

# TEMAS DE FRONTERA EN LAS CIENCIAS PLANETARIAS

## EXOPLANETAS: LA PROMESA DE UNA PLANETOLOGÍA COMPARADA

*Exoplanets: The promise of a comparative Planetology*

José Antonio Caballero (\*)

### RESUMEN

*La detección en 1995 del primer candidato a exoplaneta descubierto alrededor de una estrella de la secuencia principal distinta del Sol marcó una revolución copernicana de la Astrofísica y de la Ciencia en general. En esta revisión repasaremos brevemente la corta historia y las metodologías empleadas para la detección de exoplanetas y cómo éstos serán detectados en el futuro cercano. Se dará un especial énfasis a los candidatos a exoplanetas detectados por el método de velocidad radial y a los detectados directamente en cúmulos estelares muy jóvenes.*

### ABSTRACT

*The detection in 1995 of the first exoplanet candidate discovered around a main sequence star different from the Sun marked the beginning of a Copernican revolution in Astrophysics and in Science in general. In this review I will briefly revise the short history and the methods employed to detect exoplanets and how they will be discovered in the near future. A special emphasis will be given to the exoplanet candidates detected via the radial velocity method and to those directly detected in very young star clusters.*

**Palabras clave:** *Sistemas planetarios, estrellas: de baja masa, enanas marrones*

**Keywords:** *Planetary systems, stars: low-mass, brown dwarfs*

### INTRODUCCIÓN

Una estrella G2V, cuatro planetas telúricos y cuatro jovianos y una miríada de satélites, asteroides, cometas y objetos transneptunianos (incluyendo Plutón) son los miembros de nuestro Sistema Solar. Desde épocas remotas nos hemos preguntado si hay más sistemas planetarios parecidos al nuestro alrededor de otras estrellas y, si existen esos mundos, cómo son y si son habitables. Giordano Bruno no fue el primero en afirmar que había gran cantidad de planetas habitados en el Universo: Aristóteles y Epicuro, por ejemplo, ya habían discutido sobre el tema varios siglos antes. Pero sí fue de los primeros que dio su vida por defender esta idea. *Sobre la pluralidad de los mundos habitados* era el título de la obra que le llevó a la hoguera (Bruno, 1584).

No fue hasta principios del siglo XX cuando se empezaron a estudiar seriamente la formación, detección o características de planetas alrededor de otras estrellas. Grandes astrónomos como sir Arthur Eddington u Otto Struve llegaron a estudiar estos te-

mas. En 1992, los radioastrónomos Wolszczan y Frail publicaron un artículo en el que se demostraba la existencia de al menos dos objetos cuyas masas deducidas se hallaban comprendidas entre 3 y 5 masas terrestres orbitando alrededor del púlsar PSR 1257+12. Un púlsar es una estrella de neutrones que emite ondas de radio, un objeto extremadamente compacto originado en una explosión de supernova.

El origen de ambos objetos de naturaleza desconocida podría estar asociado al fenómeno de la supernova y no tratarse, por tanto, de planetas comunes.

Tres años más tarde, en 1995, los suizos Michel Mayor y Didier Queloz publicaron un descubrimiento histórico: la detección del primer exoplaneta<sup>1</sup> en torno a una estrella de la secuencia principal (la fase adulta de una estrella, en la que quema hidrógeno en su núcleo, para convertirlo en helio). Este exoplaneta se descubrió en órbita de la estrella 51 de la constelación de Pegaso, 51 Pegasi, una subgigante G2IV a unos 48 años-luz del Sol. No fue una detección casual, sino el fruto de un largo, cuidadoso y duro tra-

(\*) Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, 38200 Tenerife. E-mail: zvezda@iac.es

(1) El término exoplaneta es más adecuado que el de planeta extrasolar, que implicaría la existencia de otros intrasolares. Y, como dice la astrofísica Virginia Trimble, "Yo nunca he visto un planeta dentro del Sol: todos están fuera".

bajo de observaciones, tratamiento y análisis de datos. El anuncio de Mayor y Queloz recibió mayor atención que el de Wolszczan y Frail tanto por parte de los medios de comunicación como por la comunidad científica: la estrella alrededor de la que giraba este exoplaneta era muy parecida a nuestro Sol.

Unos meses después, a principios de 1996, Paul Butler y Geoff Marcy, de un grupo competidor en California, anunciaron la detección de otros dos exoplanetas alrededor de sendas estrellas de la secuencia principal: 47 Ursae Majoris y 70 Virginis. Según un rumor que se extendió entonces, podrían haber sido los primeros en realizar el anuncio si hubiesen estudiado con mayor premura los datos que habían recopilado durante años. 51 Peg b, 47 UMa b y 70 Vir b fueron solamente la punta de lanza, los primeros de una lista que desde entonces crece mes a mes. Después vendrían 55 Cnc, 16 Cygni Bb, tau Bootis b, upsilon Andromedae bcd (Butler & Marcy 1996, Marcy & Butler 1996)... A mediados de abril de 2004, el número de sistemas planetarios en torno a estrellas de la secuencia principal ya era de 105, de los que trece eran múltiples (es decir, con dos o más exoplanetas en órbita alrededor de la estrella central). Para saber el número de candidatos a exoplanetas más reciente, véase, por ejemplo, la página web de *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* de Jean Schneider <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>. En Marcy & Butler (1998) y Perryman (2000) se pueden encontrar revisiones completas del tema que aún no han perdido su vigor.

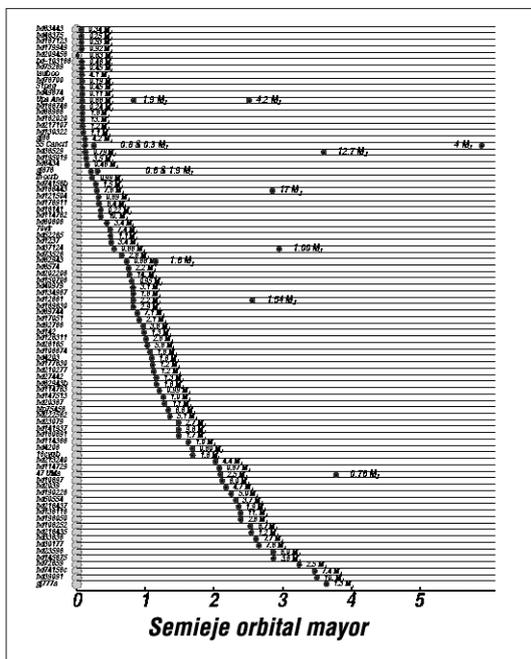


Fig. 1: Masas y semiejes orbitales de un número importante de los candidatos a exoplanetas. Sistemas múltiples: GJ 876, 55 Cancri, HD 37124, HD 12661, 47 Ursae Majoris, HD 168443, HD 82974, HD168443, HD74156 y upsilon Andromedae. De los únicos siete planetas descubiertos a más de 2 UA de sus estrellas, tres forman parte de sistemas múltiples. En: <http://exoplanets.org>.

## MÉTODOS DE DETECCIÓN: velocidad radial

Los planetas de nuestro Sistema Solar no giran alrededor del Sol, sino alrededor del baricentro del Sistema Solar, que es básicamente el baricentro de la pareja Sol-Júpiter. Visto desde fuera del Sistema y con la suficiente precisión, ¡veríamos cómo el Sol gira en realidad alrededor de un punto ficticio con una periodicidad igual al período de revolución de Júpiter alrededor del Sol (11.9 años)!.

El método Doppler de velocidad radial simplemente tiene en cuenta este vaivén gravitatorio que los exoplanetas gigantes muy masivos provocan en sus estrellas. Dependiendo de la posición relativa entre estos dos y la Tierra, veremos que la radiación que emite la estrella se desplaza alternativamente hacia el azul (la estrella se aleja de nosotros) o hacia el rojo (se acerca). Es fácil darse cuenta que el vaivén será mayor cuanto más masivo sea el exoplaneta ( $M_p$ ) respecto a su estrella y cuanto más cerca esté de ella (también cuando su órbita sea más excéntrica). La amplitud de los desplazamientos espectrales hacia el rojo o el azul se mide comparando las longitudes de onda o posiciones en el espectro de una línea medida en la estrella y la misma línea medida en el sistema de referencia de la Tierra. La medida de la amplitud de variaciones en la velocidad radial se ha venido utilizando desde hace mucho tiempo para el estudio de sistemas estelares dobles muy próximos en los que las imágenes de ambos componentes no se podían resolver mediante telescopios en tierra. Las precisiones que se habían alcanzado hasta mediados de los 80 apenas eran menores de 1 km/s. Sin embargo, algunos espectrógrafos actuales alcanzan una precisión de hasta 3 m/s, siendo capaces por tanto de detectar planetas como Júpiter a 4 o 5 unidades astronómicas, o planetas más livianos que Saturno a la distancia Mercurio-Sol. Desafortunadamente, 3 m/s es el límite mínimo que se puede alcanzar, ya que es el ruido intrínseco que se produce en el espectro de la estrella por los movimientos de convección, de ascenso y de descenso, en su atmósfera.

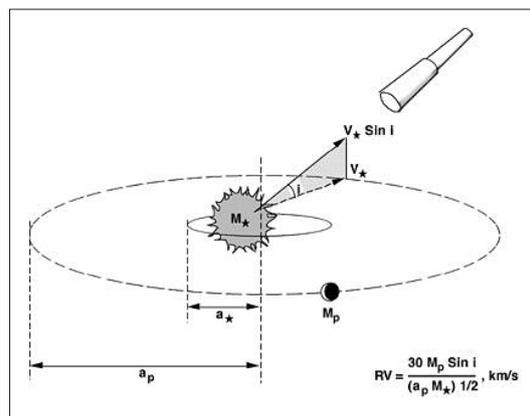


Fig. 2: Representación pictórica de un exoplaneta y una estrella girando alrededor de un baricentro común. Nótese el ángulo de inclinación  $i$  con que se observa el sistema. La velocidad radial  $RV$  depende de ambas masas y del seno de  $i$ .

La amplitud de variación de velocidad radial depende muy especialmente del ángulo con que vemos la órbita del exoplaneta y de su estrella ( $i$ ). La amplitud de las variaciones será máxima si la Tierra, el exoplaneta y su estrella están en el mismo plano. Sin embargo, si los dos últimos orbitan en un plano perpendicular a nuestra línea de visión, la estrella no se acercará ni alejará de nosotros, sino que se moverá transversalmente en su órbita alrededor del baricentro de su sistema. Por tanto, en este caso no se medirá ninguna variación de velocidad radial. Debido a este ángulo de inclinación, en realidad con este método no se puede calcular la masa real del planeta, sino su masa mínima ( $M_p \text{ sen}(i)$ ). La masa real ( $M_p$ ) se puede calcular sólo si conocemos tal ángulo. Es muy probable que la mayoría de los candidatos a exoplanetas gigantes con masas mínimas por encima de una decena de MJup sean en realidad enanas marrones, objetos a mitad de camino entre estrellas y planetas gigantes que definiremos más adelante. Sólo conocemos con fiabilidad la masa real de un exoplaneta, la de HD 29458 b. La determinación de esta masa, 0.69 MJup, a través del conocimiento del ángulo de inclinación de la órbita del planeta respecto a nosotros,  $86,1^\circ$ , proviene de la observación de los tránsitos que el planeta produce sobre la superficie de la estrella (Charbonneau et al. 2000; Brown et al. 2001).

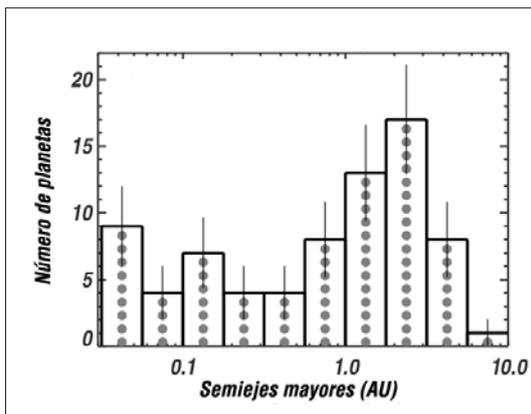


Fig. 3: Histograma de frecuencias de semiejes orbitales para una muestra de 75 candidatos a exoplanetas.

### MÉTODOS DE DETECCIÓN: tránsitos, astrometría, microlentes...

Nada más descubrirse un candidato exoplanetario en órbita muy cercana por velocidad radial, su estrella es sujeta a un intenso seguimiento fotométrico con el fin de detectar algún posible tránsito: a distancias orbitales tan cortas, la probabilidad de que la sombra del planeta oculte a los observadores terres-

tres parte de la luz de la estrella es bastante alta. La curva de luz de la estrella HD 295458 presenta pequeñas caídas de unas pocas milésimas de magnitud que se repiten periódicamente, justo exactamente cada 3,524738 días, que es precisamente el período detectado por el método de velocidad radial. Estos pequeños eclipses han sido observados por el telescopio espacial Hubble, lo que ha permitido determinar con precisión el ángulo de inclinación de la órbita del planeta, su masa real e incluso su radio. Recientemente se han realizado intensos estudios espectroscópicos del sistema HD 295458 que han per-

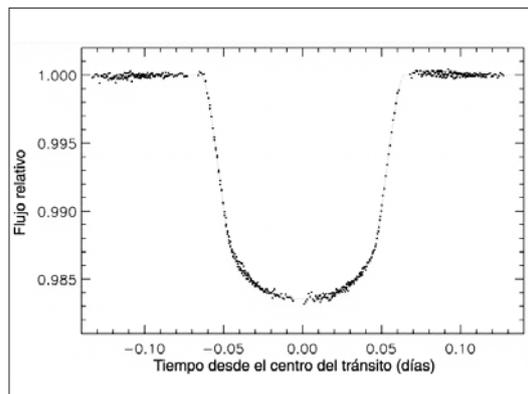


Fig. 4: Curva de luz de HD 209458. Fotometría del telescopio espacial Hubble. Brown y colaboradores (2001).

mitido descubrir cómo el exoplaneta va perdiendo las capas atmosféricas más externas, que el viento solar empuja al medio interplanetario (Charbonneau et al. 2002; Vidal-Madjar et al. 2004).

OGLE-TR-56 b es otro candidato a exoplaneta gigante detectado primeramente por el método de la detección de tránsitos. Éste y otros nueve más presentados por varios proyectos internacionales han sido detectados durante seguimientos fotométricos continuos de una enorme cantidad de estrellas en dirección al centro galáctico durante varias decenas de noches consecutivas. El cortísimo período de revolución de OGLE-TR-56 b alrededor de su estrella, de tan solo 1,2 días, obliga a que el planeta gire a tan solo 0,0225 UA de ella, un valor muy cercano al límite de Roche de destrucción por mareas gravitatorias. La confirmación de su naturaleza por medio del método de velocidad radial es una empresa difícil debido a la debilidad de la estrella central (Udalski et al. 2002) <sup>2</sup>.

Se han propuesto otros métodos para la detección de exoplanetas alrededor de estrellas, pero ninguno de ellos ha dado aún ningún fruto. El más prometedor quizá sea el método astrométrico. Se basa en el mismo efecto físico que el de la velocidad radial: medir el vaivén gravitatorio que produce un

(2) Post scriptum: el 14 de abril de 2004, el grupo suizo del Dr. Mayor anunció la confirmación por el método de velocidad radial de la naturaleza planetaria de dos candidatos a planetas jovianos muy calientes en órbitas muy cercanas detectados mediante tránsitos, OGLE-TR-113 y 132.

planeta masivo sobre la estrella a la que orbita. Esta vez no se mide el desplazamiento hacia el azul o el rojo de la luz emitida por la estrella, sino que se mide directamente la distancia angular que hay entre el baricentro del sistema solar y el centro de la estrella. Con las próximas misiones astrométricas desde el espacio seremos capaces de ver a la estrella describir una elipse de unas pocas millonésimas de segundo de arco de tamaño proyectada en la bóveda celeste (estrictamente, veremos la superposición del movimiento propio del sistema en su giro alrededor del centro galáctico más el de la perturbación gravitatoria). Para detectar variaciones en la posición astrométrica tan minúsculas es necesario salvar los problemas que origina la atmósfera terrestre, por lo que es indispensable la colocación de los sistemas ópticos a bordo de satélites espaciales.

El método de las microlentes gravitatorias tiene en común con el de la detección de tránsitos el procedimiento: la observación continuada de áreas extensas de cielo. Multitud de curvas de luz, una para cada estrella del campo, son estudiadas cuidadosamente no en busca de tránsitos planetarios, sino, por el contrario, de intensos aumentos de luminosidad. Como su nombre indica, el método se basa en el mismo efecto que da lugar a las lentes gravitatorias, en el que una gran masa curva con su gravedad la estructura del espaciotiempo que la rodea y enfoca los rayos de una fuente más lejana. En principio, este método se aplicó para la detección de MACHOS (en inglés, objetos compactos masivos del halo galáctico), uno de los posibles ingredientes no encontrados de la materia oscura bariónica. Sin embargo, la observación de un suceso de microlente no es repetible, con lo que este método ha ido perdiendo interés. MACHO-97-BLG-41 es un suceso de microlente gravitatoria que se puede explicar mediante la existencia de un planeta joviano en torno a un sistema estelar doble<sup>3</sup>.

## BOLAS GIGANTES DE GAS

Las masas *mínimas* calculadas para los candidatos a exoplanetas detectados por velocidad radial son tan grandes, al menos, como la de Saturno. Como comparación, la masa de Júpiter (1 MJup) es unas 300 veces superior a la de la Tierra, aunque unas 1000 veces inferior a la del Sol. Saturno “sólo” es 95 veces más masivo que la Tierra. Es decir, estos candidatos a exoplanetas son realmente bolas gigantes de gas que, además, orbitan a distancias increíblemente pequeñas de sus estrellas. Efectivamente, sólo cuatro de los 120 planetas detectados hasta ahora poseen masas mínimas inferiores a 0,25 MJup, muy similares a las de Saturno. Ello rompió todos los modelos de formación planetaria sobre los que se había trabajado hasta 1995 [por ejemplo: Wetherill (1990); Lissauer (1993); Boss (1995)]. Como ilus-

tración, 51 Peg b posee una masa mínima de 0,46 MJup, y está a una distancia de su estrella de tan sólo 0,0512 unidades astronómicas, 7 vulgares millones de kilómetros frente a los 150 que separan la Tierra del Sol. Un año 51-pegasiano, el tiempo que el planeta tarda en dar una revolución completa en torno a su sol, es de 4 días y 6 horas. Con estos parámetros orbitales, la temperatura en las capas más altas de la atmósfera del exoplaneta debe de ser tan alta que cierta masa del planeta se va perdiendo al medio interplanetario, evaporándose (como se ha comprobado que le ocurre a HD 209458 b). 51 Peg b sólo es un ejemplo de los tres quintos de candidatos a exoplanetas que poseen también masas mínimas entre 0,12 y 13 MJup y se encuentran a distancias inferiores a una unidad astronómica (UA).

Para formar planetas jovianos a partir un disco protoplanetario se necesita mucha masa. Se necesita, especialmente, una semilla grande sobre la que después se vaya añadiendo gas y más gas hasta originar, por ejemplo, Júpiter. Pequeñas semillas sobre las que crecerá un planeta son normales en nuestro Sistema Solar. Vamos montados en una de ellas... Afortunadamente, la prototierra no dispuso de más masa inicial, ya que en caso afirmativo nuestro planeta hubiera sido capaz de retener la atmósfera primordial de hidrógeno y helio. Sin embargo, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, más allá de 5 UA del Sol, partieron de semillas mucho más grandes, de al menos 10 masas terrestres. Esto es porque en el momento de formación de los protoplanetas, desde esa distancia, el agua no se encontraba en forma gaseosa, y se podían formar semillas masivas de cristales de hielo: grandes icebergs que se iban arrastrando por el disco protoplanetario exterior y que iban atrayendo gas y creciendo a su costa. Entonces, ¿cómo podemos encontrar ahora planetas a menos de una centésima parte de las 5 UA que creíamos que era su límite?. ¿Se han formado realmente ahí, a partir de discos de acreción extremadamente densos, o se formaron en las regiones externas del disco y después han migrado hacia el interior?. ¿Fue causada esta migración por la transferencia de momento angular entre el planeta y las partículas del disco, fue simplemente viscosidad del gas y frenado dinámico o fue el resultado de alguna interacción gravitatoria entre planetas gaseosos, una carambola planetaria en la que uno de los planetas sale expelido del sistema mientras que otro es lanzado a las cercanías de su sol o incluso engullido por éste?.

Como dice el título de este artículo, la planetología comparada no es (¡por ahora!) más que una promesa. Tan sólo conocemos las masas mínimas y los períodos de revolución de los candidatos a exoplanetas, y algunas de las características de sus estrellas progenitoras, como su edad o metalicidad (abundancia relativa de elementos más masivos que el helio). Los cazadores de planetas anotan varias peculiaridades

(3) *Post scriptum*: el 15 de abril de 2004, los equipos MOA y OGLE anunciaron la detección de un suceso de microlente “definitivo”. Junto con el anuncio de otros nueve candidatos a planetas transitantes, el mes de abril ha sido realmente fructífero en el área exoplanetaria.

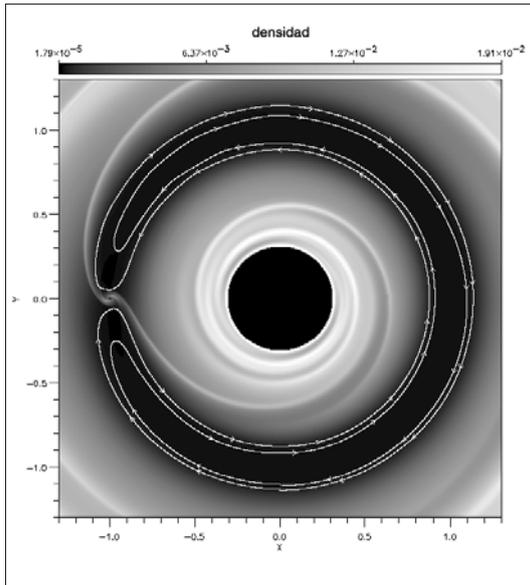


Fig. 5: Líneas de corriente en el hueco que un exoplaneta gigante en proceso de formación (a la izquierda de la imagen) crea en un disco protoplanetario alrededor de la estrella (en el centro). Los cálculos indican que existe una transferencia de momento angular del protoplaneta al disco, con lo que el período orbital del planeta se va reduciendo. Lubow, Seibert y Artymowicz (1999, ApJ, 526, 1001)

des: 1) se detectan más planetas cerca de las estrellas que lejos; 2) los exoplanetas tienen órbitas de excentricidades muy diversas; y 3) las estrellas con sistemas planetarios poseen metalicidades mayores que las que no los tienen. Mientras que la primera cuestión podría ser simplemente un sesgo observacional debido al método de detección empleado, las dos últimas nos pueden dar información acerca de los posibles mecanismos de formación de los exoplanetas gigantes [por ejemplo: Santos et al., 2004].

## PLANETAS AISLADOS

El vocablo planeta proviene del griego: errante o vagabundo. Mongo, el planeta de Ming el Terrible de las tiras cómicas de Flash Gordon, era un planeta al pie de la letra: no giraba alrededor de ningún sol y estuvo a punto de colisionar contra la Tierra en uno de sus paseos espaciales. Bien, pues este tipo de planetas también existe. Para entender cómo se pueden encontrar objetos de unas pocas masas jovianas flotando libremente en el espacio interestelar hay que volver a 1995. Unos pocos meses después del descubrimiento de 51 Peg b, un grupo de investigadores españoles anunció el descubrimiento de la primera enana marrón (Rebolo et al., 1995). A pesar de haber sido predicha su existencia desde principios de los 60, tuvieron que transcurrir más de 30 años para que se detectaran. Básicamente, una enana marrón es el

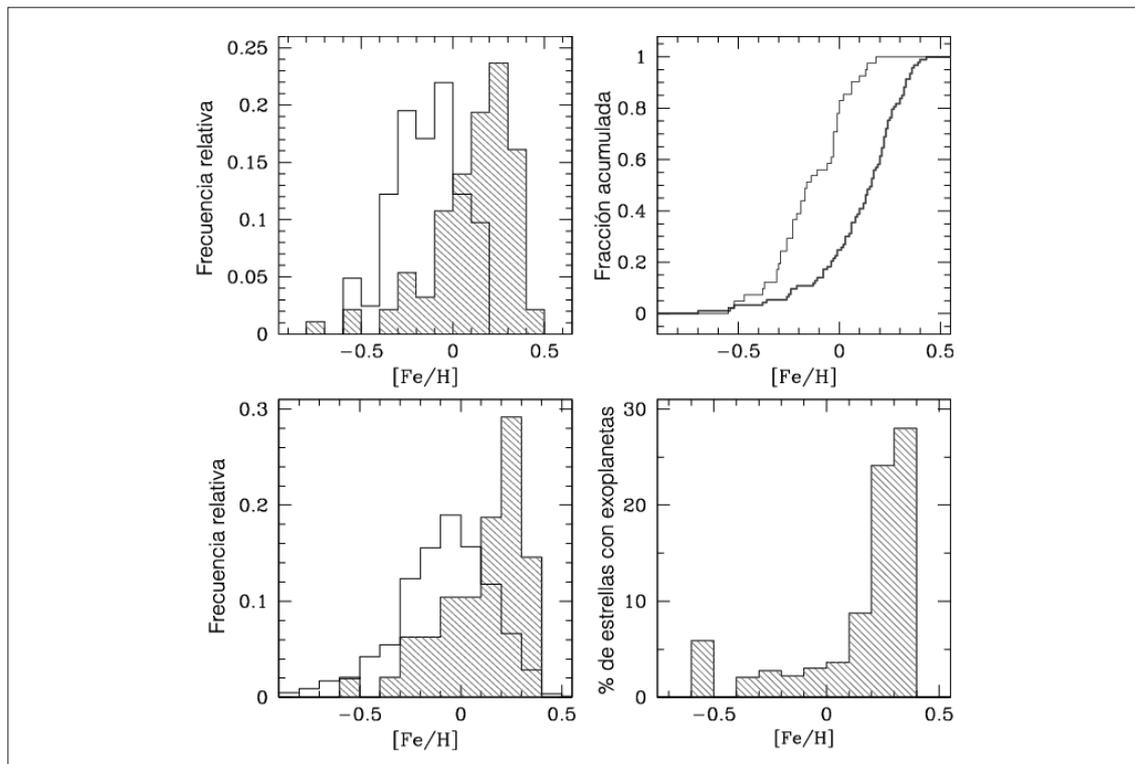


Figura 6: Paneles superiores: distribución de Fe/H (un medidor de la metalicidad) para estrellas con planetas (histograma rayado) y de una muestra limitada de estrellas de comparación (no rayado). La diferencia media entre la relación Fe/H de las dos muestras es de 0.25 unidades. Panel inferior, izquierda: una comparación similar a la de arriba, pero con objetos estudiados dentro del programa CORALIE. Panel inferior, derecha: para el programa CORALIE, porcentaje de estrellas con planetas en la muestra de estrellas del programa en función de la metalicidad estelar. Santos y colaboradores (2004).

puente entre las estrellas más ligeras y los planetas más masivos. Más estrictamente, es un cuerpo de gas y plasma sostenido por su propia gravedad con una masa tal que en su interior no se alcanza la temperatura suficiente como para que se den reacciones nucleares de combustión de hidrógeno ligero. Por el contrario, las estrellas de la secuencia principal “quemar” este isótopo, convirtiéndolo en helio. Esta masa mínima es de unas 72 MJup. En realidad, con masas inferiores a este límite, las enanas marrones son capaces de quemar un isótopo de hidrógeno más pesado, el deuterio. Por debajo de 13 MJup, ya ni siquiera son capaces de quemar el deuterio, y por ello se toma este límite como la frontera entre enanas marrones y planetas. En el interior de un planeta, con una masa inferior a 13 veces la de Júpiter, no se puede dar ningún tipo de reacción de fusión nuclear [ver revisiones de Chabier y Baraffe (2000) y de Basri (2000)].

Las enanas marrones se encuentran tanto flotando libremente como orbitando alrededor de estrellas. También las hay binarias, con discos de acreción, con emisiones de rayos X, y se distribuyen igual que las estrellas en el disco galáctico... Se puede decir que las enanas marrones son “mini-estrellas”, salvo por una diferencia fundamental: las enanas marrones no entran nunca en la secuencia principal. Desde el momento en que se forman, se van enfriando y contrayendo paulatinamente, apagándose. El tamaño de las enanas marrones más viejas, poco dependiente de la masa, es de aproximadamente 0,9 veces el radio de Júpiter (que a su vez es alrededor de un décimo del solar). Sin embargo, la temperatura efectiva disminuye y disminuye hasta que se hacen prácticamente invisibles. La enana marrón más fría conocida es GJ 570D: unos 750° K (Burgasser et al., 2000). Compárese con los 5770° K del Sol, los 2600-2800° K de las estrellas más frías o los 300° K de la Tierra.

Está claro que será más fácil detectar enanas marrones o planetas aislados cuando estos aún son relativamente calientes y están en la fase de contracción. Es por ello que gran parte de las enanas marrones y todos los planetas aislados se han detectado en cúmulos estelares jóvenes, en ricos criaderos de unos pocos millones de años en los que las estrellas acaban de nacer. Los primeros objetos con masas por debajo de 13 MJup se detectaron en Orión en el año 2000 por Lucas y Roche y por Zapatero Osorio y colaboradores, en el Trapecio y en el cúmulo estelar de  $\sigma$  Orionis, respectivamente. Su descubrimiento se basó en el método más utilizado para detectar enanas marrones: los diagramas color-magnitud. En un diagrama color-magnitud, el color nos da una idea de la temperatura, mientras que la magnitud lo da de la luminosidad. Un objeto es, básicamente, más rojo cuanto más frío.

Si los objetos están situados a la misma distancia, p. e., en un cúmulo estelar, los objetos más fríos también serán los más débiles. En las búsquedas fotométricas (imágenes profundas tomadas con filtros en la parte más roja del espectro óptico o en el infrarrojo cercano), los objetos que pertenecen a un cúmulo se colocan en una región exclusiva del diagra-

ma color-magnitud, lo que permite diferenciarlos de los objetos de fondo o más cercanos. Luego debe venir la confirmación espectroscópica, en la que por la detección de bandas moleculares que sólo se pueden formar a muy bajas temperaturas se demuestra la pertenencia al cúmulo. Los objetos más rojos y más débiles son los candidatos favoritos a planetas aislados dentro del cúmulo. Y son “aislados” porque las estrellas del cúmulo más cercanas suelen estar a unas 20000-50000 UA. Lo último es la determinación de la masa, que se calcula a partir del ajuste a modelos teóricos en el diagrama color-magnitud. La indeterminación en la masa proviene, en su mayor parte, de la calidad de los modelos y la indeterminación en el conocimiento de la edad del cúmulo. El récord de objeto más ligero descubierto directamente fuera del Sistema Solar lo posee S Ori 71, con una masa de entre 2 y 8 MJup, siendo 3 MJup la masa más probable (Zapatero Osorio et al., 2003).

Estos objetos han recibido multitud de nombres, no traducidos aún al castellano: *free-floating planets*, *isolated planetary-mass objects*, *sub-brown dwarfs*, *cluster planets*... Como quiera que se llamen, aún no entendemos cómo se forman: ¿Son una extensión de la formación de estrellas y enanas marrones hasta masas aún más pequeñas (es decir, se forman aislados como las estrellas) o son planetas expulsados de sus protosistemas (o sea, se forman en discos como los planetas)?

## ¿UNA PLANETOLOGÍA COMPARADA?

El método de velocidad radial seguirá ofreciéndonos sistemas con planetas jovianos cada vez más ligeros y más separados de sus estrellas. Pero para observar estrellas cada vez más débiles, habrá que utilizar telescopios más grandes, y será más difícil encontrar “el más ligero” o “el más alejado”. El método de los tránsitos prácticamente acaba de nacer, y necesitará misiones espaciales para llegar a su infancia. La verdad es que va a tener una infancia difícil, ya que la misión *Eddington* de la Agencia Espacial Europea ha sido definitivamente cancelada. Ya sólo nos queda, hasta finales de esta década, las misiones COROT, de la agencia espacial francesa, y *Kepler*, de la estadounidense. Con alguna de estas misiones se tiene la esperanza de detectar el primer planeta de tipo terrestre en torno a una estrella de la secuencia principal.

La astrometría desde el espacio, con las misiones GAIA y *Space Interferometer Mission*, son aún más prometedoras, ya que se espera detectar con ellas miles, si no decenas de miles, de planetas gigantes. Desde tierra también se intentará buscarlos, utilizando, por ejemplo, el futuro telescopio californiano de 30 m, o el de 50 m europeo. La óptica adaptativa multiconjugada es la técnica a desarrollar para descubrir planetas como la Tierra alrededor de otras estrellas. Un poco más fácil lo tendrá, quizás, la fusión de los dos proyectos espaciales para obtener imágenes de planetas telúricos desde el espacio: *Terrestrial Planet Finder* y *Darwin*, cuya órbita más allá del cinturón de asteroides lo alejará de la luz zodiacal que in-

terferiría con sus sensibles instrumentos. Y finalmente, hacia 2030, tal vez coincidiendo con la llegada del hombre a Marte, el *Terrestrial Planet Imager* tomará, por fin, la primera imagen de un planeta terrestre, y también su espectro, en el que, quizá, descubra la presencia de vapor de agua y ozono...

Pero, ¿tendremos realmente que esperar a 2030 para que se detecte el primer planeta terrestre?. Tal vez no: la Astrofísica siempre nos da sorpresas inesperadas, como pruebas espectrales de planetas engullidos por sus estrellas; o planetas de tipo terrestre que orbitan, como grandes lunas, alrededor de los planetas gigantes que detectamos con la tecnología actual, alguno de los cuales se encuentra en la zona de habitabilidad en torno a sus estrellas; o planetas tan pequeños como Ganimedes girando alrededor de enanas marrones y detectados por el método de los tránsitos; o algún golpe de suerte en los programas rutinarios de monitorización fotométrica...

Hay miles de planetas inimaginados esperando ahí fuera. Sólo tenemos que encontrarlos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Basri, G. . (2000). *Observations of Brown Dwarfs*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 38, 485.
- Boss A. P. (1995). *Proximity of Jupiter-like planets to low-mass stars*. Science, 267, 360.
- Brown T. M., Charbonneau D., Gilliland R. L., Noyes R. W. y Burrows A. (2001). *Hubble Space Telescope time-series photometry of the transiting planet of HD 209458*. ApJ (Astrophysical Journal) 552, 699.
- Burgasser A. J., Kirkpatrick J. D., Cutri, R. M. et al. (2000). *Discovery of a brown dwarf companion to Gliese 570ABC: A 2mass T dwarf significantly cooler than Gliese 229B*. ApJ, 531, L57.
- Butler P. R. y Marcy G. W. (1996). *A planet orbiting 47 Ursae Majoris*. ApJ, 464, L153.
- Chabrier G. y Baraffe I. (2000). *Theory of low-mass stars and substellar objects*. ARA&A (Annual Review of Astronomy and Astrophysics), 38, 337.
- Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W. y Mayor M. (2000). *Detection of planetary transits across a Sun-like star*. ApJ, 529, L45.
- Charbonneau D., Brown T. M., Noyes R. W. y Gilliland R. L. (2002). *Detection of an extrasolar planet atmosphere*. ApJ, 568, 377.
- Lissauer J. J. (1993). *Planet formation*. ARA&A, 31, 129.
- Lubow, S. H., Seibert, M. & Artymowicz, P. (1999). *Disk Accretion onto High-Mass Planets*. Astrophysical Journal, 526, 100.
- Lucas P. W. y Roche P. F. (2000). *A population of very young brown dwarfs and free-floating planets in Orion*. MNRAS (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society), 314, 858.
- Marcy G. W. y Butler P. R. (1996). *A planetary companion to 70 Virginis*. ApJ, 454, L147.
- Marcy G. W. y Butler P. R. (1998). *Detection of extra-solar giant planets*. ARA&A, 36, 57.
- Mayor M. y Queloz D. (1995). *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. Nature, 378, 355.
- Perryman, M. A. C. (2000). *Extra-solar planets*. RPPH (Rep. Prog. Phys.), 63, 1209.
- Rebolo R., Zapatero Osorio M. R. y Martín E. L. (1995). *Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster*. Nature, 377, 129.
- Santos N. C., Israelian G. y Mayor M. (2004). *Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars. Exploring the probability of planet formation*. A&A (Astronomy and Astrophysics), 415, 1153.
- Udalski A., Paczynski B., Zebrun, K. et al. (2002). *The optical gravitational lensing experiment. Search for planetary and low-luminosity object transits in the galactic disk. Results of 2001 campaign*. AcA (Acta Astronomica), 52, 1.
- Vidal-Madjar A., Désert J.-M., Lecavelier des Etangs, A. et al. (2004). *Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b*. ApJ, 604, L69.
- Wetherill G. W. (1990). *Formation of the Earth*. AREPS (Annual review of Earth and planetary sciences), 18, 205.
- Wolszczan A. y Frail D. A. (1992). *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*. Nature, 355, 145.
- Zapatero Osorio M. R., Béjar V. J. S., Martín E. L. et al. (2000). *Discovery of young, isolated planetary mass objects in the ? Orionis star cluster*. Science, 290, 103.
- Zapatero Osorio M. R., Béjar V. J. S., Martín E. L. et al. (2003). *A methane, isolated, planetary-mass object in Orion*. ApJ, 578, 536. ■