

Exoplanetas

Rafael Rebolo López

Se presenta una revisión de las características de los astros de masas planetarias que se han detectado fuera del Sistema Solar y de sus posibles mecanismos de formación.

1. Introducción

Los planetas no tienen suficiente masa para alcanzar en sus interiores las temperaturas necesarias para generar energía por reacciones nucleares como hacen las estrellas. Júpiter, el planeta de mayor tamaño del Sistema Solar, tiene aproximadamente 1000 veces menos masa que el Sol ($M_{\text{sol}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$) y es unas 320 veces más masivo que la Tierra. Los astros con masas entre la de Júpiter y la Tierra emiten entre 10^6 y 10^{10} veces menos radiación que las estrellas más pequeñas, lo que hace difícil su detección directa. En la última década, tras siglos de especulación sobre la existencia de este tipo de objetos fuera del Sistema Solar, se presentaron pruebas concluyentes de su presencia alrededor de estrellas de neutrones y de estrellas de tipo solar y también se mostró su existencia desligados gravitatoriamente de estrellas.

En los dos primeros casos, las evidencias encontradas son de tipo indirecto y se basan en la atracción gravitatoria que ejercen los planetas sobre las estrellas en torno a las que giran. Esto se traduce en el movimiento periódico de la estrella alrededor del centro de masas común estrella-planeta y produce al menos tres observables: cambios en la velocidad radial de la estrella, cambios en la posición angular de la estrella con respecto a un sistema de referencia lejano y cambios en el tiempo de llegada de una señal periódica de referencia. En el caso de los cuerpos de masa planetaria sin ligadura gravitatoria a estrellas la detección se ha realizado de manera directa y se dispone tanto de imágenes como de espectros que han permitido determinar sus propiedades físicas básicas.

2. De las estrellas a los planetas

La mínima masa de una estrella de composición química solar es $0.075 M_{\text{sol}}$. Recientes búsquedas de objetos de muy baja luminosidad han mostrado también la existencia de objetos con masas intermedias entre las estrellas más pequeñas y Júpiter. Son las llamadas enanas marrones, que se definen como astros incapaces de producir en sus interiores la fusión estable de hidrógeno pero con suficiente masa para producir reacciones de destrucción de deuterio. El rango de masas asociado depende ligeramente de la composición química, para el caso de composición solar resulta ser



Foto del planeta Júpiter cedida por la NASA/JPL

$0.075 - 0.013 M_{\text{sol}}$. Las enanas marrones pueden considerarse un eslabón natural entre las estrellas y los planetas gigantes. Tienen el tamaño de Júpiter pero son entre 75 y 13 veces más densas que este planeta. La frontera entre las enanas marrones menos masivas y los planetas gigantes no está bien definida conceptualmente y mucho menos de forma empírica. Aquí se adoptará arbitrariamente esta frontera en 10 veces la masa de Júpiter ($1 M_J \cong 9.5 \times 10^{-4} M_{\text{sol}}$). Para designar los cuerpos cuyas masas estén comprendidas entre 10 y $0.001 M_J$ se empleará el término planeta sin tener en consideración el proceso que los haya originado, ni si están sujetos a la

atracción gravitatoria de una estrella.

Desde que nacen, las enanas marrones se enfrían progresivamente y transcurrido suficiente tiempo pueden llegar a alcanzar temperaturas superficiales muy bajas, incluso inferiores a la de la superficie de la Tierra. Su estudio permite contrastar la validez de los modelos propuestos para las atmósferas e interiores de los planetas. Los primeros ejemplares de enanas marrones fueron descubiertos en 1995 en el cúmulo estelar de las Pléyades [1] y en órbita alrededor de una estrella de la vecindad solar [2]. Hoy ya se conocen cientos en regiones de formación estelar y en la vecindad del Sol. Las funciones de masa de algunas regiones de activa formación estelar sugieren [3] que podrían incluso ser más numerosas que las estrellas. Se estima que habría miles de millones en la Galaxia.

3. La detección de cuerpos de masas planetarias fuera del Sistema Solar

La primera detección de objetos con masas similares a la de los planetas del Sistema Solar [4] fue lograda al seguir la evolución temporal del púlsar de 6.2 milisegundos PSR 1257+12. El estudio de los pulsos emitidos por esta estrella de neutrones reveló la presencia de al menos dos planetas, cada uno con una masa unas tres veces superior a la de la Tierra. Las estrellas de neutrones son resultado de procesos de extraordinaria violencia. Pueden originarse en las explosiones de estrellas masivas, denominadas supernovas, en las que se liberan energías superiores a 10^{50} erg y se eyectan cantidades de materia superiores a la que contiene el Sol. Resulta difícil imaginar la supervivencia de los planetas en

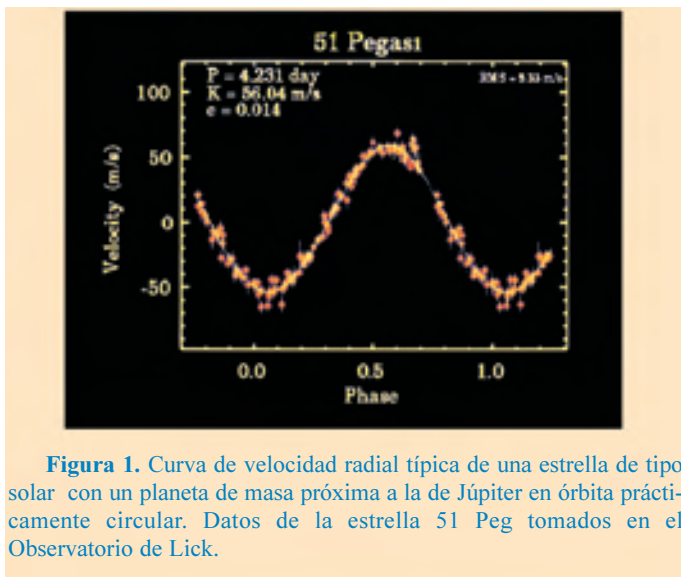


Figura 1. Curva de velocidad radial típica de una estrella de tipo solar con un planeta de masa próxima a la de Júpiter en órbita prácticamente circular. Datos de la estrella 51 Peg tomados en el Observatorio de Lick.

estos acontecimientos. No se descarta que el origen de los detectados alrededor de algunas estrellas de neutrones resida en la condensación de fragmentos de la materia expulsada en la explosión de las estrellas progenitoras y que por tanto, aunque parecidos en masa, tengan una composición y estructura muy distintos a la Tierra.

El primer planeta gigante fue detectado alrededor de la estrella 51 de Pegaso [5], una estrella de tipo solar. La obtención de series temporales de espectros de muy alta resolución permitió medir el desplazamiento periódico de la longitud de onda de las líneas formadas en la atmósfera de la estrella. Esto fue interpretado como el efecto Doppler asociado con el cambio de la velocidad de la estrella proyectada sobre la línea de visión, consecuencia de la atracción gravitatoria de un objeto compañero que era indetectable por medios ópticos. Las observaciones mostraron una amplitud de la curva de velocidad radial de unos 59 m/s y un período de 4.23 días. A partir de la masa de la estrella primaria, se estimó la masa del objeto compañero en $0.47/\sin i M_J$, siendo i el ángulo entre la línea de visión y la normal al plano orbital. Dado que este ángulo es en general desconocido, la técnica Doppler proporciona estrictamente límites inferiores a las masas de los planetas. Actualmente se realizan programas sistemáticos de observación con esta técnica sobre más de 1000 estrellas de tipo solar lográndose precisiones de hasta 1 m/s, cercanas a los límites que permiten los movimientos turbulentos de la materia en la atmósfera de las estrellas.

Se sabe que al menos un 7% de las estrellas de tipo solar tienen planetas de tipo joviano en órbitas con radio inferior a la distancia entre Júpiter y el Sol (~ 5 veces la distancia Tierra-Sol). La detección Doppler de planetas en órbitas de mayor radio (mayor período) exige secuencias de medidas de alta precisión prolongadas durante decenas de años que todavía no se han podido realizar.

4. Propiedades de los exoplanetas y de sus estrellas

A mediados de 2003 se conocen, gracias a la técnica Doppler, 94 estrellas de tipo solar que tienen planetas de tipo joviano [6]. En 12 de estas estrellas hay más de un planeta



Figura 2. Imágenes de discos protoplanetarios obtenidas por el telescopio espacial Hubble alrededor de estrellas jóvenes en la nebulosa de Orión.

detectado, por tanto, también se conocen otros sistemas planetarios. La mayoría de los planetas detectados tienen masas similares a Júpiter, pero hay algunos casos de planetas bastante más masivos. Aunque la técnica es menos sensible a planetas de baja masa también se ha logrado detectar planetas con la masa de Saturno ($m \sim 0.3 M_J$). Las principales características de los exoplanetas, término frecuentemente utilizado para referirse a estos objetos, se resumen a continuación:

Aproximadamente un tercio de los planetas jovianos tienen órbitas más internas que la de Mercurio (distancia media al Sol de 50×10^6 km, período orbital de 88 días).

Son mucho más frecuentes los planetas de masa similar o inferior a Júpiter que los más masivos. La distribución de masas de los exoplanetas se puede describir por una función $dN/dm \propto m^{-1}$ [7] aunque todavía hay pocos ejemplos de planetas masivos ($m > 5 M_J$) para poder concluir que ésta es una función válida en todo el rango de masas.

Los planetas más próximos a sus estrellas, período orbital $P < 7$ días, tienen sistemáticamente órbitas circulares, probablemente a consecuencia de los efectos de marea. Las excentricidades de las órbitas de mayor período toman cualquier valor entre 0 y 1. La mayor parte de los planetas tienen excentricidades muy altas cuando se comparan con las de los planetas gaseosos del Sistema Solar. La distribución de excentricidades es, sin embargo, similar a la de las estrellas binarias.

Sólo se ha podido determinar con precisión el radio de un exoplaneta: la inclinación de la órbita del planeta alrededor de la estrella HD 209458 es tal que éste eclipsa periódicamente la estrella [8], lo que ha permitido establecer el radio del planeta con notable precisión $R_p = 1.347 \pm 0.060 R_J$ ($1 R_J$ es el radio de Júpiter, 7×10^4 km), determinar la inclinación de la órbita y, por tanto, la masa ($\sim 0.69 M_J$). La distancia entre el planeta y la estrella es sólo unas 10 veces el radio de ésta, así que recibe una intensa radiación estelar que debe calentar y expandir sus capas más externas.

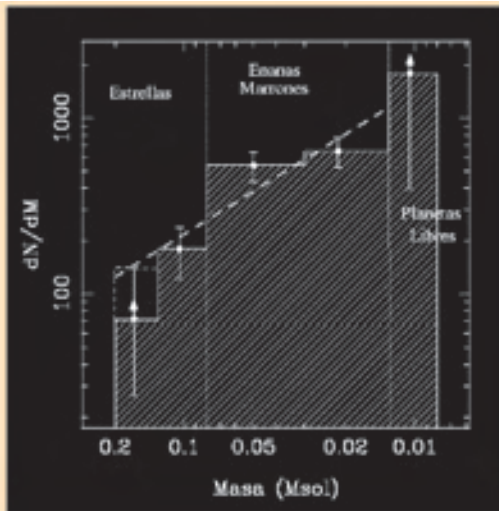


Figura 3. Espectro de masas de los objetos en el cúmulo estelar σ de Orión. (Adaptada de la ref. [3])

Las metalicidades de las estrellas que tienen planetas presentan una distribución atípica respecto a la mayoría de las estrellas de la vecindad del Sol. En general, las estrellas con planetas tienen contenidos de metales en sus atmósferas un factor 2 más alto que el promedio de las estrellas de la vecindad solar [9]. Algunas incluso tienen un factor 3. La explicación a este fenómeno puede residir en que las nebulosas de más alto contenido en metales favorecen el mecanismo de formación de planetas o, alternatively, que las estrellas han ganado esa alta metalicidad una vez formadas mediante la acreción de planetas rocosos o material planetario que se espera tenga una mayor proporción de metales pesados que el gas de la estrella. El test espectroscópico del isótopo ^6Li permite distinguir fenómenos de acreción en estrellas con masas superiores a la del Sol [10].

5. Planetas sin estrellas

En exploraciones fotométricas recientes de muy alta sensibilidad del cúmulo estelar conocido como σ de Orión se han identificado dos decenas de cuerpos con masas entre 10 y 3 veces la de Júpiter [11]. Por sus masas, los objetos detectados se encuentran en el rango de lo que llamamos planetas, pero parecen estar demasiado separados de las estrellas del entorno para estar ligados gravitatoriamente a ellas. El “planeta aislado” menos masivo descubierto hasta la fecha es S Ori 70 [12]. Fue observado por primera vez con el telescopio WHT de La Palma y es el objeto menos masivo externo al Sistema Solar del que se dispone imágenes y espectroscopía. Estos resultados sugieren una suave extrapolación de la función de masas de enanas marrones $dN/dm \propto m^{-0.8}$ [3] al dominio de masas planetarias. La contribución de los “planetas solitarios” en el último intervalo del histograma de la figura 3 debe ser considerada un límite inferior porque las búsquedas realizadas no alcanzan la sensibilidad requerida para detectar todos los objetos que pudieran existir en ese rango de masas.

Determinar el comportamiento de la función de masas en el rango $10^{-1} M_J$ en diversas regiones de formación estelar es crucial para entender cómo se originan estos objetos. Cabe

esperar que el índice espectral de masas dependa de las condiciones físicas de cada región. La presencia de estrellas muy masivas en regiones de formación estelar parece favorecer la formación de enanas marrones, posiblemente porque su intensa radiación de alta energía causa la ionización del gas y esto puede ser determinante en detener o impedir el proceso de acreción. Sería esperable que las estrellas masivas también favoreciesen la formación de planetas aislados. Por el momento, sabemos de la existencia de planetas aislados en varias regiones de Orión pero los únicos datos fiables de la función de masas de estos “planetas solitarios” son los obtenidos en el cúmulo σ de Orión. Es de destacar que esta función de masas tiene un índice espectral que dentro de las barras de error (del 20%) es consistente con el de la función de masas de los planetas detectados usando técnicas Doppler. Cabe preguntarse si ambos tipos de objetos se originan en un mismo proceso, y en qué medida ese proceso está condicionado por la propia formación estelar.

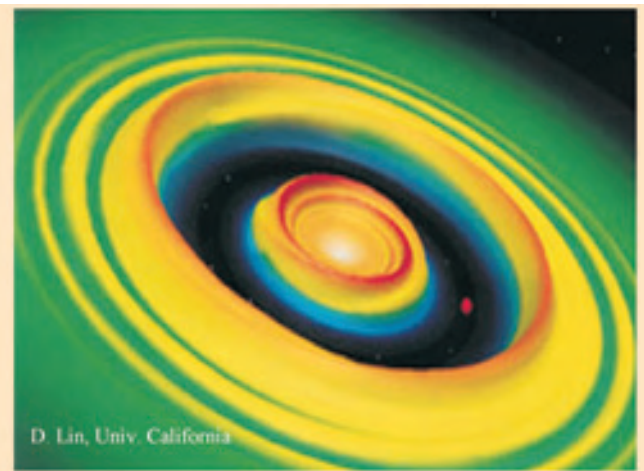


Figura 4. Simulación de la formación de un sistema planetario.

6. Formación de estrellas, enanas marrones y planetas

La formación de los planetas del Sistema Solar ha sido objeto de discusión desde hace siglos. Recordemos, por ejemplo, a Laplace o Kant y sus ideas sobre la nebulosa pre-solar. Las bajas excentricidades e inclinaciones de las órbitas de los planetas en el Sistema Solar apoyan la idea de que fueron formados a partir de un disco de gas. Las teorías han evolucionado considerablemente y existen modelos con capacidad de predicción que pueden ser contrastados con la creciente información disponible. Planetas y estrellas son el producto final del proceso de fragmentación de las nubes moleculares galácticas, así que no se puede entender el origen de los planetas si no es en el marco más general de la formación estelar.

Fragmentación de nubes moleculares

La mayor parte de las estrellas de tipo solar nacen en los *cores* de nubes moleculares, regiones de alta densidad de gas donde se dan las condiciones para la fragmentación de la materia interestelar en masas que por efecto de la gravedad colapsan y producen estrellas. Se han observado fragmentos

de nubes con masas comprendidas entre unas decenas de veces la masa del Sol y apenas una décima parte de ésta, es decir en todo el rango de masas de las estrellas. Debido a limitaciones técnicas en los instrumentos disponibles (falta de resolución espacial y sensibilidad) no se han observado todavía fragmentos más pequeños en los *cores* de nubes moleculares, pero es muy probable que existan dada la abundancia de enanas marrones en regiones de formación estelar.

Como las estrellas, las enanas marrones son probablemente resultado de procesos de fragmentación y colapso de nubes moleculares. Las más recientes simulaciones numéricas [13] realizadas con suficiente resolución para seguir la formación de fragmentos con masas de hasta $5 M_J$ indican que en el mismo proceso de formación de una estrella de tipo solar se originan varios fragmentos de menor masa que por interacciones dinámicas serían expulsados de los *cores*. Estos fragmentos ya no podrían acretar materia del *core*. Las simulaciones muestran que estos pequeños fragmentos colapsarían en objetos con masas en todo el rango de las enanas marrones con una función de masas que reproduce bien la medida en regiones de formación estelar.

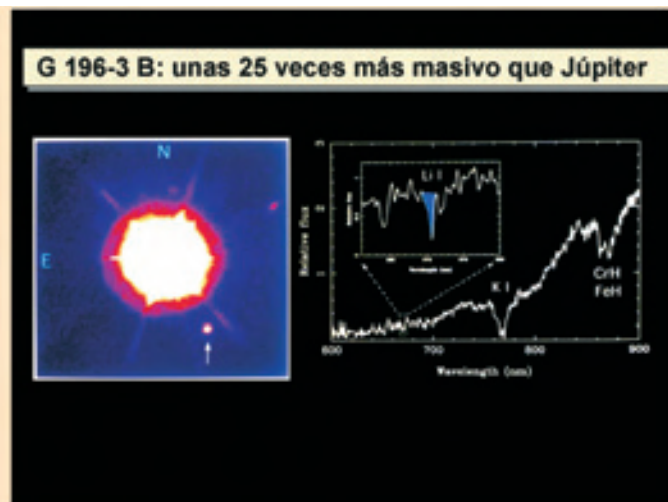


Figura 5. G 196-3B (marcado con una flecha) es uno de los objetos de menor masa detectado mediante imágenes alrededor de una estrella. (Adaptada de ref. [21])

Discos protoplanetarios

Es muy frecuente encontrar discos de material gaseoso y polvo (silicatos y partículas carbonáceas de carácter microscópico) alrededor de estrellas recién formadas. Los tamaños de estos discos varían entre 10 y 1000 unidades astronómicas y sus masas entre 0.01 y $0.1 M_{\text{sol}}$ [14]. En estrellas con edades inferiores a 10^6 años la frecuencia de discos es superior al 80%, lo que indica que los discos son también un resultado natural del proceso de fragmentación y colapso de nubes moleculares. Sin embargo, sólo un 10% de las estrellas de $5 - 6 \times 10^6$ años muestran discos, sugiriendo que la mayor parte de ellos son disipados en un tiempo inferior. Desde hace décadas se especula que en estos discos podría tener lugar la formación de planetas, bien mediante inestabilidades gravitatorias que originan pequeñas subcondensaciones, bien mediante acreción de pequeñas partículas

que dan lugar a un núcleo sólido que después captura gas. Mientras que el primer mecanismo puede formar planetas en escalas de tiempo más cortas que la vida media de los discos, el segundo parece requerir tiempos comparables o mayores y podría ser menos efectivo. La formación de planetas gigantes en los discos puede ser detectada directamente pues se espera que la interacción del planeta con el gas del disco origine huecos en la distribución de éste que serían observables.

Mecanismos de formación de objetos con masas planetarias.

Esencialmente hay tres mecanismos que pueden originar objetos en el rango de masas de los planetas [15]:

- a) La fragmentación de los *cores* de nubes moleculares podría extenderse hasta la masa de Júpiter. Cuando comienza el colapso del *core* de una nube molecular, la energía gravitatoria es liberada fácilmente al exterior, y la nube de gas es aproximadamente isoterma, la presión p , varía con la densidad según un polítopo $p \propto \rho^n$ donde $n \sim 1$. El límite de opacidad para la fragmentación tiene lugar cuando el ritmo de liberación de energía por colapso es mayor que el ritmo al que se puede enfriar el gas. Entonces se calienta, crece la masa de Jeans y se puede formar un fragmento de materia mantenido por presión que puede contener varias veces la masa de Júpiter y un radio de unas 5 veces la distancia Tierra-Sol. Cabe esperar que el fragmento continúe capturando materia hasta dar lugar a estrellas o a enanas marrones. Pero si en el curso de su evolución sufre interacciones dinámicas con otros fragmentos, las simulaciones indican que puede ser expulsado del *core* perdiendo su acceso a la reserva de gas y por tanto, perdiendo la posibilidad de incrementar su masa. El resultado sería un objeto con pocas veces la masa de Júpiter. Las primeras estimaciones de la mínima masa de los astros que se forman por fragmentación de nubes daban valores próximos a $10 M_J$ [16]. Recientes estudios parecen indicar que este límite se puede extender hasta la masa de Júpiter [17].
- b) Las inestabilidades gravitacionales en discos de gas y polvo que rodean a las estrellas jóvenes pueden producir la fragmentación en subcondensaciones [18]. Recientes simulaciones de discos masivos ($0.1 M_{\text{sol}}$) muestran [19] que es posible la formación de fragmentos de $5 M_J$ a distancias de 10 AU, donde la temperatura es suficientemente baja. Estos fragmentos, inicialmente de gran tamaño ($10^7 - 10^8$ km) y temperaturas superficiales muy frías (30-40 K) colapsan hasta que alcanzan equilibrio hidrostático cuando tienen un tamaño comparable a Júpiter. Este proceso es rápido comparado con las vidas medias de los discos y puede dar lugar a planetas masivos. No es probable que estos astros, a diferencia de los formados por acreción, tengan un núcleo sólido.
- c) Los granos microscópicos de polvo (silicatos, partículas carbonáceas, etc) de tamaños entre $0.1-10 \mu\text{m}$ que inicialmente están presentes en la nebulosa protoestelar se depositan por procesos de sedimentación dando lugar a una fina capa de material sólido en el plano del disco protoplanetario. Este material es inestable gravitatoriamente y en unos miles de años puede formar fragmentos que

colapsan y producir planetésimos [20] objetos de tamaños entre 1 y 100 km. Los *cores* de los planetas se formarían por colisiones inelásticas de planetésimos. Estos *cores* posteriormente podrían capturar gas del disco hasta alcanzar las masas de los planetas terrestres y de los planetas gigantes. Aunque es dudoso que pudiesen adquirir las masas de algunas enanas marrones que se conocen ligadas gravitatoriamente a estrellas [21].

El mecanismo responsable de la formación de los astros de masas planetarias no está establecido de manera definitiva. El basado en procesos de acreción parece ser el único que daría lugar a planetas terrestres y por tanto es el favorecido para explicar el Sistema Solar. La formación de objetos con masa similar a Júpiter puede tener lugar por cualquiera de los tres mecanismos descritos, pero se desconoce si alguno es dominante.

Tanto la similitud entre la función de masas en el rango 1–15 M_J para objetos alrededor de estrellas y para objetos libres en regiones de formación estelar, como las altas excentricidades de las órbitas de muchos exoplanetas de largo período favorecen un mecanismo de formación asociado a inestabilidades gravitatorias en discos protoplanetarios seguidas de importantes interacciones dinámicas que conducirían a una expulsión de la mayor parte de los planetas masivos formados y también a la migración hacia regiones internas de aquellos que permaneciesen ligados gravitatoriamente a sus estrellas. Las simulaciones numéricas de estos procesos asignan, al menos hasta las masas que han considerado ($m > 5 M_J$), un papel esencial a las interacciones dinámicas entre los múltiples cuerpos de masa planetaria que se formarían alrededor de cada protoestrella. De ser así, cabe esperar que el espacio interestelar esté poblado por un inmenso número de gélidos planetas gigantes, al menos tantos como estrellas, que vagarían libremente entre ellas a la espera de ser descubiertos. Su bajísima luminosidad supone un auténtico desafío para los actuales medios de observación astronómica. La detección de los más cercanos precisa exploraciones de grandes regiones de cielo en el infrarrojo medio con suficiente resolución espacial y muy alta sensibilidad.

7. Perspectivas

Son muchos los instrumentos y técnicas que pueden ser utilizadas en la búsqueda de planetas. Los mayores telescopios del mundo cuentan con instrumentos de óptica adaptativa y están desarrollando técnicas interferométricas (Keck y VLT) capaces de incrementar la resolución espacial de nuestras imágenes y corregir la distorsión que nuestra atmósfera introduce en la propagación de los frentes onda. Ambas estrategias son esenciales para alcanzar la detección de objetos de muy baja luminosidad cercanos a estrellas.

En un corto plazo, con los instrumentos de primera luz del Gran Telescopio "Canarias" de 10m, también en nuestro país será factible la detección directa de objetos de masas similares a la de Júpiter en diversos contextos astrofísicos. La cámara para el infrarrojo medio, CANARICAM, permitirá detectar y caracterizar estos objetos alrededor de estrellas con tipos espectrales F-M y alrededor de enanas marrones en un dominio de radios orbitales complementario al de las actuales búsquedas basadas en medidas precisas de velocidad radial. Será uno de los pocos instrumentos en el mundo que tiene esta posibilidad. Los modos de imagen y espec-

troscopía del instrumento OSIRIS permitirán el estudio de los proto-Júpiters en regiones de formación estelar con baja extinción. Ambos tipos de investigaciones son cruciales para nuestra comprensión de los procesos que dan lugar a los planetas gigantes.

Los satélites de la Agencia Espacial Europea Eddington, Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA), e Infrared Space Interferometry Mission (IRSI) y los de la NASA Space Interferometry Mission (SIM) y Terrestrial Planet Finder (TPF) junto a los futuros telescopios gigantes como el EURO50 o OWL 100m permitirán la detección directa de planetas terrestres y la elaboración de un censo de los sistemas planetarios en la vecindad del Sol a finales de esta década, o más probablemente durante la próxima. Estos múltiples esfuerzos son esenciales si queremos avanzar en nuestra comprensión de los procesos que originan a los planetas y tratar de encontrar nichos de vida fuera del Sistema Solar.

Referencias

- [1] R. REBOLO, M.R. ZAPATERO-OSORIO, E.L. MARTÍN, *Nature* **377**, 129 (1995)
- [2] T. NAKAJIMA *et al.*, *Nature* **378**, 463 (1995).
- [3] V.J.S. BÉJAR, E.L. MARTÍN, M.R. ZAPATERO-OSORIO, R. REBOLO, D. BARRADO Y NAVASCUÉS, C.A.L. BAILER-JONES, R. MUNDT, I. BARAFFE, C. CHABRIER AND F. ALLARD, *Astrophys. J.* **556**, 830 (2001).
- [4] A. WOLSZCZAN AND D.A. FRAIL, *Nature* **355**, 145 (1992).
- [5] M. MAYOR AND D. QUELOZ, *Nature* **378**, 463 (1995).
- [6] J. SCHNEIDER, "The Extrasolar Planets Encyclopaedia", <http://www.obspm.fr/encycl.html>
- [7] G.W. MARCY, R. P. BUTLER, *Pub. Astron. Soc. Pac.* **112**, 137 (2000).
- [8] D. CHARBONNEAU, T.M. BROWN, D.W. LATHAM AND M. MAYOR, *Astrophys. J.* **529**, L45 (2000).
- [9] N.C. SANTOS, G. ISRAELIAN AND M. MAYOR, *Astron. Astrophys.* **363**, 228 (2000); *ibid Astron. Astrophys.* **373**, 1019 (2001).
- [10] G. ISRAELIAN, N. SANTOS, M. MAYOR AND R. REBOLO, *Nature* **411**, 163 (2001) ; J.MONTALBÁN AND R. REBOLO, *Astron. Astrophys.* **386**, 1039 (2002).
- [11] M.R. ZAPATERO OSORIO, V.J.S. BÉJAR, E.L. MARTÍN, R. REBOLO, D. BARRADO Y NAVASCUÉS, C.A.L. BAILER-JONES AND R. MUNDT, *Science* **290**, 103 (2000).
- [12] M.R. ZAPATERO OSORIO, V.J.S. BÉJAR, E.L. MARTÍN, R. REBOLO, D. BARRADO Y NAVASCUÉS, R. Mundt, J. EISLÖFFEL AND J.A. CABALLERO, *Astrophys. J.* **578**, 536 (2002).
- [13] M.R. BATE, I.A. BONNELL, AND V.BROMM, *MNRAS* **332**, L65 (2002).
- [14] S.V.W. BECKWITH, A.I. SARGENT, R. CHINI AND R. GUSTEN, *Astron. J.* **99**, 924 (1990).
- [15] P. BODENHEIMER AND D.N.C. LIN, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **30**, 113 (2002).
- [16] C. LOW AND D. LYNDEN-BELL, *MNRAS* **176**, 367 (1976); M.J. REES, *MNRAS* **176**, 483 (1976).
- [17] A.P. BOSS, *Astrophys. J.* **551**, L167 (2001).
- [18] G.P. KUIPER, en *Astrophysics*, ed. J. Hynek McGraw-Hill, New York (1951); AGW CAMERON, *Moon and Planets* **18**, 5 (1978); A.P. BOSS, *Science* **276**, 1836 (1997).
- [19] A.P. BOSS, *Astrophys. J.* **536**, L101 (2000).
- [20] P. GOLDBREICH AND W.R. WARD, *Astrophys. J.* **183**, 1051 (1973).
- [21] R. REBOLO, M.R. ZAPATERO OSORIO, S. MADRUGA, V.J.S. BÉJAR, S.A. RIBAS, J. LICANDRO, *Science* **282**, 1309 (1998).

Rafael Rebolo López

Instituto de Astrofísica de Canarias y Consejo Superior de Investigaciones Científicas