

INVESTIGACION *y* CIENCIA

JULIO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Hidrógeno metálico

BOSQUE MEDITERRANEO

LA PLATA DEL PERU

ASTEROIDES



SECCIONES

3

HACE...

50, 100 y 150 años.

36

PERFILES

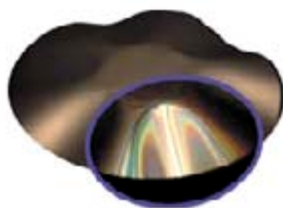
Günter Blobel:
el biólogo y la catedral.



38

CIENCIA Y SOCIEDAD

Aerogeles...
Serotonina y adicción...
Polen...
El arrugado del papel...
Genética vegetal...
Epidemiología española,
enfermedades
cardiovasculares.



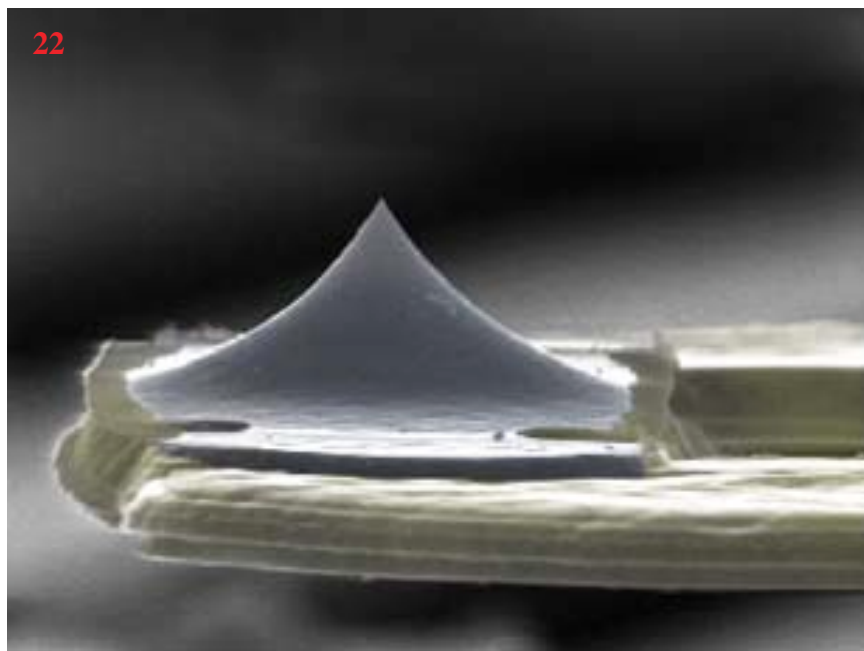
46

DE CERCA

El bosque animado.



22



La crisis de las memorias masivas

Jon William Toigo

El perfeccionamiento de los discos magnéticos, más veloz todavía que el de los semiconductores, tiene ante sí una barrera física. Nuevas técnicas de IBM, Seagate, Hewlett-Packard y otros fabricantes permitirán eludir el problema.

Planetas en miniatura

Erik Asphaug

Las nuevas imágenes de las sondas espaciales nos acercan por primera vez a los asteroides, esos diminutos mundos que encierran la clave de cómo se formaron los planetas. Sorprende descubrir que muchos asteroides se asemejan más a montones de grava que a rocas sólidas.

4



14

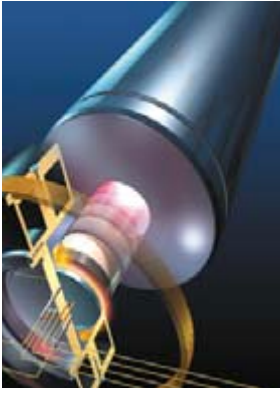


Problemas de la masificación

*Frans B. M. de Waal, Filippo Aureli
y Peter G. Judge*

Según un mito muy arraigado, la alta densidad de población engendraría violencia. Esto parece ser cierto entre los roedores, pero los humanos y otros primates tienen especiales comportamientos que les ayudan a seguir siendo sociables cuando escasea el espacio vital.

48



Metalizar el hidrógeno

William J. Nellis

Recreando condiciones tan extremas como las que se dan en el núcleo de Júpiter, por fin se ha logrado convertir el hidrógeno en metal. Este hidrógeno metálico podría provocar revolucionarios cambios en la electrónica, la energía y la ciencia de materiales.

56

La plata del Perú

Alain Gioda y Carlos Serrano

Entre 1590 y 1600 Potosí produjo más del 40 por ciento de la plata mundial. Una red de lagunas y diques construida por españoles aportó la energía hidráulica necesaria.



62



La reproducción de experimentos históricos

Peter Heering, Falk Riess y Christian Sichau

Para descubrir qué condiciones ejercieron una influencia decisiva en el éxito de los experimentos básicos de la historia de la ciencia es inevitable la repetición de los mismos.

70

Lluvia y bosque mediterráneo

Juan F. Gallardo Lancho, M. Amparo Vicente y Gerardo Moreno

El agua de lluvia incidente en un ecosistema cambia de composición y volumen hasta reaparecer en superficie, tras su paso por el suelo.



78



Las tinturas naturales

Dominique Cardon

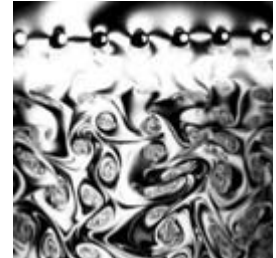
Sustituidas por los colorantes artificiales desde hace un siglo, las tinturas naturales vuelven a despertar el interés de industriales, químicos y arqueólogos.

SECCIONES

84

TALLER Y LABORATORIO

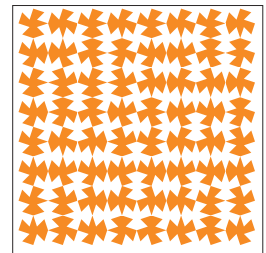
Turbulencia en dos dimensiones, por Shawn Carlson



86

JUEGOS MATEMÁTICOS

Mosaicos iterativos no periódicos, por Ian Stewart



88

IDEAS APLICADAS

Gasolineras de autoservicio, por Marguerite Holloway.

90

NEXOS

“¡Qué frescura!”, por James Burke.

92

LIBROS

Ciencia medieval... Derivadas parciales y física teórica.





Portada: Bryan Christie

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA
6	Laurie Grace, fuente: Petr Pravec
7	Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA
8-9	Scott Hudson (<i>Castalia</i>), Ben H. Zellner y NASA (<i>Vesta</i>), Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA (<i>Eros y Mathilde</i>), NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro (<i>Gaspra e Ida</i>)
10-11	Bryan Christie
12	NASA/JPL
14-15	Brian Peterson, <i>Weststock</i>
16-17	Frans B. M. de Waal (<i>fotografías</i>); Bryan Christie (<i>gráficos</i>)
18	Chuck Savage, <i>The Stock Market (fotografía)</i> ; Bryan Christie (<i>gráficos</i>)
19	Frans B. M. de Waal
22	Tom Draper Design, fuente: <i>Magnetic Recording: The first 100 years</i> , editado por E. D. Daniel et al, IEEE Press, 1999
23	Bryan Christie, fuente: Disk/Trend
24-25	George Retseck, fuente: <i>How Computers Work</i> de Ron White, cuarta edición, Que Corporation, 1998
26-27	George Retseck
28	George Retseck, fuente: <i>How Computers Work</i> de Ron White, cuarta edición, Que Corporation, 1998
29	George Retseck; IBM (<i>micrografía</i>)
31	George Retseck
32	George Retseck; HEWLETT-PACKARD (<i>micrografía</i>)
33	George Retseck; IBM (<i>micrografía</i>)
49	Slim Films
50-51	Slim Films (<i>arriba y derecha</i>); cortesía de William J. Nellis (<i>fotografía</i>)
52-54	Slim Films
57-60	Carlos Serrano
62-69	Spektrum der Wissenschaft
71-75	Juan F. Gallardo Lancho, M. Amparo Vicente y Gerardo Moreno
78	D. Cardon (<i>arriba</i>); Fundación Abegg, Riggisberg, Suiza (<i>abajo</i>)
79	Museo Histórico de Tejidos, Lyon
80	D. Cardon
81	Gaëtan du Chatenet
82	Paul Starosta (<i>izquierda</i>); D. Cardon (<i>centro y derecha</i>)
83	D. Cardon
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
88-89	Bryan Christie, fuente: Husky Corporation

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Planetas en miniatura*; José M. García de la Mora: *Problemas de la masificación*; Luis Bou: *La crisis de las memorias masivas y Juegos matemáticos*; Carlos Serrano: *La plata del Perú*; Jürgen Goicoechea: *La reproducción de experimentos históricos*; Agustí Nieto Galán: *Las tinturas naturales*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee,

George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette

PRODUCTION William Sherman

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:

Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 2000 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2000 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocopros reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TABACO: UN INFORME DECISIVO. «A menudo se ha sospechado del tabaco como cómplice en el gran aumento del cáncer de pulmón desde 1900. Pero las pruebas eran fragmentarias y contradictorias. Un informe sólidamente documentado publicado en *Journal of the American Medical Association* presenta lo que parece ser la prueba más convincente de que fumar puede causar cáncer. Ernest L. Wynder y Everts A. Graham, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, han descubierto en una encuesta a escala nacional sobre 605 varones con cáncer de pulmón que un 96,5 por ciento de éstos fumaron al menos 10 cigarrillos diarios durante muchos años, mientras que en la población hospitalaria masculina general sin cáncer sólo resultaron ser fumadores un 73,7 por ciento.»

PLUTÓN. «El más exterior de los planetas del sistema solar tiene una masa 10 veces menor de lo que se creía, según las mediciones de Gerard P. Kuiper, del Observatorio Yerkes, efectuadas con el telescopio de 508 cm de monte Palomar. Tomando como base las desviaciones en la trayectoria del planeta Neptuno, atribuidas a la atracción gravitatoria de Plutón, solía estimarse que la masa de éste era aproximadamente la de la Tierra. Kuiper ha sido el primer humano en considerar a ese planeta como algo más que un punto luminoso. Según sus cálculos, Plutón tiene un diámetro de unos 5800 kilómetros y una

masa que es la décima parte de la terrestre. Queda por resolver el misterio de las perturbaciones de Neptuno, demasiado grandes para que sea responsable de ellas un planeta tan pequeño como Plutón.»

CODICIA. «¿Es la avaricia una tendencia natural o un hábito adquirido? Louise C. Licklider y J. C. R. Licklider, psicólogos de Harvard, dieron a seis ratones todas las píldoras de purina que pudieron comer. Aunque ninguno de los animalitos había hasta entonces padecido falta de comida, todos empezaron enseguida a acumular píldoras. Los Licklider refinaron el experimento envolviendo en papel de aluminio la mitad de las píldoras, inutilizándolas así como alimento. Descubrieron entonces que cuatro de los seis avariciosos ratones prefirieron acumular las inútiles píldoras incomedibles.»

...cien años

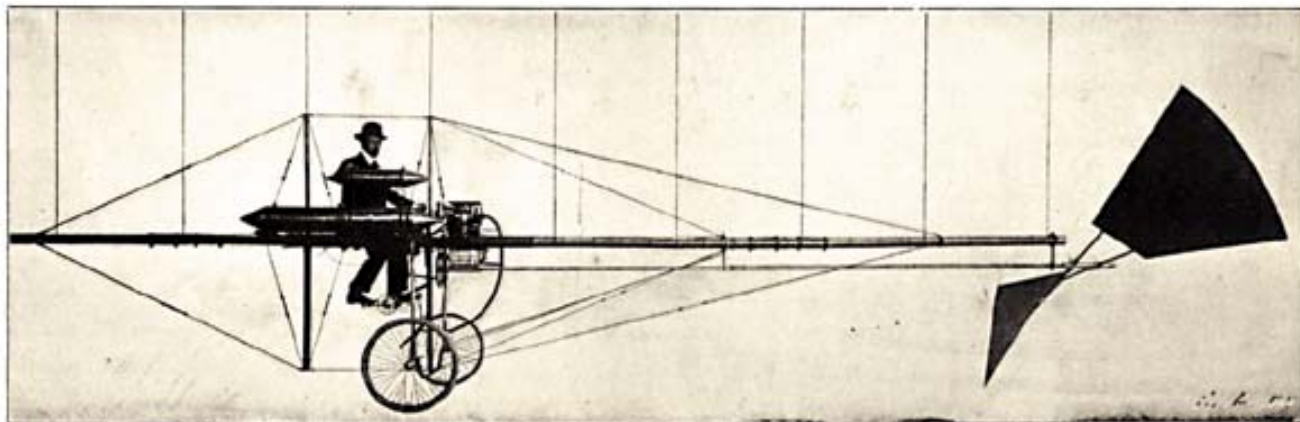
AERONAUTA PIONERO. «M. De Santos Dumont [*sic*] terminó recientemente la nueva nave aérea con la que competirá por el premio Deutsch del Aero Club para el primer vuelo desde el Bois de Boulogne hasta la Torre Eiffel y vuelta. El aeronauta y su mecanismo propulsor cuelgan de una funda rellena de gas (*véase ilustración*). El motor de gasolina arranca mediante un pedal y una transmisión por cadena. El cilindro superior contiene gasolina para el motor y en el inferior hay un depósito de agua que sirve de lastre.» [*Nota de la Redacción: El brasileño Alberto Santos Dumont*

ganó el premio Deutsch el 19 de octubre de 1901.]

...ciento cincuenta años

EL INVEROSÍMIL PHINEAS GAGE. «El profesor Bigelow, de la Universidad de Harvard, nos facilita las últimas noticias sobre un muchacho de nombre Phineas P. Gage al que una enorme barra de hierro atravesó el cerebro en septiembre de 1848 y que, por raro que parezca, *vive* y goza de buena salud. 'Lo más característico de este caso', dice el profesor Bigelow, 'es su inverosimilitud'. Afirma el profesor B. que él fue 'al principio un escéptico radical', pero que personalmente se convenció. El señor Gage visitó Boston en enero y durante algún tiempo estuvo bajo observación del profesor, quien le rasuró la cabeza y tomó un molde de ésta, el cual, junto con el hierro agresor, se halla ahora depositado en el Museum College.»

NUEVO RUMBO DE LA NATURALEZA. «No hace sino un poco más de veinte años que el primer cuervo atravesó el río Genesee en dirección a poniente. El cuervo, el zorro, el halcón gallinero, la golondrina y otras aves e insectos parecen acompañar a la civilización. El gorgojo del grano inició su curso de destrucción en Vermont en torno al año 1828 y avanza de quince a veintidós kilómetros al año. Aún no ha llegado al oeste de Nueva York, pero la plaga sigue su marcha y la desolación se cierne sobre la región triguera.»



Alberto Santos Dumont a bordo del grupo propulsor que cuelga de su globo dirigible; año 1900

Planetas

en miniatura

En los asteroides actúa un delicado entramado de pequeñas fuerzas que no admiten fácil simulación en los laboratorios terrestres

Erik Asphaug

Mis amigos y yo, niños de la era espacial, solíamos divertirnos con el juego de la gravedad. A la voz de “¡En la Luna!”, nos poníamos a imitar las zancadas, lentas y torpes de los astronautas vistas en la televisión. Si la orden era: “¡En Júpiter!”, nos arrastrábamos a gatas. Pero a nadie se le ocurría gritar: “¡En un asteroide!” En aquellos días de antes de las películas espaciales, ¿quién iba a saber qué era un “asteroide”? Ahora que soy mayor y me gano la vida estudiándolos, aún no sé qué responder.

Pese a que no hemos visto todavía de cerca ninguno de los mayores, lo más probable es que parezcan copias canijas y zurradas de la Luna. La diferencia estaría en que, al ser menor su gravedad, los astronautas darían allí zancadas más largas, nada más. Pero con diámetros de menos de unas docenas de kilómetros, la gravedad es demasiado débil para conferir a esos planetas menores, así se los llama también, una conformación siquiera sea aproximadamente redonda. Los mundos de menor tamaño presentan formas de todos los gustos: cabezas de lagarto, judías, muelas, cacahuetes y cráneos. Debido a su irregularidad, es frecuente que la atracción de la gravedad no apunte al centro de masas. Cuando a esto se suman las fuerzas centrífugas causadas por la rotación, el resultado parece absurdo. Abajo a lo mejor no sería abajo. Quizá nos cayésemos ladera arriba de una montaña. O saltásemos demasiado alto y no volviésemos a tocar tierra, sino entráramos en una órbita caótica (majestuosamente lenta, eso sí) durante días antes de aterrizar en un lugar impredecible. Si tirásemos una piedra, lo mismo regresaría como un bumerán. Un suave salto vertical podría llevarnos a tocar el suelo cien metros a la izquierda, o incluso modificar la estructura del asteroide bajo nuestros pies. Hasta el visitante más felino y sigiloso levantaría una polvareda y

dejaría tras de sí una “atmósfera” de restos en suspensión durante días o semanas.

Las misiones espaciales, en concreto la sonda NEAR (de *Near Earth Asteroid Rendezvous*, “Encuentro con asteroides cercanos a la Tierra”), la primera en entrar en órbita alrededor de un planeta menor, están modernizando a pasos agigantados nuestra percepción de estos desconcertantes objetos. Sin embargo, pese a las meticolosas observaciones que se han realizado y a la proximidad de algunos asteroides a la Tierra, sabemos mucho menos acerca de ellos (y de sus primos los cometas) de lo que sabíamos sobre la Luna cuando empezaba la exploración espacial. En los planetas menores actúa un delicado entramado de pequeñas fuerzas, y ninguna puede ignorarse ni simularse fácilmente en los laboratorios terrestres. Por dentro, ¿son sólidos o meros ensamblajes de componentes? ¿De qué minerales constan? ¿Cómo sobreviven a las colisiones con otros cuerpos? ¿Podrían desenvolverse en su extraña superficie un astronauta o una sonda de aterrizaje?

Planetas a medio hacer

Empecé el doctorado durante la Administración Bush, cuando los asteroides eran simples manchas, mil puntos de luz que orbitaban entre Marte y Júpiter. Era conocida la existencia de algunas poblaciones menores no tan lejos de la Tierra, y en el Gran Más Allá estaban además los cometas. A partir de las variaciones periódicas del color y del brillo se dedujo que se trataba de cuerpos irregulares cuya envergadura iba de la de una casa a la de una comarca y que giraban alrededor de sí mismos en unas horas o días. Propiedades más detalladas quedaban para la imaginación científica.

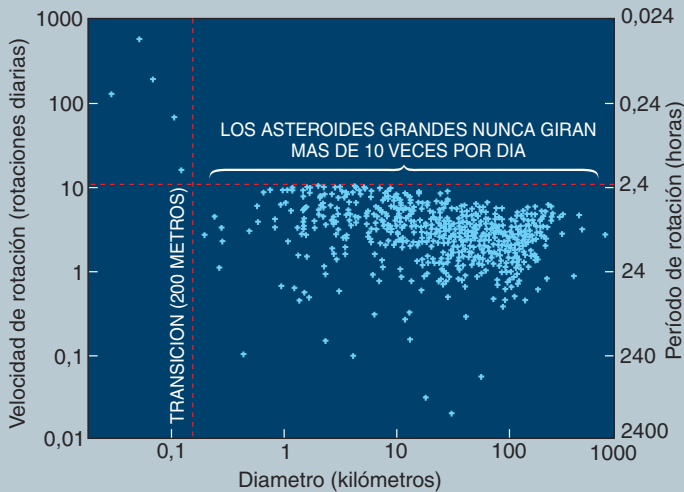
Los asteroides más cercanos a Marte y la Tierra presentan por lo común espectros característicos de una mezcla de minerales rocosos y hierro, mientras que los próximos a Júpiter son en general oscuros y rojizos, señal de una composición primitiva, diferenciada sólo groseramente de la que tuvo la nebulosa primordial donde empezaron a formarse los planetas hace 4560 millones de años. Esa fecha se determina con precisión mediante el análisis de los isótopos del plomo —producidos por la desintegración radiactiva del uranio— que se hallan en

ERIK ASPHAUG, premio Urey de astronomía e investigador de la Universidad de California en Santa Cruz, recrea simulaciones de colisiones entre asteroides en un supercomputador Cray T3E.

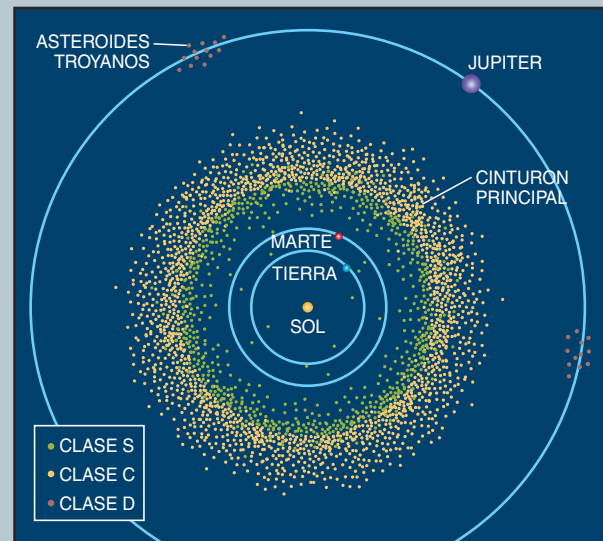


HUELLA GIGANTE DE GARRA es el nombre que recibe un extraño cráter (*en el centro de la imagen inferior*) de Eros, un asteroide de 33 kilómetros de largo, sometido a observación con la sonda NEAR. En la cara opuesta hay una entalladura de reciente formación, con forma de silla de montar (*imagen superior izquierda*), cubierta de marcas inexplicables. Gracias a imágenes como éstas los asteroides van dejando de ser objetos astronómicos —meros puntos de luz— para convertirse en objetos geológicos, mundos enteros cuya exploración no ha hecho más que empezar.

Por dónde se mueven



DOS GRUPOS DE ASTEROIDES se distinguen al representar sus velocidades de rotación (*eje vertical*) en función del tamaño (*eje horizontal*). No se conoce ningún asteroide de más de 200 metros de diámetro que gire más de una vez cada 2,2 horas. El punto de corte es de fácil explicación si estos asteroides son pilas de cascotes, que se disgregarían si girasen demasiado deprisa. Los asteroides más pequeños, que rotan una vez cada pocos minutos, tienen que ser rocas sólidas. La transición se debe seguramente a las colisiones.



LOS ASTEROIDES DEL CINTURON PRINCIPAL se encuentran entre las órbitas de Marte y Júpiter, pero los más desperdigados cruzan la órbita terrestre (y a veces chocan con la Tierra) o giran sincronizados con Júpiter (en dos grupos conocidos como asteroides troianos). La parte interior del cinturón principal contiene sobre todo asteroides de roca o roca y hierro (tipo S); hacia su exterior son más oscuros, rojizos y ricos en carbono (clases C y D).

las muestras más antiguas de los meteoritos más primitivos. Hace mucho que se sospecha que los meteoritos proceden de los asteroides. Los espectros de ciertos meteoritos son casi idénticos a los de determinados tipos de asteroides. Tenemos, pues, en nuestro poder fragmentos de asteroide.

Muchos astrónomos pensaban que las observaciones telescópicas, combinadas con el análisis de los meteoritos, podrían suplir la exploración de los asteroides con vehículos espaciales. Aunque los puntos difíciles resultaron ser mucho más duros de lo esperado, se ha avanzado un bosquejo provisional de la historia del sistema solar. Para que los planetas acreciesen a partir de una nebulosa de gas y polvo, tuvo forzosamente que haber una etapa inicial de agregación de los primeros granos minúsculos en cuerpos cada vez mayores, los planetesimales, los bloques con que se construirían los planetas. Sin embargo, las resonancias gravitatorias con el enorme Júpiter, que removían el caldero en la zona que se extiende más allá de Marte, impidieron que los cuerpos superaran los mil kilómetros de diámetro; quedaron restos sueltos que se convertirían en los actuales asteroides.

No obstante, los mayores de estos aspirantes a planeta acumularon can-

tidad suficiente de calor interno y adquirieron su propia estructura: los metales densos se infiltraron hacia el interior, fueron acumulándose allí y quizá formaron núcleos, dejando tras de sí, en las capas externas, residuos de roca más ligeros. La actividad ígnea produjo metamorfosis adicionales de sus tipos de roca, y en algunos de ellos hubo erupciones volcánicas. Aunque ninguno creció lo bastante como para retener una atmósfera, los minerales hidratados descubiertos en algunos meteoritos revelan que a menudo contenían agua líquida.

Los encuentros de los planetesimales aumentaron su violencia a medida que Júpiter provocaba que la orientación y la elipticidad de sus órbitas se volvieran más aleatorias. Los planetas en ciernes dejaron de crecer; las colisiones entre ellos los cincelaban o hacían saltar en mil pedazos. Los fragmentos siguieron a menudo girando alrededor del Sol en familias con características orbitales comunes y espectros afines. Muchos asteroides y meteoritos representan los restos ricos en roca o metal de esos protoplanetas de estructura diferenciada. Otros asteroides (y la mayoría de los cometas) son cuerpos más primitivos que, por varias razones, nunca se diferenciaron. Son ves-

tigios de una época anterior a la existencia de los planetas.

El cielo se viene abajo

Diez años atrás, no había imágenes de los asteroides con detalles aprovechables. Los astrónomos se resistían a prestarles atención. Los primeros, descubiertos a principios del siglo XIX, recibieron resonantes nombres mitológicos. Pero hallados una decena, una centena y un millar les fueron cayendo los nombres de los descubridores y luego los de sus esposas, benefactores, colegas y perros. En la actualidad, tras un siglo de negligencia, se está generando un interés renovado porque gracias a las nuevas observaciones van dejando de ser débiles centelleos en el cielo y se nos muestran como asombrosas formaciones minerales. Los expertos en asteroides deben agradecerse al administrador de la NASA, Daniel S. Goldwin, y a los dinosaurios.

El lema de Goldwin —“más rápido, mejor y más barato”— ha sido una bendición para la ciencia de los asteroides, por la sencilla razón de que visitar un vecino minúsculo es más rápido y barato que una misión a un planeta de verdad. El espectro de un apocalipsis ígneo también ha fomentado el interés. El descubrimiento del

cráter Chicxulub en el Yucatán respaldó la idea de que el impacto de un asteroide o cometa hace 65 millones de años borró de la faz de la Tierra bastante más de la mitad de las especies que la habitaban.

Que se repita el fenómeno es sólo cuestión de tiempo; pero, ¿cuánto? Hasta que no se cataloguen todos los asteroides cercanos a la Tierra, y sólo hemos empezado a hacerlo, deberemos contentarnos con analogías sacadas del póquer. (Nunca llegaremos a catalogar los cometas peligrosos, porque cada cometa visita el sistema solar interior sólo en raras ocasiones.) La probabilidad de que suceda una calamidad planetaria en un año determinado es más o menos como la de sacar una escalera de color al as; la probabilidad anual de que el lector de estas líneas muera por otros motivos en un año dado viene a ser la de recibir un trío. Es sumamente improbable que alguno de nosotros muera por el impacto de un asteroide. Sin embargo, hasta a los científicos les atrae la idea de un apocalipsis; con excesiva frecuencia caracterizan a los asteroides por su capacidad explosiva medida en megatonnes, no por su diámetro.

Acicateados por esta curiosidad inquieta entramos en la edad de oro de la exploración de cometas y asteroides. Se han tomado imágenes de más de una docena. Cada nuevo miembro recibe una acogida calurosa, aunque no exenta de perplejidad. Estos objetos no son lo que esperábamos. Según las predicciones, los asteroides de pequeño tamaño serían compactos y rocosos, y cualquier material superficial suelto (o regolito) que creasen los impactos escaparía de su débil gravedad. Créase que no existirían cuerpos pequeños compuestos porque el más leve movimiento relativo persistente los disgregaría.

Reducidos a cascotes

Sin embargo, las observaciones y los modelos indican lo contrario. Ahora se sostiene que la mayoría de los asteroides de más de un kilómetro están compuestos de fragmentos menores. A los que se les han tomado imágenes de alta resolución, se les han visto indicios de una cantidad copiosa de regolito, pese a su débil gravedad. La mayoría presenta uno o dos cráteres enormes, algunos más anchos que el radio medio del objeto entero. Semejantes impactos no excavarían un hoyo en un cuerpo monolítico; lo despedaza-



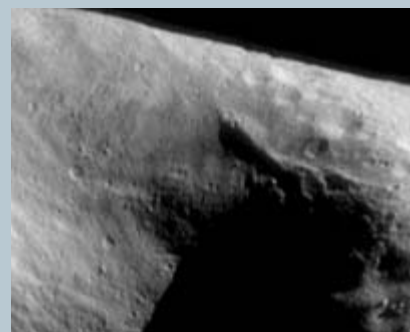
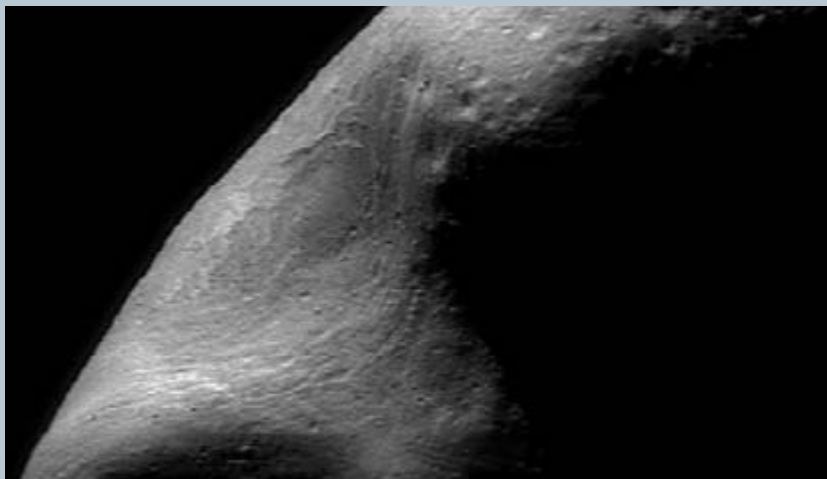
NEAR corteja a Eros

Una roca preciosa

La nave espacial NEAR está ahora en órbita alrededor de Eros, un asteroide que parece un barco de proa estrecha y popa ancha, con un cráter prominente en la cubierta cóncava. La abundancia de restos, en forma de bloques amontonados, alrededor de ese cráter manifiesta la influencia de la gravedad durante su formación. En su interior hay un peñasco que se ha quedado a mitad de camino, como si no supiera dónde está arriba y dónde abajo. A la cara opuesta ha ido a parar otro peñón, tan voluminoso que forma parte del perfil general de Eros. Si lo creó un impacto, como parece probable, Eros debió de quebrarse en ese momento en unas pocas grandes piezas, recubiertas de fragmentos y residuos de menor tamaño.

El nombre "Eros" le queda muy bien, dado su recatado coqueteo con la Tierra. Por desgracia, esta historia de amor podría terminar mal. Paolo Farinella, de la Universidad de Trieste, y Patrick Michel, del Observatorio de Niza, han calculado que Eros tiene un 5% de probabilidades de chocar con la Tierra en los próximos mil millones de años y el impacto sería mayor que el que produjo la extinción de los dinosaurios.

NI ROCA COMPACTA NI AMASIJO DE POLVO, sino un conglomerado de varias piezas principales, cruzadas por fallas, escarpas y crestas, eso es Eros. La estructura de mayor tamaño es una concavidad suave, con ausencia casi total de cráteres (abajo). El cráter más prominente —la "huella de garra", de seis kilómetros de ancho— presenta grandes depósitos en el borde, señal de que la gravedad rigió su formación (centro izquierda). Una cresta muy empinada, que corre paralela a las marcas lineales, recuerda la producción de fallas en un material coherente (centro derecha). El asteroide rota una vez cada cinco horas y media (abajo).



rían. También apoyan la teoría de los fragmentos las mediciones disponibles de las densidades globales. Los valores, demasiado bajos, dan a entender que están atravesados por vacíos de tamaño desconocido.

En resumen, aunque los asteroides que superan el kilómetro de diámetro parezcan peñascos de roca com-

pacta, lo más seguro es que sean ensamblajes de piezas o incluso pilas de cascote suelto, tan fragmentado que no haya roca firme. De esta última posibilidad ya hablaron hace veinte años Don Davis y Clark Chapman, ambos por entonces en el Instituto de Ciencia Planetaria de Tucson, pero no se les pasó por la cabeza

que eso pudiera predicarse de asteroides con diámetros tan exiguos.

Poco después de que la nave NEAR pasase hace tres años, de camino a Eros, junto al asteroide Mathilde, Eugene Shoemaker (tras cuya desaparición se ha rebautizado NEAR con su nombre) comprendía que sus enormes cráteres y baja densidad

Visitas a los asteroides

Sinfonía roqueña

CASTALIA

Número oficial de catálogo: 4769
Dimensiones: 1,8 x 0,8 kilómetros
Densidad: 2,1 gramos por centímetro cúbico (superficie)
Tipo de órbita: cruza la órbita terrestre
Clase espectral: S
Rotación: 4 horas

Castalia fue el primer asteroide del que se tomaron imágenes. En agosto de 1989 se aproximó a la Tierra a menos de 11 veces la distancia de ésta a la Luna (demasiado lejos todavía para observarlo con telescopios ópticos, pero al alcance del radar). Steven J. Ostro y su equipo del Laboratorio de Propulsión a Chorro apuntaron a él los potentes y precisos haces del mayor radiotelescopio del mundo (Arecibo). La forma de cacahuete de Castalia sugiere que, pese a una gravedad muy débil, lo componen dos fragmentos de 800 metros de diámetro, en reposo entre sí. Las señales de radar reflejadas en otros asteroides que cruzan la órbita terrestre indican que estas configuraciones binarias de contacto son comunes.

EROS

Número oficial de catálogo: 433
Dimensiones: 33 x 13 x 13 kilómetros
Densidad: 2,7 gramos por centímetro cúbico
Tipo de órbita: cercana a la Tierra
Clase espectral: S
Rotación: 5,27 horas

GASpra

Número oficial de catálogo: 951 Dimensiones: 19 x 12 x 11 kilómetros
Densidad: desconocida Tipo de órbita: cinturón principal (familia Flora)
Clase espectral: S
Rotación: 7,04 horas

Gaspra fue el primer asteroide visitado por una nave espacial: Galileo pasó cerca en 1991, de camino a Júpiter. Para algunos, la media docena de concavidades que presenta no son cráteres, sino facetas que se crearon cuando Gaspra se desprendió de su asteroide progenitor. Por otra parte, dada la débil e irregular gravedad de Gaspra, es natural que los mayores cráteres de impacto adopten una configuración plana y asimétrica.

TOUTATIS

Número oficial de catálogo: 4179
Dimensiones: 4,5 x 2,4 x 1,9 kilómetros
Densidad: 2,1 gramos por centímetro cúbico (superficie)
Tipo de órbita: cruza la órbita terrestre
Clase espectral: S
Rotación: Dos períodos combinados (5,41 y 7,35 días)

Desde las primeras observaciones de Castalia se han presentado oportunidades mejores para estudiar los asteroides por radar; la más notable fue la que brindó el asteroide Toutatis. Con una fuerte influencia de la gravedad terrestre, su órbita es caótica. Se bambolea con dos tipos de movimiento que, al combinarse, crean una rotación no periódica. Un visitante nunca contemplaría el mismo horizonte por segunda vez. El 29 de septiembre de 2004 Toutatis se acercará a la Tierra a menos de 4 veces la distancia entre la Tierra y la Luna y podrá observarse con la ayuda de binoculares.

sólo podrían explicarse juntos: un cuerpo poroso, como una pila de cascotes, soporta los impactos mucho mejor que otro compacto. Absorberá y disipará una importante fracción de la energía del choque; la cara opuesta apenas si se enternecerá. Una buena comparación es una bala disparada contra un saco de tie-

rra, frente a lo propio contra un jarro de cristal.

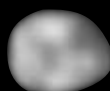
¿Y las formas tan irregulares de la mayoría de los asteroides? La intuición nos dice que una topografía tan errática denota solidez. Pero las primeras impresiones resultan engañosas. Cuando se miden las pendientes regionales con relación a esa

gravedad como de videojuego, no hay imagen de un asteroide o cometa en que aparezca alguna que sobrepase el ángulo de reposo típico (unos 45 grados), o inclinación a la que los fragmentos sueltos empiezan a caer cuesta abajo. En las regiones más empinadas vemos deslizamientos de residuos. En otras palabras, los ob-

VESTA

Número oficial de catálogo: **4**
Dimensiones: **525 kilómetros de diámetro**
Densidad: **3,3 gramos por centímetro cúbico**
Tipo de órbita: **cinturón principal**
Clase espectral: **V**
Rotación: **5,34 horas**

Entre los asteroides grandes, sólo Vesta presenta una superficie de roca basáltica generada por antiguos torrentes de lava. En su pasado remoto se diferenciaron dos capas y sufrió muchos de los procesos geológicos que se dieron en los primeros tiempos de Marte y la Tierra. Debieron de existir hace mucho docenas de cuerpos como éste, pero se fragmentaron y crearon familias de asteroides menores. Se piensa que los meteoritos de hierro proceden de los núcleos de esos cuerpos despedazados; los ígneos vendrían de los mantos y cortezas. El telescopio espacial *Hubble* obtuvo en 1996 esta imagen de Vesta, donde se ve un colosal cráter de 430 kilómetros de diámetro que tiene una antigüedad de quizá mil millones de años; puede que los asteroides pequeños de tipo V que observamos hoy día procedan de ese cráter.



MATHILDE

Número oficial de catálogo: **253**
Dimensiones: **66 x 48 x 46 kilómetros**
Densidad: **1,3 gramos por centímetro cúbico**
Tipo de órbita: **cinturón principal**
Clase espectral: **C**
Rotación: **17,4 días**

Yendo NEAR de camino a Eros se produjo el primer encuentro de una nave espacial con un asteroide primitivo de tipo C. Este objeto esferoidal, negrísimo, es el mayor asteroide de los visitados hasta ahora y uno de los que giran más lentamente. Su órbita excéntrica se extiende hasta los confines más remotos del cinturón principal. Mathilde desvió un poco la trayectoria de NEAR; así nos reveló su masa. La densidad correspondiente es menos de la mitad de la de los meteoritos más parecidos, las condritas carbonáceas; por tanto, si Mathilde está compuesto del mismo material, debe tener una estructura muy holgada. Lo mismo puede decirse de Eugenia, otro asteroide de tipo C, estudiado recientemente por medio de un telescopio terrestre dotado de una refinada óptica adaptativa.

Los cráteres gigantes son sorprendentes: algunos tienen un radio superior al radio medio de Mathilde y, sin embargo, están desprovistos de los bordes o depósitos de material expulsado característicos de los cráteres grandes en otros mundos. Así mismo, ninguno de los cráteres ha sido degradado por la creación de cráteres posteriores; ni siquiera podemos saber qué impactos tuvieron lugar primero y cuáles después.



IDA & DACTYL

Número oficial de catálogo: **243**
Dimensiones: **56 x 24 x 21 kilómetros**
Densidad: **aproximadamente 2,5 gramos por centímetro cúbico**
Tipo de órbita: **cinturón principal (familia Koronis)**
Clase espectral: **S**
Rotación: **4,63 horas**

Dos años después de visitar Gaspra, la sonda *Galileo* se aproximó a este asteroide del cinturón principal. Una feliz sorpresa fue el descubrimiento de Dactyl, el primer satélite de un asteroide que se haya conocido, de sólo 1,4 kilómetros de diámetro. El equipo de la *Galileo* se sirvió de la órbita de Dactyl para calcular la masa de Ida. La densidad inferida es mucho menor que la del tipo de meteorito con el que ese asteroide guarda mayor relación (una condrita normal), así que, o su composición es diferente, o es poroso. Creen algunos que Dactyl se formó por aglomeración de restos lentos arrojados de uno de los cráteres mayores de Ida, aunque, desde el punto de vista dinámico, es muy difícil que sucediera algo así. Daniel Durda, del Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder, mostró que Dactyl e Ida podrían haberse formado en pareja hace más de mil millones de años, al fragmentarse el progenitor de Ida. Pero es difícil explicar cómo Dactyl habría sobrevivido tanto tiempo sin ser destruido.



¿Sílex o cascote?

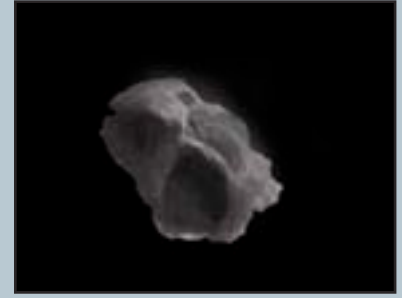
Impactos violentos



ASTEROIDE del tipo de pila de cascotes, cuya estructura fragmentada muestra las cicatrices de las colisiones sufridas. Recibe de nuevo el impacto de un asteroide pequeño y veloz, algo relativamente frecuente.



Sólo salta en el cuerpo agregado la zona que recibió el impacto. En pocos minutos escapan los restos más pequeños y rápidos. Los de mayor tamaño se alejan con parsimonia.



Algunos pedazos grandes escapan; otros regresan. Días más tarde torna la calma. Con el tiempo esa cicatriz estará cubierta de restos expelidos por bombardeos y otros procesos.

jetos pequeños podrían también estar compuestos por rocas o incluso arena, y aun así mantendrían su forma. Al fin y al cabo, las dunas presentan crestas muy definidas y, sin embargo, no puede decirse que sean monolíticas. La rotación rápida contribuiría a dar a una pila de escombros un aspecto alargado y con bultos.

La primera prueba directa que apoyó esta hipótesis de la escollera surgió en 1992, cuando el cometa Shoemaker-Levy 9 se acercó demasiado a Júpiter y se despedazó en dos docenas de fragmentos. Dos años más tarde, ese “rosario de cuentas” se estrelló contra el planeta gigante. Según un modelo que desarrollé con Willy Benz, de la Universidad de Berna, esta fragmentación del cometa sólo pudo ocurrir si constaba de cientos de gránulos sueltos que sufrieron una especie de lento corrimiento de tierras a escala cósmica. A medida que las fuerzas de marea de Júpiter estiraban el cometa, la gravedad formó cúmulos con esos gránulos, algo muy parecido a lo que sucede con el agua que cae en una fuente. Fundados en ese despedazamiento propusimos que los cometas eran una especie de estructuras granulares con una densidad igual a unos dos tercios la del agua helada. Lo que vale para los cometas quizá valga también para los asteroides.

Cuando nada importa, todo importa

La hipótesis de la pila de escombros o cascotes plantea considerables problemas conceptuales. La resistencia material de un asteroide

viene a ser nula; por su levedad se está tentado de despreciar también la gravedad. ¿Qué nos queda? La verdad es que no deben ignorarse ni aquella ni ésta. Por insignificante que pueda ser, la gravedad mantiene unida la escombrera. Todo el que haya hecho castillos de arena sabe que hasta un material tan suelto puede adquirir cohesión. Empiezan a tener significados detalles del movimiento que muchas veces se pasan por alto, como el rozamiento de deslizamiento, los enlaces químicos, el amortiguamiento de la energía cinética o la atracción electrostática. (De hecho, las partículas cargadas procedentes del Sol pueden producir la levitación de polvo de la superficie.) Apenas empezamos a entender la sutil interacción de estas fuerzas minúsculas.

El tamaño de un asteroide debería determinar qué fuerza domina. Una de las indicaciones al respecto es la pauta exhibida por las velocidades de rotación de los asteroides. Algunas colisiones hacen que giren más deprisa y otras más despacio. Si los asteroides fuesen rocas monolíticas expuestas a colisiones aleatorias, un gráfico de sus velocidades de rotación debería mostrar una distribución en forma de campana, con una “cola” estadística donde caerían los que rotasen muy deprisa. Sin embargo, si casi todos los asteroides son montones de cascotes no habrá esa cola; una pila de escombros que girase más de una vez cada dos o tres horas (dependiendo de su densidad global) saltaría en pedazos. Alan Harris, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, y Petr Pravec, de la Aca-

demia de Ciencias de la República Checa, han descubierto, con sus colaboradores, que, salvo cinco, todos los asteroides observados obedecen un límite de rotación estricto. Las excepciones tienen un diámetro inferior a 150 metros; se observa un corte brusco cuando el diámetro pasa de los 200 metros.

La conclusión evidente —que los asteroides de más de 200 metros de envergadura son estructuras con diversos componentes o pilas de cascotes— concuerda con los recientes modelos informáticos de las colisiones, que también predicen una transición en ese diámetro. Una colisión puede destrozar un asteroide, pero los pedazos se moverán normalmente más despacio que su mutua velocidad de escape (que, dice la regla, es de alrededor de un metro por segundo por kilómetro de radio). Varias horas después, la gravedad habrá reunido todos los fragmentos, excepto los más veloces, en una nueva escombrera. Debido a que las colisiones entre asteroides son bastante frecuentes, la mayoría de los asteroides de grandes dimensiones ya han pasado por esa experiencia. Y recíprocamente, la mayoría de los pequeños deberán ser monolíticos: los fragmentos creados por un impacto escapan fácilmente de su débil gravedad.

Un asteroide “pequeño”, cuyos cráteres de impacto no retienen los residuos que expulsaron, presenta una topografía extremada. Un asteroide “grande” es un ensamblaje de piezas menores al que la gravedad y las colisiones aleatorias pueden redondear o, si gira, dar una forma oblonga.