

# Planetas libres y cúmulos estelares

Los científicos han buscado planetas  
en lugares exóticos, muy lejos de sus estrellas progenitoras:  
dentro de los cúmulos de estrellas más densos de la galaxia

Jarrod R. Hurley y Michael M. Shara

**L**a existencia de planetas fuera de nuestro sistema solar ha sido un tema delicado desde que en 1600 el filósofo Giordano Bruno fuera quemado en la hoguera por proponer, entre otras cosas, que en el universo hay un número infinito de mundos. Hoy día, no se quema públicamente a nadie por afirmar que existen planetas extrasolares, pero sigue siendo un tema debatido. Hasta la fecha se han encontrado más de 100 planetas en órbita alrededor de otras estrellas, con gran júbilo de la comunidad astronómica. Pero quizá ha sido mayor la conmoción causada por el descubrimiento de unas pocas docenas de planetas extrasolares que no están ligados a estrella alguna. Pocos descubrimientos de objetos celestes habrán suscitado tal polémica como estos “planetas libres” o “planetas aislados”.

El problema reside en la vaguedad del concepto mismo de planeta. Algunos de los objetos hallados alrededor de otras estrellas son mucho mayores que los planetas gigantes de nuestro sistema solar; su masa decuplica con creces la de Júpiter (aunque la mayoría sólo

la triplica o cuadruplica). Ese valor se aproxima a la frontera que separa los planetas de otros cuerpos subestelares, las enanas marrones, a las que a menudo se llama “estrellas fallidas” porque son demasiado pequeñas para producir la fusión del hidrógeno en su núcleo. Las enanas marrones tienden el puente entre los planetas y las verdaderas estrellas; los bordes superior e inferior que limitan su reino resultan aún un poco confusos. (Para aumentar la confusión, ¿se ha sugerido no hace mucho que las enanas marrones podrían alojar planetas a su alrededor!)

Por otra parte, algunos de los planetas libres parecen no ser mayores que Júpiter, pero su mera existencia desafía la definición clásica de planeta: objeto subestelar que da vueltas a una estrella, junto a la cual nació. Muchos se oponen a llamar a estos objetos aislados “planetas”; por ahora, algunos los denominan “cuerpos errantes”.

Más allá de cuestiones nominales, parte del problema que plantean estos planetas aislados consiste en explicar y comprender sus orígenes. Si se formaron como las estrellas, por el colapso gravitatorio de una nube de gas y polvo, deberían haber nacido junto con estrellas en los cúmulos o asociaciones estelares. Si, por el contrario, nacieron en un disco protoplanetario que rodeaba a una estrella en formación, hay que preguntarse por qué se quedaron huérfanos, tan lejos de su estrella madre.

Investigamos esta última posibilidad. Nos hemos especializado en el estudio de los cúmulos globulares de estrellas; tratamos de saber qué son y cómo evolucionan, por medio tanto de observaciones como de simulaciones por ordenador. Aunque pudiera parecer un campo ajeno al estudio de los planetas extrasolares,

## El autor

JARROD HURLEY investiga la evolución de los cúmulos estelares mediante simulaciones por ordenador. Michael Shara dirige el departamento de astrofísica del Museo Americano de Historia Natural, al que Hurley se halla adscrito. Entre sus intereses científicos se cuentan la estructura y evolución de las novas y supernovas, los choques de estrellas y la naturaleza de las poblaciones estelares.

© *American Scientist Magazine*.



**1. EL CUMULO GLOBULAR 47 TUCANAE** consta de varios millones de estrellas y de un número desconocido de planetas. Con modelos informáticos de las interacciones dinámicas de estos cúmulos estelares densos se busca resolver si un sistema planetario estable podría sobrevivir a la violenta gravedad de un entorno donde unas 3000 estrellas se apiñan en un año luz cúbico. La búsqueda en el

cúmulo 47 Tucanae de planetas jovianos que describan órbitas cercanas a sus estrellas no ha encontrado ni rastro de ellos. ¿Existieron siquiera alguna vez? ¿O se liberaron de sus estrellas progenitoras como resultado de un encuentro con otra estrella? Las respuestas quizás arrojen más luz sobre los recientes descubrimientos de planetas en cúmulos de estrellas jóvenes.

los cúmulos estelares más densos son campos muy fértiles para quienes buscan planetas aislados mediante el análisis de las interacciones dinámicas entre las estrellas. Consideraremos los descubrimientos recientes de planetas libres.

### Los “cuerpos errantes”

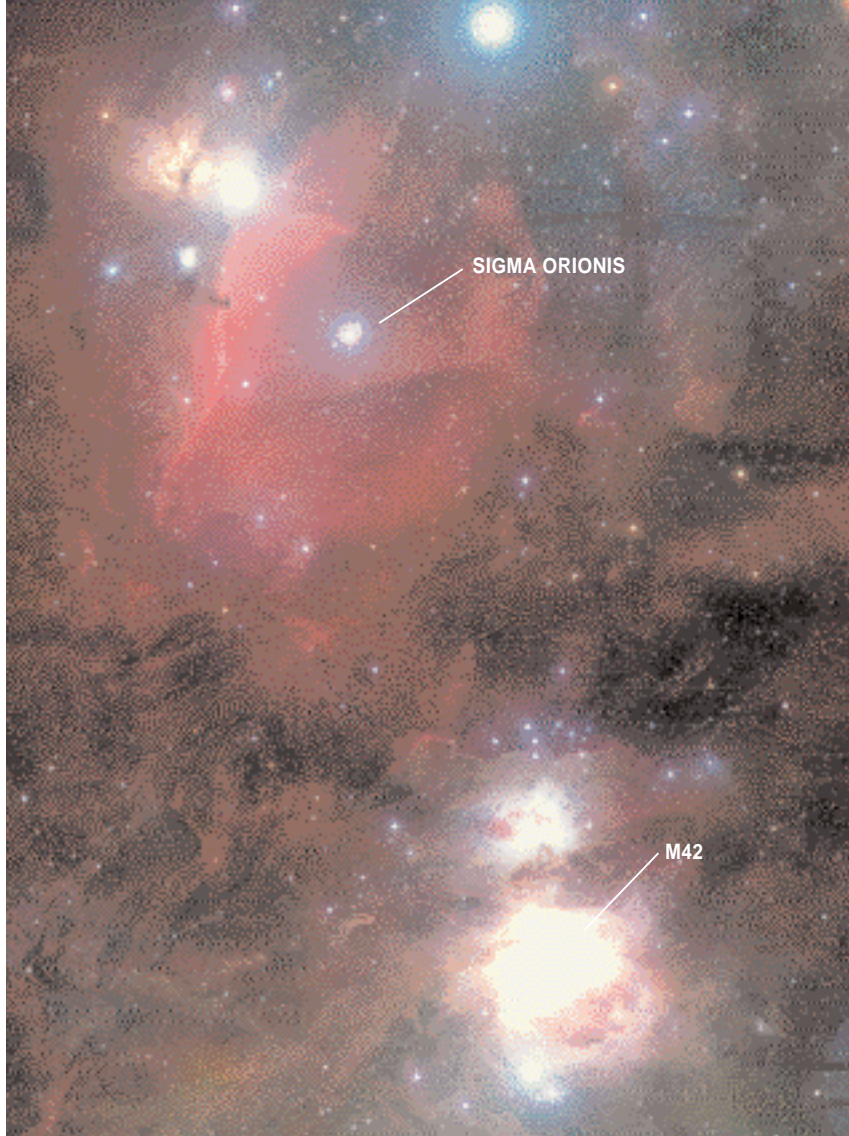
Los “cuerpos errantes”, aparte de su novedad, interesan e importan por sí mismos. El número y la variedad en la Vía Láctea de cuerpos celestes menores que una estrella —menos de 0,08 masas solares (unas 80 masas de Júpiter)—, se desconoce. Han de presentar tamaños varios: desde objetos bastante

grandes, como las enanas marrones y los planetas gaseosos gigantes, hasta los planetas rocosos, la Tierra entre ellos, y cuerpos menores, así los satélites y asteroides de nuestro sistema solar. Lo cuantitativo no sólo importa en nuestra búsqueda de mundos habitables y con vida extraterrestre; sólo con ella podrán resolverse problemas fundamentales —el número y tamaño relativos de las estrellas recién formadas en un cúmulo (la “función inicial de masas”) y la identidad de la materia oscura del universo.

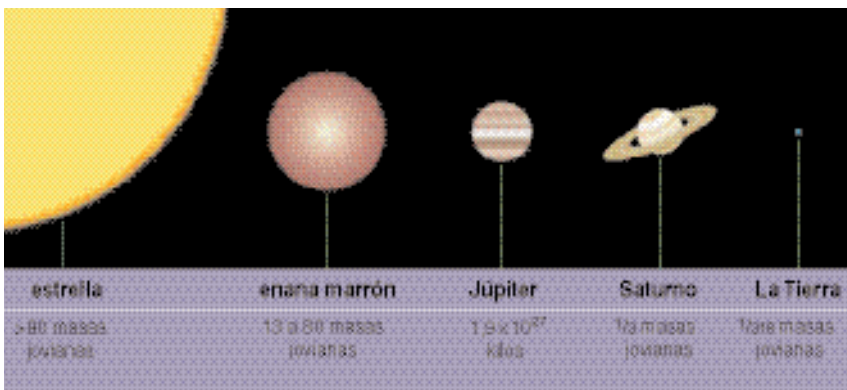
Con el acicate de estas preguntas, varios grupos emprendieron la busca de otros mundos a principios del decenio de 1990. Sus esfuerzos

han conducido a una serie de descubrimientos sorprendentes, que se iniciaron con la primera detección de un planeta extrasolar en 1992. El astro orbitaba alrededor de una estrella muerta, en concreto de un púlsar, una estrella de neutrones que gira muy rápido y emite con intensidad ondas de radio. Nadie esperaba que los púlsares cobijaran planetas; la supernova que dio lugar a la estrella de neutrones debería haber destruido cualquier planeta de los alrededores.

Se encontraron más planetas extrasolares que giraban alrededor de estrellas convencionales en 1995, pero también se trataba de sistemas peculiares. Muchos tienen planetas



**2. LAS INCUBADORAS ESTELARES DE ORION, hogar de miles de estrellas recién formadas, parecen albergar planetas aislados. Se han encontrado objetos de éstos en las regiones de formación estelar del Trapecio, en la Nebulosa de Orión (M42) y cerca de la estrella brillante sigma Orionis. Se han hallado casi 40 objetos aislados de tamaño planetario.**



**3. LA DEFINICION DE PLANETA depende en parte de la masa. El descubrimiento de objetos aislados de menos de 13 veces la masa de Júpiter (el límite inferior de las enanas marrones) ha suscitado un debate acerca de su origen e identidad. Los cuerpos aislados más pequeños hasta ahora encontrados tienen alrededor de 3 masas jovianas. A las limitaciones técnicas actuales cabría atribuir la aparente carencia de cuerpos de menor tamaño, aunque la teoría también parece indicar que realmente son escasos. Por ahora se desconoce su abundancia.**

del tamaño de Júpiter en órbitas muy pequeñas (de menos de 5 días). Estos jovianos calientes no encuentran explicación en los modelos actuales de formación de los sistemas planetarios, ya que sitúan esos gigantes de gas a grandes distancias de la estrella central, con períodos orbitales más parecidos al de Júpiter, que es de casi 12 años.

Con tantas sorpresas como estos “sistemas solares” habían dado, debería haberse esperado que los mundos aislados ofreciesen también las suyas. Resulta curioso, habida cuenta de la barahúnda que hoy rodea a los “cuerpos errantes”, que el primer descubrimiento, en 1998, se anunciase sin el menor entusiasmo. En un artículo sobre enanas marrones jóvenes publicado por Motohide Tamura, del Observatorio Astronómico Nacional de Japón, y sus colaboradores, se hacía una breve mención; decían que algunos de los objetos que se habían observado caían por debajo de la frontera de las enanas marrones (unas 13 masas jovianas) y, por tanto, dentro del “régimen de masa de los planetas gigantes”. El límite de 13 veces la masa de Júpiter marca la frontera a partir de la cual un objeto comienza a quemar deuterio (un isótopo del hidrógeno); en consecuencia, se lo considera la cota inferior del dominio de las enanas marrones. Por la modestia de los científicos japoneses, su descubrimiento no trascendió durante un par de años.

Tamura y sus colaboradores encontraron estos cuerpos de tamaño planetario mientras buscaban objetos estelares jóvenes, de masa pequeña, en las nubes moleculares de Camaleón I, una región donde abunda la creación de estrellas. A estas alturas, no puede extrañar que los primeros planetas aislados se hallasen en una de esas regiones. Puesto que los planetas jóvenes aún retienen parte del calor generado durante el proceso de agregación que los origina, se reconoce su brillo caliente con los mismos detectores infrarrojos con que se observan las enanas marrones y las estrellas muy jóvenes.

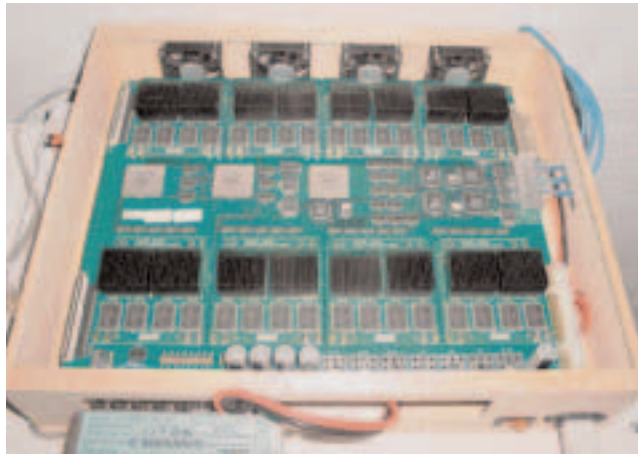
Investigaciones parecidas, de astros de poca masa situados en regiones de formación estelar, descubrieron nuevos cuerpos sueltos de

tamaño planetario en 2000. En la primavera de ese año dos británicos, Philip Lucas y Patrick Roche, anunciaron el hallazgo de otros 13 posibles objetos de ese tipo en el corazón de la Nebulosa de Orión (M42), una región de formación estelar, a unos 1500 años luz de la Tierra. Varios de estos objetos, comunicaron, no llegaban a tener 13 veces la masa de Júpiter. Al igual que en los estudios de Tamura, la identidad de esos objetos depende de su edad. Si son muy jóvenes, de sólo un millón de años, su brillo (luminosidad) se acercará al de unos objetos del tamaño de los planetas gigantes.

Algunos cuestionaron el descubrimiento de Lucas y Roche; sostenían que los cuerpos descubiertos poseían un brillo intrínseco superior al que aparentan. Se encontraban detrás

de la Nebulosa de Orión; por eso parecían planetas jóvenes: los debilitaba el polvo de la nebulosa. En tal caso habría que considerarlos enanas marrones. Otros se preguntaron si, fuera como fuese, tenía sentido llamarlos planetas. Alan Boss, del Instituto Carnegie, cree que la masa no debería ser la característica que defina a los planetas, sino más bien la forma en la que se crean —dentro de un disco protoplanetario y alrededor de una estrella joven—. Boss ha expuesto un mecanismo que crearía objetos de masa planetaria de manera parecida a como nacen las estrellas. No se trataría de planetas, sino de “subenanas marrones”.

Poco después de los descubrimientos de Lucas y Roche, un segundo grupo de astrónomos anunció la detección de planetas aislados en otra parte de la constelación de Orión. María Rosa Zapatero Osorio y sus colaboradores descubrieron 18 “cuerpos errantes”, débiles y rojos, en imágenes de larga exposición de un cúmulo, cerca de la estrella sigma Orionis (véase la figura 2). Esta región está situada a escasos



**4. EL ORDENADOR GRAPE-6 se ha diseñado pensando en el enorme número de operaciones necesarias para construir un modelo informático de las interacciones dinámicas dentro de un cúmulo estelar denso. Las aplicaciones de GRAPE-6 son limitadas: parte de la lógica de las interacciones estelares está integrada en los chips. Hemos utilizado el prototipo mostrado en la figura para obtener los resultados presentados en el artículo. Ejecuta medio billón de operaciones de punto flotante (0,5 teraflop). Es la potencia necesaria para seguir, en nuestra simulación de N cuerpos, la vida de unas 10.000 partículas (estrellas y planetas) dentro de un cúmulo abierto. La versión actual de GRAPE-6 llega a 1 teraflop, suficiente para unas 100.000 partículas.**

1000 años luz de distancia de la Tierra y es el hogar de estrellas recién formadas, con edades entre uno y cinco millones de años. Entre las estrellas jóvenes existe un número de objetos con temperaturas muy bajas, entre 1700 y 2000 kelvin (la temperatura de la atmósfera del Sol es de 5800 kelvin). Por su edad y temperaturas frías, se piensa que son objetos muy “pequeños”, con masas entre 5 y 15 veces la de Júpiter. Los autores fueron bastante cautos a la hora de resolver la identidad de tales objetos; en el título de su artículo los denominaban “objetos jóvenes, aislados y de masa planetaria”.

Luego, en otoño de 2001, Lucas, Roche y sus colaboradores anunciaron nuevas observaciones que confirmaban la existencia de “cuerpos errantes” dentro de la Nebulosa de Orión; por tanto, deben tener tamaño planetario. Sus estudios espectroscópicos indican la presencia de vapor de agua, lo que apoya la juventud de los objetos (alrededor de un millón de años) y su baja masa. Creen haber identificado quince objetos aislados de masa plane-

taria. Con la esperanza de evitar conflictos por cuestiones nominales, acuñaron un nuevo término para designar los objetos planetarios que no giran alrededor de ninguna estrella: “planetares”.

El hilo común de todos estos descubrimientos es el hallazgo de objetos aislados dentro de grupos de estrellas de reciente formación. Las estrellas de estos grupos se dispersarán con el tiempo, bien porque no estén gravitatoriamente ligadas entre sí (asociaciones dispersas), bien porque los cúmulos sean lo bastante pequeños (es decir, porque se trate de cúmulos abiertos) como para que los diezmen las fuerzas de marea de la galaxia en sólo unos miles de millones de años. Excepto las que formen sistemas estelares múltiples, estas estrellas “de campo” va-

garán solas por la galaxia, tal y como hace el Sol. Es razonable pensar que los objetos aislados de tamaño planetario nacidos dentro del cúmulo abierto se dispersan con las mareas. Una vez hayan abandonado su cuna, serán mundos muy fríos, oscuros y solitarios, harto difíciles de detectar.

### ¿Cuerpos errantes en los cúmulos globulares?

Existen otros lugares donde podemos encontrar planetas aislados: en los muy densos confines estelares de los cúmulos globulares. Al contrario de lo que ocurre en las asociaciones jóvenes de estrellas, los cúmulos globulares contienen estrellas gravitatoriamente vinculadas entre sí. Son muy antiguos: algunos pasan de los diez mil millones de años. Dadas las diferencias entre estos dos ambientes, parece extraño pensar que en los dos pueda haber planetas libres. Y, sin embargo, así es.

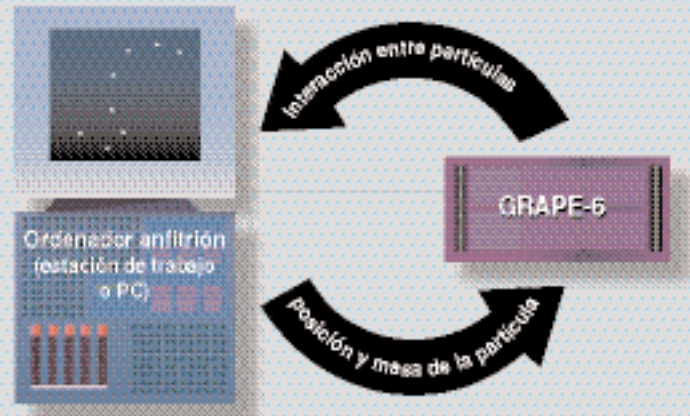
La primera búsqueda de planetas en un cúmulo globular no tuvo en cuenta los planetas aislados. En ju-

## El cúmulo globular, en el ordenador

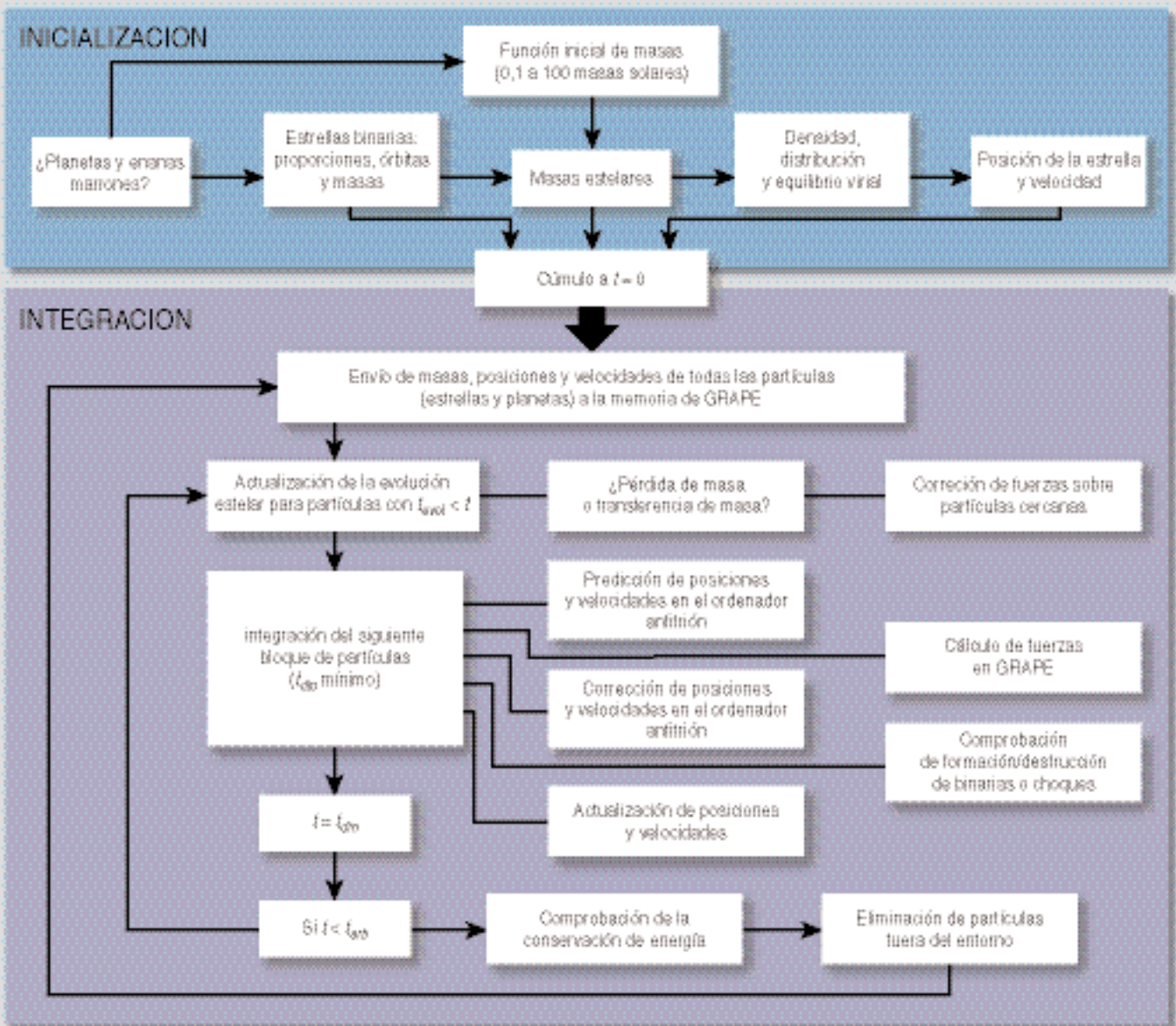
Una simulación de  $N$  cuerpos de un cúmulo globular se ejecuta mediante un diálogo entre una máquina anfitriona —que mantiene en memoria las posiciones y las masas de las partículas— y GRAPE-6 —un ordenador construido expresamente para calcular las interacciones entre las partículas—. El proceso comienza definiendo las características del sistema: los tamaños relativos y el número de estrellas (la función inicial de masas), el número de sistemas binarios y planetas, las posiciones y velocidades iniciales de las estrellas, sus densidades, distribución y equilibrio virial (que define la cantidad total de energía dentro del cúmulo).

Durante el cálculo, se siguen dos parámetros temporales de cada estrella: uno para su evolución física ( $t_{evol}$ ) y otro para sus interacciones dinámicas ( $t_{din}$ ). Los intervalos de tiempo son diferentes para cada estrella. Las estrellas de masa grande evolucionan rápido y, por tanto, tienen tiempos  $t_{evol}$  cortos, mientras que las estrellas de baja masa evolucionan despacio y sus tiempos  $t_{evol}$  son más largos. De forma análoga, las estrellas de movimiento rápido dentro del núcleo denso del cúmulo tienen tiempos  $t_{din}$  cortos, mientras que las estrellas, más lentas, de las regiones externas tienen tiempos  $t_{din}$  largos.

El sistema se actualiza por bloques de partículas con tiempos  $t_{din}$  similares. La evolución física de una estrella de desarrollo rápido se actualiza más de una vez en cada paso de



la evolución dinámica (si  $t_{evol} < t_{din}$ ). Se realizan comprobaciones cada cierto tiempo arbitrario ( $t_{arb}$ ) con el fin de verificar que no se han cometido "violaciones" de la física. Las partículas que emigran hacia las regiones exteriores del cúmulo globular se eliminan del sistema; simula la evaporación del cúmulo debido a las mareas galácticas. También se toman en cuenta durante los cálculos otros procesos astrofísicos (véase la figura 5).



lio de 1999, Ronald Gilliland y sus colaboradores observaron cerca de 34.000 estrellas del cúmulo globular 47 Tucanae con la Cámara Planetaria de Gran Campo número 2 del Telescopio Espacial Hubble. Este cúmulo es uno de los mayores y más densos de nuestra galaxia; debe sumar varios millones de estrellas (véase la figura 1). El núcleo es tan denso, que residen allí unas 3000 estrellas por año luz cúbico. Algunos cúmulos globulares tienen núcleos con casi tres millones de estrellas por año luz cúbico. Por comparación: en un año luz cúbico centrado en el Sol, sólo hay una estrella, el propio Sol; la estrella más próxima a éste se halla a más de cuatro años luz de distancia. Puesto que 47 Tucanae es bastante viejo, el equipo de Gilliland pensó que su proyecto podría arrojar nueva luz sobre los sistemas planetarios de estrellas envejecidas.

La misión del telescopio espacial consistía en detectar los tránsitos de planetas del estilo de Júpiter calientes por delante de sus estrellas progenitoras. Percibimos esos pasos porque la luz de la estrella se debilita un poco al cruzarse el planeta. Por consideraciones teóricas, basadas en la frecuencia de esos planetas calientes en la vecindad del Sol, se esperaba encontrar una veintena de ellos en 47 Tucanae, más o menos uno por cada 1700 estrellas. Terminada la tarea, no se observó ninguno.

Hay dos explicaciones posibles. Una de ellas se basa en la relación aparente entre la composición química de una estrella y su predilección por los planetas calientes. En la búsqueda de planetas extrasolares en la vecindad solar, se ha descubierto lo siguiente: resulta, al menos, diez veces más probable que las estrellas ricas en metales (con abundancias bastante altas de elementos más pesados que el helio) tengan planetas con períodos orbitales cortos que las estrellas pobres en metales. Mientras se resuelve el motivo, aquí sólo necesitamos apuntar que las estrellas viejas de 47 Tucanae son, en general, deficientes en metales (cuentan aproximadamente con un quinto de la metalicidad solar), ya que se formaron al principio de la historia de

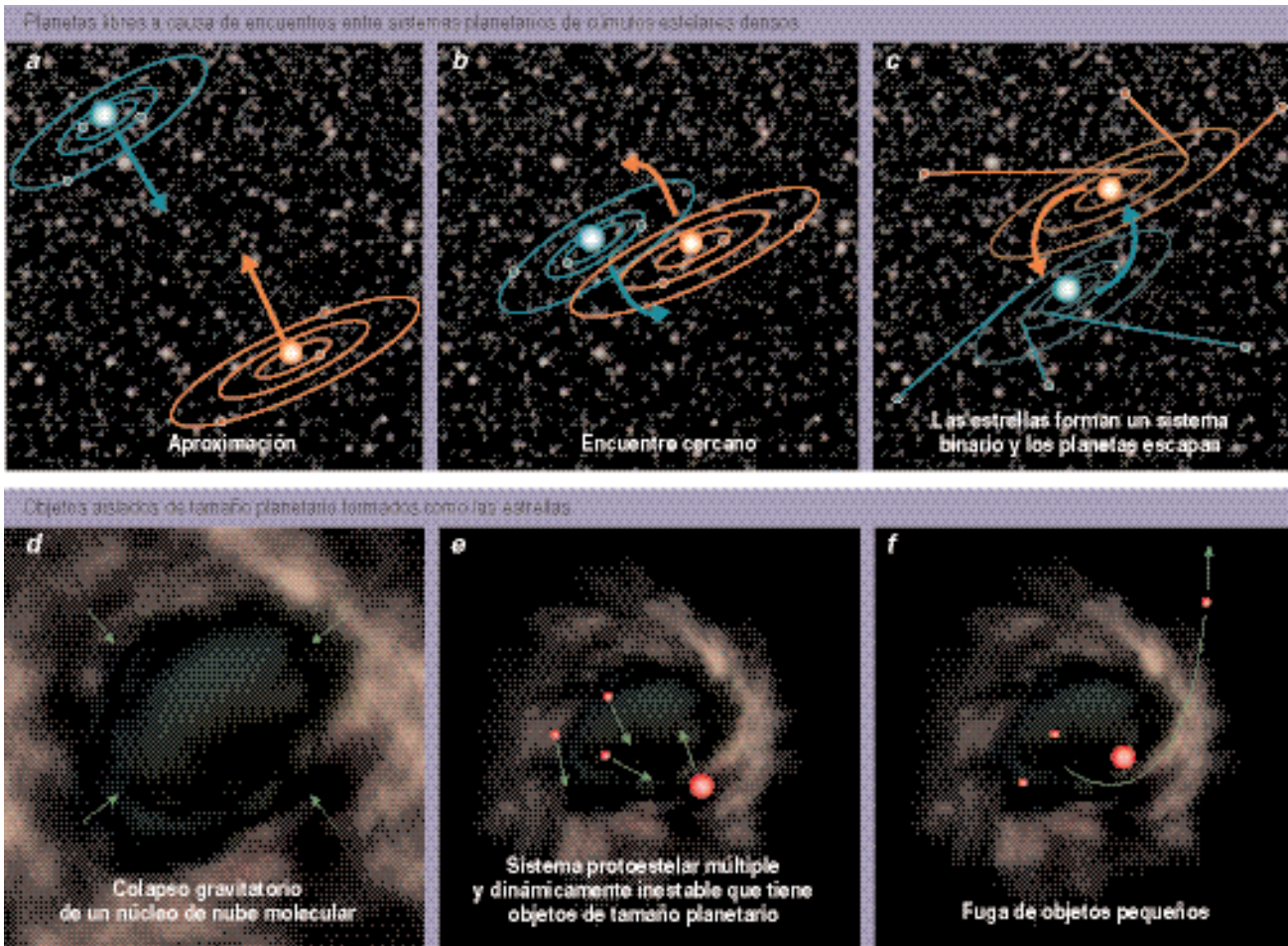


**5. AL ELABORAR UN MODELO DE LA EVOLUCIÓN de un cúmulo globular se tienen en cuenta varios procesos astrofísicos. La relajación de dos cuerpos consiste en intercambiar energía entre las estrellas de manera que tiendan a tener la misma cantidad de ella: las estrellas pesadas se frenan y viajan hacia el núcleo del cúmulo; las más livianas se aceleran y emigran hacia regiones exteriores. Esta segregación de masas afecta al ritmo de los encuentros entre las estrellas y suele acelerar a las más pequeñas hasta que alcanzan la velocidad de escape. A medida que las estrellas pesadas se agrupan, la densidad del centro del cúmulo aumenta, lo que multiplica el número de encuentros y choques ("calentamiento" binario) que retrasan el colapso del núcleo. La "quema" binaria estrecha aún más las binarias ceñidas y rompe aquellas donde la distancia entre el par de astros era mayor (incluyendo a los sistemas planetarios). Estos procesos afectan a la evolución de los sistemas múltiples y de las estrellas. La transferencia ineficaz de masa entre las estrellas múltiples provoca una pérdida de materia. Las estrellas individuales también pueden perder masa: las de mayor masa explotan como supernovas, mientras que las no tan grandes pierden masa constantemente en forma de vientos estelares. Las fuerzas de marea gravitatorias de la galaxia extraen esa masa del cúmulo junto con las estrellas pequeñas que se han desplazado hasta las regiones exteriores. El cúmulo desaparece cuando todas sus estrellas se han dispersado, bien barridas por las mareas gravitatorias, bien por la expulsión directa. En medio de este agitado ambiente, la creación de planetas libres podría ser frecuente.**

la galaxia, antes de que los elementos químicos pesados se hubieran sintetizado en grandes cantidades. Resulta interesante que se haya encontrado un planeta extrasolar

alrededor de un púlsar del cúmulo globular M4.

Pero cabe otra explicación posible. El entorno de un cúmulo denso inhibe la formación de planetas o



**6. HAY DOS MECANISMOS HIPOTÉTICOS** que pueden engendrar objetos aislados de masa planetaria. En un cúmulo estelar denso (*a*), el encuentro entre dos sistemas planetarios (*b*) quizá libere a algunos planetas (*c*). En este ejemplo, tras el encuentro se ha formado un sistema estelar binario. En la mayoría de los casos, un pequeño impulso

impartido por una estrella que se acerca bastaría para liberar los planetas. Pueden originarse objetos de tamaño planetario a partir también de una nube molecular (*d*), de manera muy parecida a como nace cualquier estrella. Si estos objetos se crean en un sistema dinámicamente inestable (*e*), escapan (*f*) y no permanecerán ligados a la estrella.

limita la migración orbital de los gigantes de gas hacia sus estrellas progenitoras. Puede, también, que los sistemas planetarios se engendren dentro de cúmulos globulares y que las colisiones con estrellas vecinas, habida cuenta de la alta densidad del cúmulo, los disuelvan pronto. De ser así, los planetas de estos sistemas que colisionan se liberarían de sus estrellas progenitoras. Puesto que el equipo de Gilliland sólo buscaba tránsitos de planetas calientes, no localizó ninguno.

Un artículo aparecido en el verano de 2001 anunció la detección, gracias a las microlentes gravitatorias, de algunos posibles planetas libres en el cúmulo globular M22. Resultó, no obstante, que unos rayos cósmicos habían caído sobre la cámara;

hicieron creer a los astrónomos que habían descubierto planetas.

### ¿Adónde han ido a parar los planetas?

¿Qué nos está diciendo la detección nula de planetas en el cúmulo globular 47 Tucanae? Debemos primero tener en cuenta que la vida de un planeta dentro de un cúmulo globular podría ser muy diferente de la vida de un planeta alrededor de una estrella en un entorno menos denso. Los encuentros y los choques directos entre estrellas de regiones muy pobladas deben afectar a la integridad de los sistemas planetarios. Con los resultados de 47 Tucanae en mente, varios astrofísicos, entre ellos no-

sotros, han construido modelos informáticos de sistemas planetarios situados en entornos así.

Primero debemos crear una copia razonable de un cúmulo globular. Es una tarea ardua. Existen varias formas de construir un modelo de cúmulo estelar; nosotros hemos optado por seguir el comportamiento de cada estrella en una simulación de N cuerpos. La inmensa cantidad de estrellas dentro de un cúmulo globular hace que esta tarea sea todo un desafío computacional. En la práctica, no podemos abordar la interacción de millones de estrellas. Nuestras simulaciones actuales sólo incluyen unas 10.000 estrellas. Aun así, los cálculos requieren de un equipo diseñado específicamente para este solo propósito. La gene-

ración más reciente de estas supercomputadoras es GRAPE-6 (del inglés "GRAvity PipE"), una máquina poderosa, capaz de realizar un teraflop (un billón de operaciones de punto flotante por segundo), creada por Jun Makino y su equipo de la Universidad de Tokio. Hemos utilizado un prototipo que opera a 0,5 teraflop para obtener los resultados presentados aquí (véase la figura 4).

Además de un equipo material específico, se necesitan programas muy refinados para los modelos de los procesos que ocurren dentro de un cúmulo estelar. Sverre Aarseth lleva treinta años ofreciendo los más avanzados algoritmos de N cuerpos. Ha elaborado con sus colaboradores una serie de códigos, cada vez más eficaces y realistas, de N cuerpos. El código NBODY4 de Aarseth, el que hemos utilizado en nuestras simulaciones, se concibió para las máquinas GRAPE.

Hay que fijar las condiciones iniciales del cúmulo globular: masas, metalicidades estelares, número de sistemas estelares binarios y sus características orbitales, número de planetas y la distribución de la densidad estelar. Las masas, posiciones y velocidades de las estrellas del cúmulo vienen determinadas por una condición: que el cúmulo empiece en un *equilibrio virial*. Se trata de una propiedad general de los sistemas ligados: el valor absoluto de la energía potencial del cúmulo duplica la energía cinética del sistema. Queda definido así el cúmulo en una "edad cero" en la que todas las estrellas ya estaban formadas y no había gas residual.

Una vez se ha descrito el sistema, las partículas (estrellas y planetas) interactúan conforme a la física newtoniana —se calcula la fuerza sobre cada partícula y corrige su posición y velocidad en la siguiente fracción del tiempo—; también hay que tener en cuenta la evolución de las estrellas sueltas y de las binarias.

Ese devenir tiene lugar en el contexto de varios procesos astrofísicos que se incluyen en los cálculos (véase la figura 5). Así, consideramos la evolución del cúmulo mismo, con el desplome que sufre su centro (el aumento progresivo de la densidad del núcleo central) a medida

que el cúmulo pierde estrellas (se evaporan) debido a las fuerzas de marea de la galaxia. Creemos que este esquema nos proporciona una imagen de qué les va ocurriendo a los cúmulos globulares de cientos, miles o millones de estrellas.

Ejecutamos tres simulaciones con 22.000 estrellas del cúmulo y de 2000 a 3000 planetas del tamaño de Júpiter. (El 10% de las estrellas eran sistemas binarios.) Las simulaciones diferían entre sí, ligeramente, en la metalicidad y en la separación orbital de planetas y estrellas progenitoras. Cada simulación evolucionó hasta una edad de 4500 millones de años, la de nuestro sistema solar.

La suerte de los planetas, cada uno ligado originalmente a su estrella, fue dispar. Después de 4000 millones de años —cuando sólo quedaba un 25% de la masa total inicial del cúmulo—, el 10% de los planetas se había liberado de sus estrellas progenitoras; de ese 10%, un 13% aún permanecía dentro del cúmulo. Casi el 66% de los planetas abandonaron el cúmulo sin dejar de orbitar alrededor de sus estrellas; un 1%, más o menos, fue tragado por su estrella progenitora; un 4% pasó a girar alrededor de otra estrella.

Los resultados también muestran que los planetas en órbitas grandes —a unas 50 unidades astronómicas de sus estrellas centrales (una unidad astronómica es la distancia media entre el Sol y la Tierra)— tienen una probabilidad 10 veces mayor de separarse de sus estrellas que los planetas que orbitan a tan sólo una unidad astronómica. Aunque los planetas se liberan sobre todo en el núcleo denso del cúmulo, casi la mitad se desprende con una velocidad inferior a la velocidad de escape del cúmulo; es decir, la mayoría de los "cuerpos errantes" se convierten en huérfanos en el seno del cúmulo y se difunden lentamente hacia las regiones más externas. Dentro del cúmulo, la posición media de los planetas libres cae justo más allá del radio de semimasa (el radio en cuyo intervalo reside la mitad de la masa del cúmulo). Los planetas tardan unos 200 millones de años en sobrepasar, partiendo del centro, el radio de masa media del cúmulo.

Entre los sistemas planetarios que escapan del cúmulo globular, la mayoría es arrastrada por el campo de marea galáctico que barre las estrellas de las regiones externas del cúmulo. Un número menor de estrellas y planetas son expulsados del cúmulo cuando alcanzan la velocidad de escape tras haber sufrido encuentros con otras estrellas, si bien la mayoría de esas aproximaciones terminan en la liberación de un planeta, no en la expulsión del cúmulo.

Estos resultados dan a entender que los cúmulos globulares podrían conservar un buen número de objetos aislados del tamaño de Júpiter incluso después de miles de millones de años de choques y encuentros estelares.

Todavía es demasiado pronto para comprender el alcance de los resultados del estudio de 47 Tucanae. Se ha sugerido últimamente que las futuras exploraciones en busca de sistemas planetarios se realicen en cúmulos menos densos que 47 Tucanae, en cúmulos abiertos ricos en metales. Por ahora, no está claro si la carencia de planetas calientes en 47 Tucanae obedece a su baja metalicidad o a las interacciones dinámicas desarrolladas en su interior.

## Bibliografía complementaria

- PLANETS IN 47 TUC. M. B. Davies y S. Sigurdsson, en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 324, págs. 612-616; 2001.
- FREE-FLOATING PLANETS IN STELLAR CLUSTERS? K. W. Smith e I. A. Bonnell, en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 322, págs. L1-L4; 2001.
- FREE-FLOATING PLANETS: NOT SO SURPRISING. R. J. Hurley y M. M. Shara, en *The Astrophysical Journal*, vol. 565, págs. 1251-1256; 2002.
- A RE-EXAMINATION OF THE 'PLANETARY' LENSING EVENTS IN M22. K. C. Sahu, J. Anderson e I. R. King, en *The Astrophysical Journal*, vol. 565, págs. L21-L24; 2002.
- THE GRAVITATIONAL MILLION-BODY PROBLEM. D. C. Heggie y P. Hut. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.