

# ASTRONOMÍA



II Época N° 88 - octubre 06

[www.astronomia-e.com](http://www.astronomia-e.com)

España: 4,75 € / Portugal: 5,95 €

## PLANETODIVERSIDAD

Agustín Sánchez Lavega

**VIDA  
EXTRATERRESTRE**  
Roberto Aretxaga y  
Ricardo Campo

**PASEANDO ENTRE  
CONSTELACIONES:  
ANDRÓMEDA**  
Pedro Arranz y  
César González





# PLANETODIVE

Este artículo fue escrito meses antes del debate que tuvo lugar durante la segunda quincena de agosto en el seno de la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional en Praga, y en el que se adoptó la resolución que propone una nueva clasificación de los planetas del Sistema Solar. He preferido conservar la versión original del artículo sin introducir modificaciones a la luz de la nueva definición ya que se trata de una versión simplificada y adaptada de un artículo más técnico titulado «*Planetodiversity: The variety of planets and planetary systems in the Universe*» publicado con anterioridad a dicha resolución en la revista *Contemporary Physics* (Volumen 47, Número 3, páginas 157-165, mayo-junio 2006). La versión manuscrita de este último puede descargarse en formato pdf en la página web del Grupo de Ciencias Planetarias ([www.ajax.ehu.es](http://www.ajax.ehu.es)), buscando dentro de la lista de publicaciones y dentro de ésta, la de preprints.

*Con la introducción del término «planetodiversidad» el autor pretende mostrar en este artículo que la variedad y diversidad de planetas en el Universo, al igual que la de especies biológicas en nuestro planeta, es extremadamente rica y abundante («planetodiversidad física»), y que además, al igual que ésta, es evolutiva y emerge en una variedad de entornos («planetodiversidad» orbital).*

¿Quién no ha oído hablar de la biodiversidad? Con este término nos referimos a la variedad de especies biológicas del reino animal y vegetal que pueblan nuestro planeta. Más allá, en nuestro Universo, existe una variedad de astros que en su afán de clasificación el hombre ha ido introduciendo a lo largo del tiempo: estrellas, planetas, asteroides, galaxias, cuásares, púlsares..., cada una de ellas con sus propios grupos taxonómicos. Desde hace algún tiempo parecía que el «zoo astrofísico» había dado todo de sí, y que el crecimiento de «especies cósmicas» avanzaría muy lentamente. Pero a comienzos de los años noventa se produce una revolución en la Astronomía. Se descubren los primeros planetas extrasolares en dos entornos inesperados: alrededor de un púlsar en 1992 y cerca, muy cerca, de una estrella como el Sol, se encuentra en 1995 un gigante como Júpiter. Estos descubrimientos rompen con el paradigma de nuestro Sistema Solar, el único conocido hasta esas fechas, como arquetipo de sistema planetario. En los más de diez años transcurridos desde entonces, el descubrimiento e incluso la caracterización de algunos de estos planetas mediante diferentes técnicas de observación, ha sido continua. En el momento de escribir estas líneas son 204 los objetos candidatos con masa planetaria catalogados, y la tasa de descubrimientos se espera se dispare en los próximos años con la entrada en acción de varias misiones espaciales en proyecto.

Todo esto nos lleva a plantearnos una pregunta básica: ¿Cómo son y qué aspecto tendrán esos planetas? Existe un problema para responder a esta

pregunta y es que la clasificación de los planetas es más compleja que la de las estrellas, por ejemplo, en donde con sólo dos parámetros (masa y luminosidad) podemos establecer los tipos estelares y su evolución (el conocido diagrama de Hertzsprung-Russell). Por contra cada planeta es un producto único resultante de las condiciones iniciales de su formación y de su historia evolutiva, orbital y física en el sistema planetario en el que nació. Sin embargo, de la variedad de planetas y satélites mayores existentes en el Sistema Solar, y de los avances en el conocimiento de la estructura de la materia a las altas presiones y temperaturas que encontramos en los interiores planetarios, podemos inferir vías para la identificación y clasificación de los diferentes tipos de planetas. Por otra parte, la observación de planetas en ambientes «exóticos», en órbitas «inesperadas», o incluso aislados en el espacio, nos lleva a plantearnos una segunda cuestión. ¿Cuántos tipos de configuraciones de órbitas planetarias existen? ¿Qué entendemos por planeta? El reciente descubrimiento del objeto UB<sub>313</sub> en la misma región que la de Plutón, con masa superior a éste, y ambos formando parte de una gran familia de objetos transeptunianos, ha reabierto el debate acerca de la definición de lo que entendemos por planeta (véase la nota inicial a este artículo).

Con la introducción del término «planetodiversidad» pretendo mostrar en este artículo que la variedad y diversidad de planetas en el Universo, al igual que la de especies biológicas en nuestro planeta, es extremadamente rica y abundante («planetodiversidad física»), y que además, al igual que esta, es evolutiva

**Agustín Sánchez Lavega,**  
uno de los más relevantes  
astrofísicos planetarios de  
nuestro país, pertenece  
al Grupo de Ciencias Pla-  
netarias de la Universidad  
del País Vasco.



# UNIVERSIDAD

AGUSTÍN SÁNCHEZ LAVEGA



*El mayor planeta del Sistema Solar, Júpiter, visto por la sonda Cassini el 29 de diciembre de 2000, a apenas diez millones de kilómetros de distancia. (NASA/JPL/SSI)*

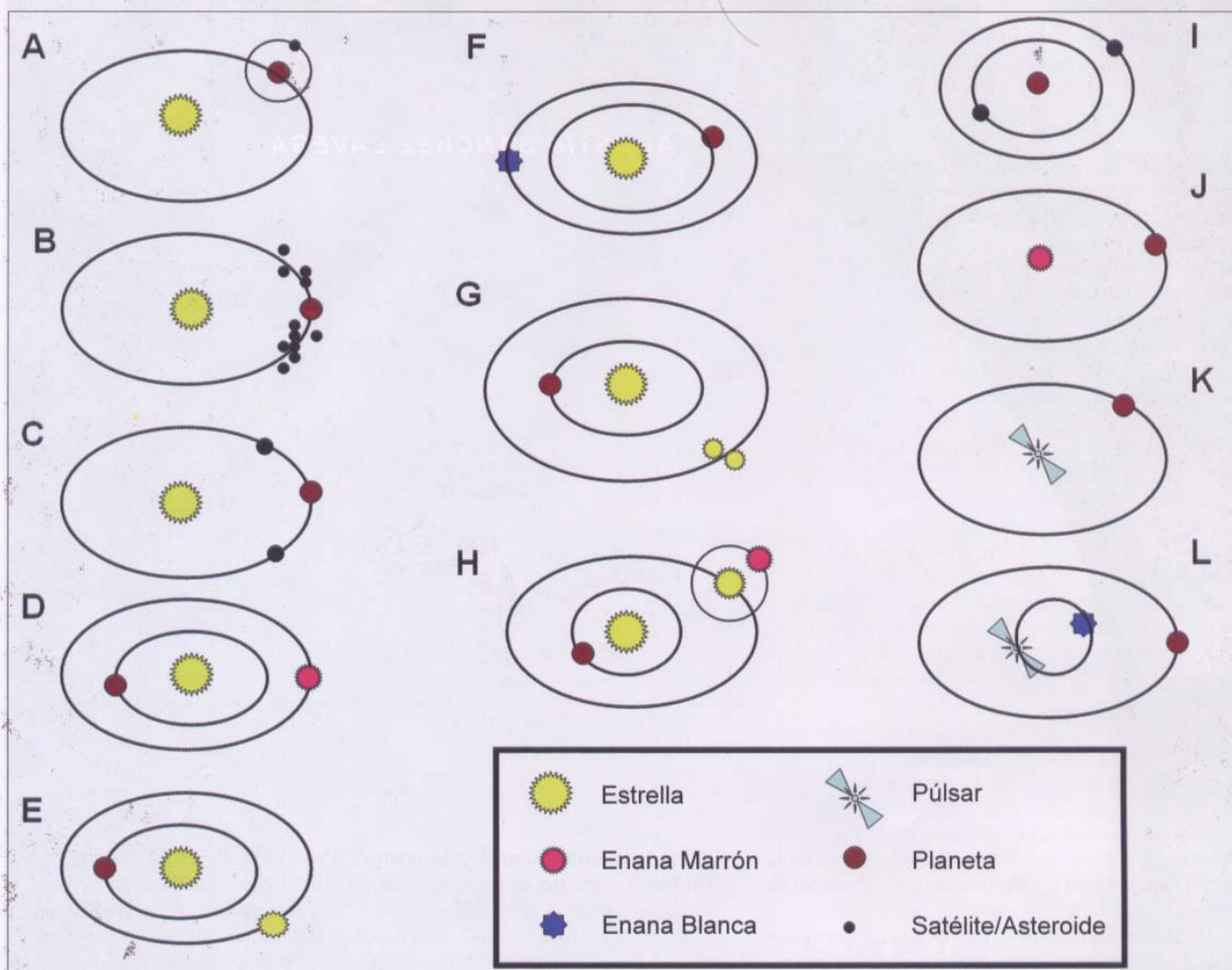


Figura 1. Planetodiversidad orbital. Las órbitas no se encuentran a escala y son sólo indicativas de la configuración. La excentricidad de la órbita es cercana a cero para los planetas del Sistema Solar (excepto Mercurio cuya excentricidad es 0,2) mientras que en otros sistemas planetarios puede alcanzar valores tan altos como 0,927 (planeta HD 80606b). Los casos A, B y C corresponden a situaciones de nuestro sistema planetario. Ejemplos para los otros casos son: (D) HD 202206, (Continúa en la página 29)

y emerge en una variedad de entornos («planetodiversidad» orbital). Comencemos por esta última.

### PLANETODIVERSIDAD ORBITAL

Históricamente la palabra «planeta» fue acuñada en la antigua Grecia para designar a las estrellas «errantes», por su movimiento en la esfera celeste, y distinguirlas de las estrellas «fijas», de posición inmutable al ojo año tras año. Los planetas fueron reconocidos por sus movimientos (más adelante órbitas alrededor del Sol) pero no por su naturaleza física, desconocida hasta la introducción del telescopio. Utilizaré inicialmente la configuración orbital para clasificar planetas, ya que la situación actual con los planetas extrasolares es parecida a la pre-telescópica con los del Sistema Solar, o quizás aún peor ya que ni siquiera vemos a estos planetas directamente como puntos brillantes, pues su inferencia como es bien sabido es por métodos indirectos.

En la Figura 1 muestro la variedad de ambientes estelares en los que se han descubierto planetas. De

entre los 204 objetos considerados como candidatos planetarios la mayoría se encuentran atrapados en el campo gravitatorio de una o varias estrellas, con un total de veinte sistemas planetarios múltiples (estrellas con más de un planeta, algunos triples y al parecer uno cuádruple, por el momento). Los casos A y B son análogos a nuestro Sistema Solar con un planeta y su satélite (A), o con un cuerpo mayor sumergido en un enjambre de otros menores –asteroides, cinturón de Kuiper–, orbitando alrededor de una estrella normal (B). El caso C correspondería a un planeta «triple», tres en órbita, uno mayor y dos en las posiciones de estabilidad orbital de Lagrange,  $60^\circ$  en la órbita por delante y por detrás del cuerpo mayor (se ha propuesto recientemente esta posibilidad en dos casos observados). Configuración «semejante» se encuentra en la órbita de Júpiter y sus dos familias asociadas de asteroides «troyanos».

Los casos D, E y F corresponden a los veinte casos de planetas descubiertos en sistemas estelares dobles (estrellas binarias) de todo tipo: una estrella



normal y una «abortada», esta última una estrella enana marrón capaz de generar tan solo fugaces reacciones de fusión termonuclear del deuterio (D), dos estrellas normales (E), y un par que contiene una estrella «enana blanca» lo que indica que el planeta sobrevivió a la muerte expansiva de la estrella progenitora (F). Los casos G y H corresponden a planetas descubiertos en sistemas estelares triples realmente curiosos, en donde el planeta atrapado alrededor de la estrella más masiva se encuentra sometido a la interacción gravitatoria de las otras dos estrellas, enanas y próximas (caso G) o una estrella normal con una enana marrón como satélite (H). El origen y estabilidad a largo plazo de estos sistemas es aún desconocido.

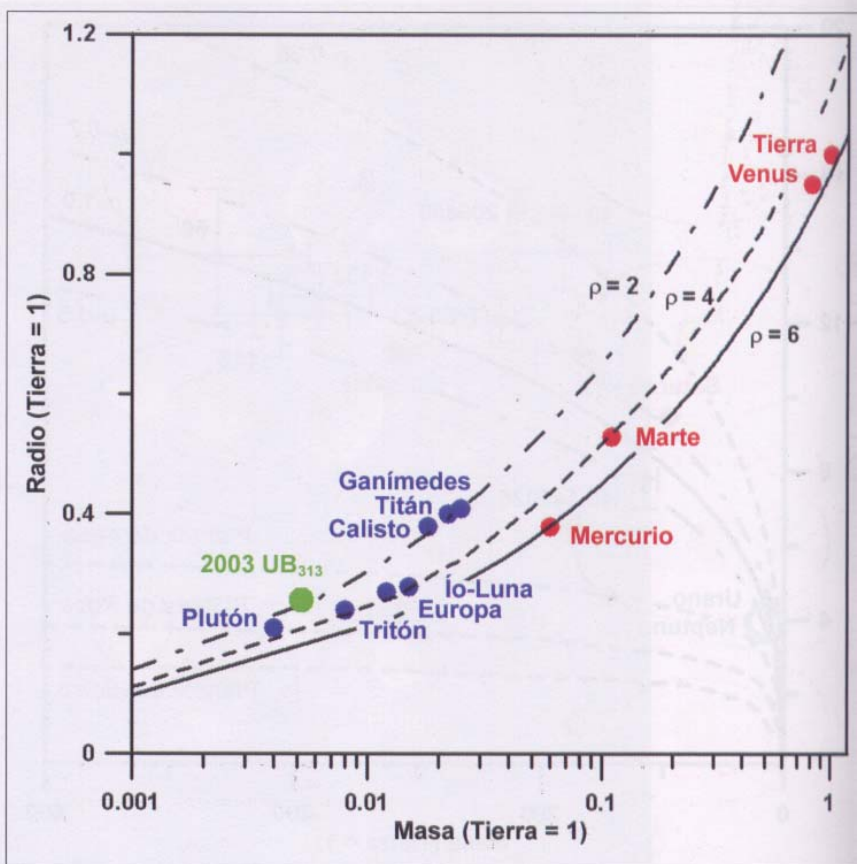
Los casos I y J corresponden a situaciones de «aislamiento» de planetas gigantes, el primero perteneciente a los llamados «planetas flotantes» o «huérfanos», libres de la gravedad de cualquier estrella (probablemente con sus propios satélites), y el segundo a la de planetas atrapados en el entorno de una estrella enana marrón poco masiva. Estos son los únicos casos de los que poseemos imágenes, puntuales obviamente, de planetas.

Finalmente los casos K y L eran realmente inesperados, con planetas en torno a cadáveres estelares, púlsares y enanas blancas. ¿Sobrevivieron a la muerte explosiva de la estrella progenitora o se formaron posteriormente de sus residuos?

Todas estas configuraciones orbitales, y las que con el tiempo se irán descubriendo, responden a la variedad de posibles condiciones iniciales de formación del sistema planetario (masa total, composición química, campo magnético), y a la subsiguiente interacción gravitatoria entre los planetas embrionarios y el disco remanente de materia causa de las «migraciones» orbitales (cambios drásticos de órbita del planeta o protoplaneta), e incluso una vez formados los planetas, a su interacción mutua que puede llevar a expulsarlos lejos de la gravedad de su estrella y lanzarlos al espacio. En el otro extremo, la muerte de la estrella o estrellas del sistema, conlleva a sistemas planetarios cadáver. El nuestro, por ejemplo, acabará en unos 5.000 millones de años como una enana blanca rodeada de una configuración diferente de planetas (al menos Mercurio y Venus serían «evaporados» durante la expansión a gigante roja del Sol) y otros quizás migrarían como resultado de su mutua interacción.

### PLANETODIVERSIDAD FÍSICA: MASA, COMPOSICIÓN, RADIO Y FORMA

Los tres parámetros fundamentales que determinan la estructura física de un planeta son su masa,



la composición química y la energía disponible. Un límite superior de masa nos permite distinguir entre las estrellas enanas marrones y los planetas gigantes. El límite aceptado entre ambos grupos es el de 13 veces la masa de Júpiter, de manera que todo objeto por debajo de ese valor pudiera ser considerado como planeta... hasta un límite inferior, aun no claramente definido. Una posibilidad podría ser considerar como planeta todo objeto que preserve una forma esférica y se encuentre aislado en su órbita. En nuestro Sistema Solar el cuerpo esférico más pequeño es el satélite Mimas de Saturno, cuyo radio es de 198 km y su masa es  $6,2 \times 10^{-6} M_{\oplus}$  ( $1 M_{\oplus} = 5,97 \times 10^{24}$  kg es una masa terrestre, y Júpiter tiene a su vez  $317,71 M_{\oplus}$ ). Como comparación sirva decir que Plutón tiene una masa de  $2 \times 10^{-3} M_{\oplus}$ , el satélite masivo, Ganímedes, tiene  $2,4 \times 10^{-2} M_{\oplus}$  (es decir, 12 veces la masa de Plutón), mientras que el asteroide más masivo y mayor, Ceres, tiene  $1,6 \times 10^{-4} M_{\oplus}$  (cerca de una décima de la masa de Plutón). El problema de la masa inferior de un planeta está obviamente relacionado con el aislamiento orbital del objeto (caso B en la Figura 1), pero nótese que el considerado como planeta más pequeño detectado alrededor del púlsar PSR B1257+12b tiene tan sólo una masa de  $4 \times 10^{-4} M_{\oplus}$  (un quinto de la masa de Plutón).

Figura 2. Relación masa-radio para los planetas terrestres y satélites mayores, incluyendo al mayor objeto conocido cinturón de Kuiper denominado UB<sub>313</sub> y cuya masa mayor que la de Plutón.

(Viene de la página 28)  
(E) Gamma Cephei b, (F) Gliese 86b, (G) HD 188753b, (H) HD 4100b, (I) S Ori 70 (satélites hipotéticos), (J) 2M120, (K) PSR B1257+12, (L) PSR B1620-26. Las referencias a estos planetas pueden encontrarse en Schneider, Enciclopedia de Planetas Extrasolares ([www.obspm.fr/planets](http://www.obspm.fr/planets)) (Las Figuras 1 a 4 son cortesía del autor)



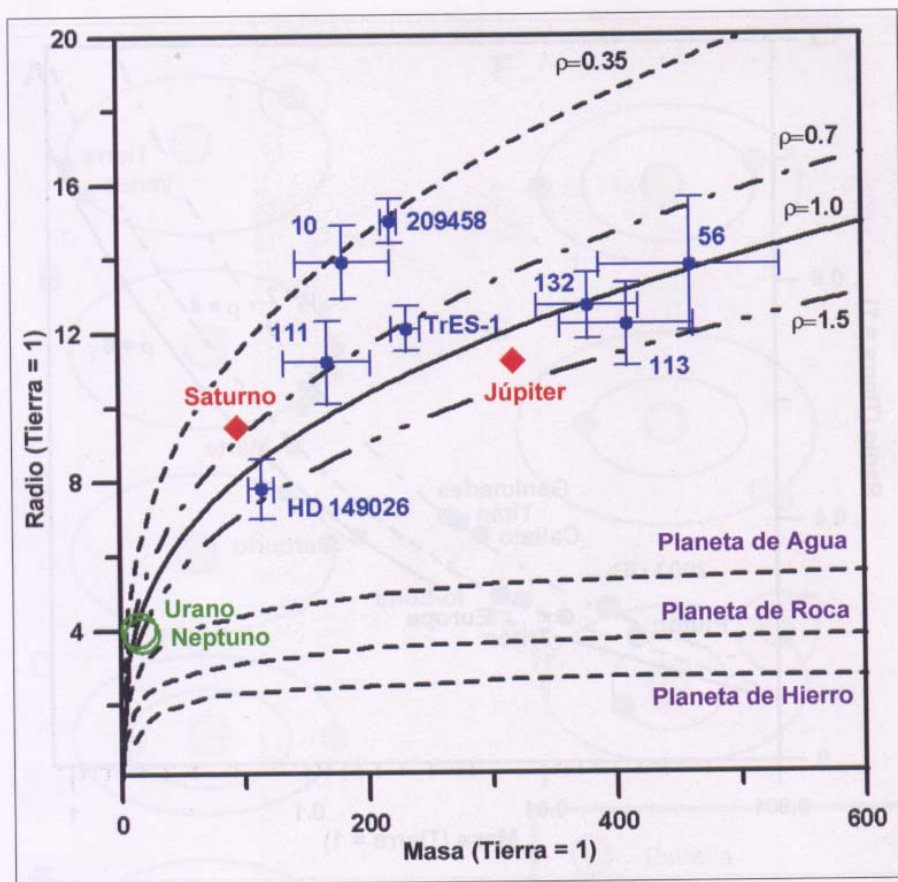


Figura 3. Relación masa-radio de los planetas gigantes y helados del Sistema Solar y para los planetas extrasolares cuyo radio se ha medido. Las líneas continuas inferiores muestran la relación teórica para planetas de «agua», «rocas» y «hierro». Obsérvese como el radio apenas crece con la masa a partir de masas superiores a unas 50 masas terrestres.

La composición química del planeta depende del inventario de materiales volátiles y refractarios existentes en la nebulosa y disco protoplanetario, constituido esencialmente por hidrógeno, del que se formará el sistema planetario. Dado que en ausencia de otras fuentes de energía la temperatura varía con el inverso de la raíz cuadrada de la distancia a la estrella, cerca de ésta se formarán planetas con materiales refractarios (planetas de composición mineralógica varía), y más allá se formarán objetos constituidos por hielos y por los gases más ligeros.

La masa y composición química determinan a su vez el radio planetario y, por lo tanto, su densidad media  $\rho$ . En los planetas de gas, el radio crece con la masa, si bien el valor teórico máximo esperado es de unos 100.000 km para un planeta gigante de unas diez veces la masa de Júpiter. Para esa misma masa, un planeta formado exclusivamente por rocas y minerales tendría un radio de unos 20.000 km. Teóricamente, el cuerpo más pequeño formado por metales que preserve una forma esférica, tendría un radio de unos 100 km. En las Figuras 2 y 3 se muestra la relación radio-masa para los cuerpos del Sistema Solar y para los planetas extrasolares cuyo radio ha podido ser medido, con las correspondientes curvas de densidad media. También se muestran las curvas teóricas

radio-masa para planetas teóricos de diferente composición química.

La forma del planeta queda determinada por la velocidad angular de rotación y por los estiramientos que pueda sufrir a causa de las fuerzas de marea creadas por su proximidad a la estrella o la que ejerzan satélites cercanos masivos. Estas últimas fuerzas pueden llevar a su vez al planeta a una órbita circular sincronizada «spin-órbita» (periodos de rotación y traslación alrededor de la estrella iguales). En ausencia de mareas, la forma que adquiere finalmente el planeta es la de un esferoide de revolución de dos ejes que en el límite para preservar el equilibrio, tendría como máximo un radio ecuatorial doble del polar.

Usando la densidad media del planeta como guía ( $\rho$  en g/cm<sup>3</sup>), que no hace más que reflejar su composición básica, podemos efectuar una clasificación de los planetas en los siguientes cuatro grandes grupos básicos (Figura 4): (I) Metálicos ( $\rho > 6$ ; constituidos principalmente por hierro, níquel y otros metales); (II) Silicato-rocosos ( $\rho = 3-6$ ; compuestos por óxidos de silicio, magnesio y hierro); (III) Helados ( $\rho = 1-3$ ; formados por hielos de agua, amoníaco, metano y dióxido de carbono); (IV) Gaseosos ( $\rho = 0,5-1,5$ ; básicamente de hidrógeno y helio). Es de esperar que, al igual que acontece en el

Sistema Solar, los planetas más comunes sean mezclas de estos casos básicos: metálico-rocosos (como Mercurio, Venus, Tierra y Marte), de rocas y silicatos (como los satélites la Luna, Ío y Europa), de rocas y hielos (como Ganimedes, Calisto, Titán, Tritón y Plutón), helados-gaseosos (Urano y Neptuno), y los esencialmente gaseosos (Júpiter y Saturno), aunque estos dos últimos grupos con un probable núcleo rocoso en su centro.

Pero ¿pueden existir otros tipos de planetas? A distancias de tan sólo 2 millones de km de la estrella se ha descubierto un buen número de planetas con masas entre varias veces la de Júpiter hasta la de Urano (unas 14  $M_{\oplus}$ ) llamados jovianos «calientes» y «muy calientes» ya que sus atmósferas se encuentran a más de 1.000° C de temperatura. Probablemente se trata de planetas gigantes migrados hasta esas distancias tan cortas desde las regiones externas en donde se formaron. El récord de masa más baja medida hasta la fecha lo detenta un planeta encontrado a unos 375 millones de km su estrella, de tan sólo 5,5  $M_{\oplus}$ , y dado que la estrella es muy fría, su temperatura probablemente no supere los -220° C. Algunos denominan a este tipo de planetas como «Súper-Tierras», a mitad de camino entre un planeta terrestre y uno de tipo Urano-Neptuno.



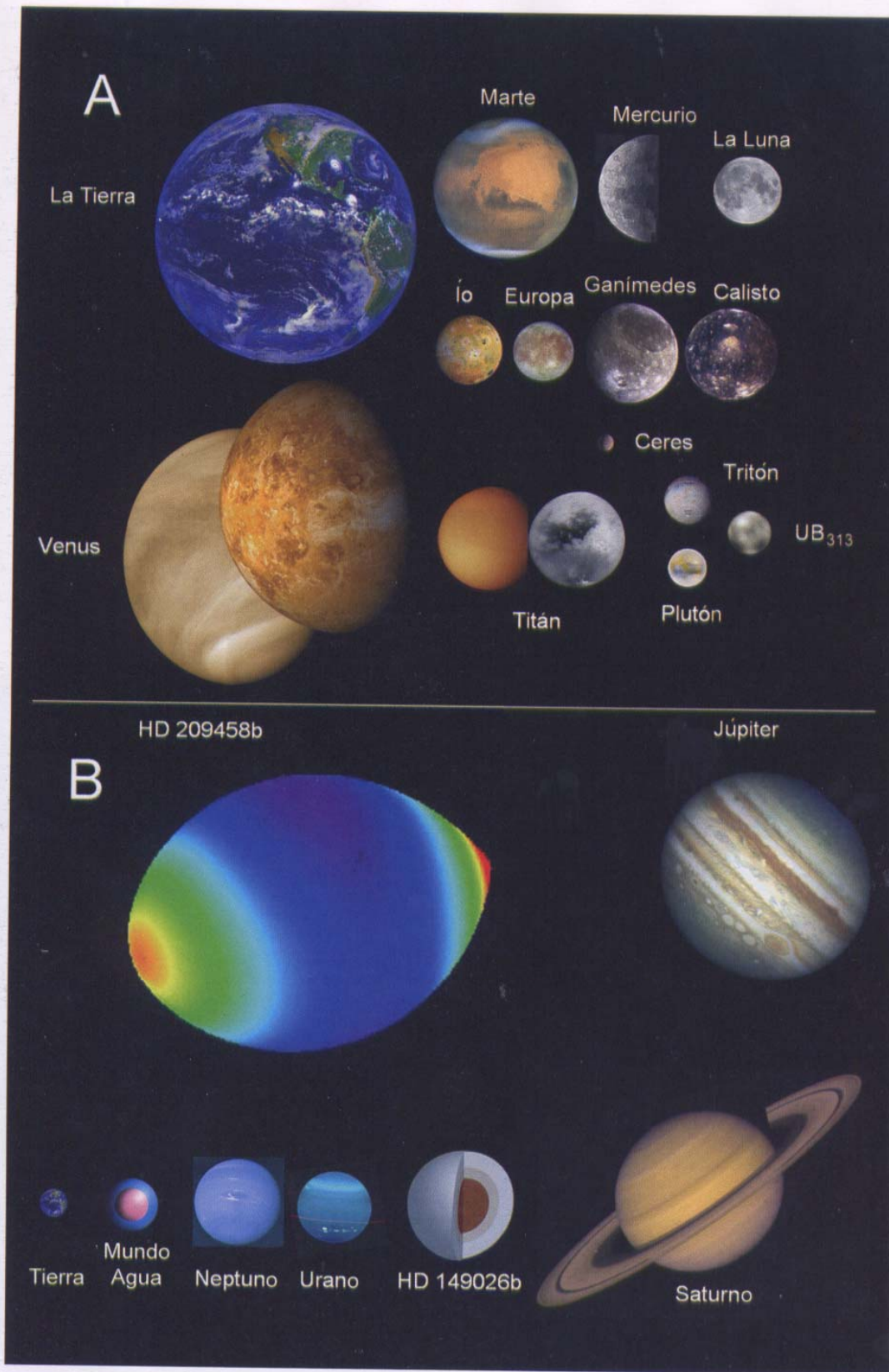


Figura 4. Panorama de los objetos planetarios como muestra de la planetodiversidad física. (A) Planetas terrestres, satélites mayores, el mayor asteroide Ceres y el nuevo objeto UB<sub>313</sub> (impresión artística). (B) Gigantes y helados incluyendo los extrasolares «inflados y en expansión» de tipo «Júpiter calientes» (caso de HD 209458b), un hipotético «mundo de agua» (planeta oceánico), y el planeta de tipo Saturno poseedor de un extenso núcleo (HD 149026b). En cada uno de los paneles A y B los objetos están a escala entre sí, pero no entre paneles.



El planeta gigante Saturno, fotografiado desde la sonda Cassini. (NASA/JPL/SSI)



Impresión artística de 2003 UB<sub>313</sub>, el mayor de los objetos transneptunianos descubiertos hasta ahora en nuestro Sistema Solar, con unos 2.400 km de diámetro. (M. Brown - Caltech-, C. Trujillo - Obs. Gemini-, D. Rabinowitz - Univ. Yale-, NSF, NASA)

Teóricamente se ha propuesto de acuerdo con su composición química la posible existencia de «planetas oceánicos», mundos con masas en el rango 1-10  $M_{\oplus}$  (densidades  $\sim 2-4 \text{ g/cm}^3$ ) cubiertos por un océano líquido global de unos 100 km o más de espesor. Otro tipo hipotético de planeta serían los «planetas de carbón», más masivos (de hasta 60  $M_{\oplus}$ ) formados por derivados del carbono (carburos,

compuestos carbonatados y quizás hasta diamantes, véase Figura 4).

#### **PLANETODIVERSIDAD EVOLUTIVA: ENERGÍA, DIFERENCIACIÓN Y CAMPO MAGNÉTICO**

Las fuentes de energía determinan la estructura interna del planeta (diferenciado en capas más densas



hacia su centro por la acción de la gravedad), y su aspecto visual, ya sea una superficie sólida, o un océano líquido, o una atmósfera (o su mezcla como por ejemplo en el caso terrestre). La energía disponible determinará además la evolución a largo plazo del planeta. La energía puede provenir del exterior (caso de la radiación estelar o la disipada por fricción por la acción de fuerzas de marea desde la estrella o satélites) o del interior (de carácter radioactivo por decaimiento de elementos inestables, de auto-contracción, o almacenada durante el proceso de formación, o por sedimentación de elementos pesados y la liberación del calor generado por la fricción con el entorno). Los ejemplos de pares de cuerpos de composición química global semejante como son La Tierra y Venus o el de los satélites galileanos Ganímedes y Calisto, pero de estructura diferente debido a la acción de la energía interna, ilustran a la perfección el decisivo papel de esta última.

La pérdida de esta energía a lo largo del tiempo conlleva a la evolución del planeta y a los cambios temporales asociados, lo que constituiría la planetodiversidad evolutiva, que afecta a todo tipo de planetas. Es de esperar que todos sean extremadamente calientes al nacer, y del mayor tamaño posible según su composición, y que éste se enfríe y encoja paulatinamente a medida que las fuentes de energía se

extinguen. El tiempo característico de enfriamiento del planeta es directamente proporcional a su radio al cuadrado y depende de la conductividad térmica de los materiales que lo forman, es decir de la eficiencia que tenga en perder calor.

Las fuentes de energía interna son además el motor capaz de generar, junto con la rotación, el campo magnético. Si el calor interno es alto, el material fundido se mueve por convección, y si este es además conductor eléctrico, se puede generar un campo magnético por efecto dinamo. Pueden existir en tal caso los «magnetoplanetas», planetas poseedores de potentes campos magnéticos, como en el caso de la Tierra y los gigantes, cuya presencia se manifestaría por la existencia de intensas emisiones de ondas de radio y de actividad auroral detectable en longitudes de onda desde los rayos X hasta el infrarrojo.

Aunque los planetas del Sistema Solar y sus lunas son un buen muestrario de la diversidad planetaria, probablemente no podemos aún imaginar la fantástica variedad de formas, superficies, atmósferas (y quizás formas vivientes) presentes en esos mundos. Las misiones espaciales proyectadas para los próximos veinte años, como el Telescopio Espacial *James Webb*, *Kepler*, *Terrestrial Planet Finder* y *Darwin*, entre otras, arrojarán nueva luz sobre estos mundos. **A**



# Raig



Instrumentos

Meteorología - Óptica - Precisión

## Especialistas en Astronomía desde 1926

Envíos a toda España

[www.raig.com](http://www.raig.com)

Pelai, 62 - 08001 BARCELONA  
Tel. 93 318 85 47  
Tel./Fax. 93 318 32 22  
E.mail: [raig@swf.es](mailto:raig@swf.es)

Nuñez de Balboa, 58 - 28001 Madrid  
Tel. 91 781 23 04  
Fax. 91 578 13 68  
E.mail: [madrid.raig@swf.es](mailto:madrid.raig@swf.es)

Plazuela de Santiago, 4 - 48005 Bilbao  
(Frente a la catedral)  
Tel. 94 416 40 76  
Fax. 94 416 65 01  
E.mail: [bilbao.raig@swf.es](mailto:bilbao.raig@swf.es)