetos, se desprende una tendencia de que los planetas en tránsito, cuya masa está en el rango 0.5-1.5 masa de Jupiter, tienen un radio mayor al de la relación teórica masa-radio de planetas con abundancias solares. No es totalmente sorprendente que estos planetas, con radio orbital pequeño, y en consecuencia muy calientes, estén algo inflados. Sin embargo, existen planetas con radios sumamente grandes, como TrES-4 o WASP-12, que requieren de mecanismos aún desconocidos para justificar semejante inflación. Al contrario, un planeta como HD149026 yace muy por debajo de la relación teórica y requiere de no menos de 70 masas terrestres para justificar su radio pequeño.

Conclusión

La detección de planetas extrasolares es una de las ramas más dinámicas de la astrofísica moderna. Los progresos efectuados en los dieciséis últimos años (es decir, desde el descubrimiento del primer planeta extrasolar) son asombrosos, y cada nueva técnica lleva consigo su lote de sorpresas. A la brevedad se agregarán a las estadísticas los datos de la misión espacial Kepler, que tiene a la fecha 1235 candidatos planetas en tránsito (candidatos solamente, ya que desgraciadamente puede haber una sustancial fracción de falsos positivos). A medida que se detectan nuevos planetas, se recolectan datos orbitales que vienen constreñir las teorías de formación y migración planetaria. Uno de los retos de esta continua caza de planetas es el hallazgo de planetas en la llamada zona habitable, rango de radio orbital donde se supone que un planeta podría poseer agua líquida, y podría haber existido vida. La extensión de esta zona habitable depende del tipo espectral de la estrella. Aunque muchos de los planetas extrasolares descubiertos (más de cien) se ubican en la zona habitable de su estrella, es probable que tengamos que descartar los planetas gigantes por no tener superficie (sólida o líquida), lo cual los hace poco propicios a la aparición de la vida. La muestra de planetas de baja masa en su zona habitable es actualmente muy pequeña, y por razones de sesgos

observacionales contiene esencialmente planetas orbitando enanas rojas (estrellas de tipo M). Es razonable apostar que a mediana escala de tiempo se detectarán planetas de masa terrestre en la zona habitable de estrellas de tipo solar.

Referencias

Charbonneau, D., Brown, T., Latham, D., Mayor, M. 2000, *ApJ*, 529, L45

Kalas, P., Graham, J., Chiang, E., Fitzgerald, M.P., Clampin, M., Kite, E.S, Stapelfeldt, K., Marois, C., Krist, J. 2008, *Science*, 322, 1345.

Mayor, M. and Queloz, D. 1995 *Nature*, 378, 355

Quillen, A. 2006 *MNRAS*, 372, L14

Se puede también consultar :

<http://exoplanet.eu>

<http://exoplanets.org>