

se



ISAAC

ASIMOV



Guía de
la Tierra y
el espacio

¿Cuál es la edad del Universo? ¿Hay vida más allá del sistema solar? ¿De qué están hechos los planetas? ¿Qué es la luz del sol? ¿Qué es un asteroide? ¿Qué son las nebulosas? ¿Qué es el efecto Doppler? ¿Existe un centro del Universo? ¿Qué es un cometa? ¿Cómo se produjo el Big Bang? ¿Qué es un agujero negro? ¿Se mueven las galaxias? ¿Qué es una supernova? ¿Qué produjo los cráteres lunares? ¿Cuál es la edad de la Tierra? ¿Cuál es el origen de terremotos y volcanes? ¿Por qué sopla el viento? ¿Se puede agotar la energía? ¿Qué son las mareas? ¿Cómo se formó la Tierra? ¿Continuará indefinidamente la expansión del Universo? 111 preguntas fundamentales de la astronomía respondidas con claridad y brillantez por Isaac Asimov, maestro indiscutido de la divulgación científica. Un viaje maravilloso por la astronomía, los orígenes, los enigmas, los grandes descubrimientos, los genios científicos... La ciencia al alcance de todos.



Isaac Asimov

Guía de la Tierra y el espacio

ePub r1.1

Un_Tal_Lucas 08.09.16

Título original: *Isaac Asimov's Guide to Earth and Space*

Isaac Asimov, 1991

Diseño de cubierta: Mauricio Restrepo

Editor digital: Un_Tal_Lucas

Reporte de erratas: heutorez

ePub base r1.2





más libros, más libres



ANIVERSARIO



epublibre





*Para Kate Medina,
juntos de nuevo*

Introducción

El mundo físico es un lugar vasto y hermoso, pero también induce a confusión porque muchas de las cosas que le atañen no se comprenden del todo. Se producen asimismo numerosos fenómenos que algunas personas entienden muy bien, mientras que para otras resultan ininteligibles.

Una de las razones de que la mayoría de nosotros desconozca más cosas acerca del mundo de las que podría saber, es que, sencillamente, no se ha molestado en pensar. Lo cual no significa que no pensemos en absoluto. Todo el mundo piensa, en efecto, pero cada persona tiende a concentrarse sobre todo en asuntos que considera de importancia inmediata. ¿Qué tenemos hoy para comer? ¿Cómo pagaré mis facturas? ¿Adónde iré de vacaciones? ¿Cómo lograré un ascenso y un aumento de sueldo? ¿Conseguiré una cita con tal persona? ¿Qué será este dolorcillo del costado?

Estas preguntas son importantes para nosotros, y nuestra necesidad de responder a ellas es tan urgente que carecemos de tiempo para plantearnos otras de carácter más general, como cuál es la forma de la Tierra. Una contestación natural a una pregunta como ésta podría ser: «¿Y a quién le interesa tal cosa? ¿Por qué me molesta con semejantes tonterías? ¿Qué importancia puede tener eso?».

Pero sí tiene importancia. Por ejemplo, no se puede navegar por el océano y alcanzar el punto de destino por la ruta más corta posible, ni lanzar un misil y esperar que dé en el blanco si se desconoce la forma de la Tierra.

Mucho más importante que lo anterior es que plantearse esas preguntas resulta fascinante, y hallar las respuestas es muy fácil si se procede de manera sistemática. El propósito de este libro es hacer accesibles esos interrogantes de carácter general, contestando a ellos en unos términos que todos puedan seguir, y presentando con absoluta claridad las complejidades del universo.

Desde luego que una pregunta suele conducir a otra. El conocimiento del mundo no es una línea recta, sino una intrincada filigrana en tres dimensiones, de tal manera que responder a una pregunta en concreto requiere en ocasiones una explicación sobre algo más, y esto a su vez demanda otra explicación, y así sucesivamente. Trataré, sin embargo, de desenredar los hilos con el mayor cuidado posible, de tal manera que en cada ocasión no sea demasiado lo que haya que aclarar. Aun así puedo verme requerido a saltar alguna vez de un tema a otro, por lo que me excuso de antemano.

También puede suceder que en algunos casos, conforme avancemos de una pregunta a otra, el simple razonamiento no baste: habremos de conocer algo acerca de lo que los científicos han observado y deducido, pero procuraré explicar con el mayor cuidado en qué ha consistido su tarea y, siempre que ello sea posible, sin recurrir a complejidades matemáticas o a diagramas. El pensamiento lleva siempre a seguir pensando, en un proceso indefinido. Las personas a las que gusta pensar disfrutan con la ciencia; en cambio, quienes prefieren no pensar en las cosas que no les conciernen directamente, sienten la necesidad de continuar así, encerrados para siempre en sus temores y alejados de la ciencia. Espero que usted pertenezca al primer grupo.

Empecemos con la pregunta que ya he formulado antes y veamos adónde nos conduce.

1. ¿Cuál es la forma de la Tierra?^[1]

Para empezar, debemos mirar en torno a nosotros y comprobar que la Tierra no es regular y que no presenta una forma fácil de definir. Aun si ignoramos las casas y otros objetos debidos a la mano del hombre, y prescindimos también de todos los seres vivos, seguimos hallándonos ante una superficie irregular hecha de roca desnuda y de suelo.

La primera conclusión a la que llegaríamos entonces sería que la Tierra es un objeto rugoso, con montes y valles, acantilados y hondonadas. En lugares como Colorado, Perú o Nepal, donde se alzan montañas elevadísimas, de miles de metros de altura, la irregularidad de la Tierra está muy clara. Pero si usted vive en algunas zonas de Kansas, Uruguay o Ucrania, apenas verá a su alrededor montes y valles; en cambio, contemplará llanuras sin el menor accidente.

Cuando usted encuentra montes y valles, resulta que la Tierra puede elevarse por un lado, pero de nuevo descenderá por el otro. Cuando usted recorre una parte de la superficie de nuestro planeta, ésta no asciende nunca sin volver a descender a continuación. Parece razonable, pues, concluir que, en su conjunto, la Tierra es plana.

Si a bordo de una embarcación se interna usted en una superficie acuática hasta no divisar tierra en ninguna dirección, únicamente deberá considerar aquella superficie, la cual es irregular porque está cubierta de olas. Si no hay viento, las olas no son grandes, y por ello resulta fácil advertir que, en conjunto, el agua es

llana. De hecho, en toda ocasión el agua se aproxima mucho más a la forma llana que la tierra.

Por esta razón tiene sentido suponer que la Tierra es llana, y durante miles de años eso es lo que han creído los seres humanos. Así pues, dado que una Tierra llana es algo que tiene sentido, y que no hace falta pensar mucho para llegar a esta conclusión, ¿qué objeto tiene perder más tiempo con este asunto?

¿Ha ascendido usted alguna vez a lo alto de una colina y ha contemplado el valle a sus pies? Parece completamente llano, y usted puede mirar más y más lejos, pasando por encima de casas, árboles, ríos y otros objetos distantes: cuanto más alejados parecen estar, menos detalles se divisan. Por añadidura, el aire no suele permanecer absolutamente claro: en efecto, jirones de niebla y penachos de humo oscurecen las zonas más apartadas, de manera que se percibe un halo azulado allá donde cielo y tierra parecen unirse.

Ese lugar de encuentro del cielo y la tierra se llama horizonte, término derivado de una palabra griega que significa límite. Si observa una región llana, el horizonte discurre uniforme de derecha a izquierda, y esa línea se llama horizontal.

Suponga ahora que mira en otra dirección, hacia una colina próxima. Usted no puede ver más allá de la cumbre de la colina porque su mirada no puede seguir una línea curva. Por tanto, cuando contempla lo alto de la colina, sólo ve cielo encima de ella, y no la tierra que se extiende al otro lado. Se dibuja una línea nítida que parece muy próxima a usted y que recorta la colina contra el cielo. Así pues, si observa una extensión de terreno y se fija en un horizonte distante y neblinoso, sabrá que está ante una región llana, pero si tiene ante usted un horizonte próximo y bien delimitado, lo que ve es la cumbre de una colina.

Imagine que se halla en el océano, en la cubierta de un barco. El día es claro, resplandeciente y soleado, y reina la calma. En la mar, el aire suele ser menos polvoriento y neblinoso que en tierra, de modo que usted dirige su mirada a lo lejos y descubre un horizonte

bien marcado. La mar se junta con el cielo en una definida línea horizontal: sin duda está usted viendo la parte superior de una elevación.

¿Cómo es posible? No hay colinas en el océano; sólo agua llana. La única respuesta es que el océano no es llano, sino curvo, y desde lo alto de la cubierta del barco, usted sólo puede distinguir hasta donde su mirada alcanza lo alto de la curva, pero no más allá. Si sube a una cubierta superior, su vista alcanzará mayor distancia, antes de que la línea curva le impida seguir viendo; y si desciende a una cubierta inferior no podrá ver tan lejos. Si permanece en un lugar y mira en derredor, verá ese mismo horizonte definido a la misma distancia en todas direcciones; o sea, que no sólo la superficie del océano es curva, sino que se curva de la misma manera, en la misma medida y en todas direcciones. Al menos en la medida en que puede uno percibirlo con sus propios ojos.

Pero ¿por qué el océano se curva? Porque debe seguir la superficie de la Tierra, de lo que resulta que también ésta debe curvarse en todas direcciones. La curvatura es menos perceptible en tierra porque el paisaje es menos uniforme que el mar, y el aire sobre la tierra suele ser menos puro.

Si la Tierra se curva, ¿qué clase de curva dibuja? Si se curva de la misma forma en todas direcciones, debe ser una esfera, porque ésta es la única superficie conocida que se curva hacia abajo igualmente en todas direcciones. De modo que observando y pensando podemos concluir que la Tierra es una esfera.

Se preguntará usted por qué la gente no estudió los horizontes y llegó a esta conclusión hace miles de años. La razón es que son pocas las personas que pensaron sobre el asunto. Resultaba más sencillo imaginar una Tierra plana, pues esta forma no planteaba ningún problema concreto en los tiempos antiguos. En cambio, como no tardaremos en ver, una Tierra esférica sí plantea problemas que requieren seguir pensando.

También se preguntará si podemos fiarnos de nuestros ojos. ¿Acaso basta con mirar el horizonte? En este caso así es, aunque

con frecuencia nuestros ojos nos engañan si no consideramos la evidencia con el mayor cuidado.

Supongamos, por ejemplo, que está usted en la mar y puede distinguir un barco en lontananza, navegando hacia el horizonte. Sigue observando y, conforme se aproxima al horizonte, deja de ver las cubiertas inferiores y al cabo de un rato pierde también de vista las superiores. Todo cuanto divisa son los penachos de humo o, en su caso, las velas, y unos y otras acaban asimismo por desaparecer. No es cuestión de distancia, pues si enfoca el barco con un catalejo le parecerá mayor y más próximo, pero igualmente verá desaparecer primero la parte inferior y luego las superiores. Lo que usted está viendo es el barco navegando sobre la curva terrestre, y luego continuando por el otro lado.

La primera persona que nos consta sostuvo la esfericidad de la Tierra fue el filósofo griego Pitágoras (h. 580-h. 500 a. C.), que formuló su hipótesis hacia 500 a. C.

Hay otras pruebas que demuestran la esfericidad de la Tierra. Algunas estrellas son visibles desde ciertos puntos de la Tierra pero no desde otros, y durante un eclipse de luna, la sombra que la Tierra proyecta sobre su satélite siempre es curva, como el borde de una esfera. El filósofo griego Aristóteles (384-322 a. C.) enumeró todas las pruebas en favor de la esfericidad de nuestro planeta hacia 340 a. C., y aunque la idea no fue unánimemente aceptada en su tiempo, con posterioridad ningún hombre instruido ha dudado de ella. Hoy día, en la era espacial, se han tomado fotografías de la Tierra desde el espacio exterior en las que podemos ver que realmente se trata de una esfera.

2. ¿Cuál es el tamaño de la Tierra?

Mientras se creyó que la Tierra era plana, no había razón para preocuparse por su tamaño. Por lo que se sabía, podía extenderse indefinidamente, pero este concepto resulta difícil de imaginar. En cambio, era mucho más fácil atribuir a la Tierra un tamaño definido y considerar que se terminaba en algún sitio. Todavía hoy se dice «ir hasta el fin del mundo», si bien en nuestros días se trata de una expresión figurada y no se toma en sentido literal.

Desde luego, la idea de que la Tierra tuviera un fin no dejaba de crear problemas. Suponga que usted recorre una larga distancia y acaba por alcanzar el final. ¿Se caería entonces? Si el océano llegara al final, ¿se vertería hasta secarse? Quienes se preocupaban por estas cuestiones hubieron de explicar qué impedía que eso sucediera. Tal vez el mundo estaba bordeado por una infranqueable cordillera de altas montañas, lo que lo haría semejante a una sartén, de cuya superficie nada puede escapar. O acaso el cielo era una pieza de materia sólida que se curvaba como un hemisferio achatado (que es el aspecto que presenta) y descendía hasta unirse a la tierra por todas partes, con lo que ésta sería como una bandeja plana cubierta por una tapadera. De este modo también las cosas se mantendrían en su lugar. Ambas soluciones parecían satisfactorias.

Pero aun así cabría seguir preguntándose por el tamaño de la Tierra. En tiempos muy antiguos, cuando las gentes sólo podían desplazarse a pie y por ello no viajaban mucho, se daba por seguro que el mundo era muy pequeño, y que sólo existía la región propia, donde se habitaba. Esto explica que cuando en 2800 a. C. se

produjo una terrible inundación en el valle de los ríos Tigris y Éufrates, los sumerios, que vivían allí, consideraran que el mundo entero había sido cubierto por las aguas, y esta ingenua creencia ha llegado hasta nosotros a través del relato bíblico de Noé y el diluvio.

A medida que la humanidad aprendió a comerciar, envió expediciones militares acá y allá y empezó a montar a caballo, el horizonte del mundo se expandió. En el año 500 a. C., el Imperio persa abarcaba 4800 km desde su confín oriental hasta el occidental. Al oeste de dicho Imperio se hallaban Grecia, Italia y otras tierras, y no había señal alguna de un final.

Cuando los filósofos griegos se dieron cuenta de que la Tierra afectaba forma esférica, comprendieron que debía tener un tamaño definido, pues ya no bastaba con decir que era «muy extensa» o que se prolongaba «indefinidamente». Por otra parte, el tamaño de la esfera podía calcularse sin necesidad de alejarse mucho del lugar donde se habitaba.

Mientras que una Tierra plana puede extenderse indefinidamente, una Tierra esférica se curva, y la curva tiene que descender sobre sí misma. Para determinar su tamaño, basta con medir cuánto se curva. Cuanto más pronunciada sea la curvatura, menor será la esfera, y cuanto más abierta la curva, mayor será la esfera.

De lo que podemos estar seguros es de que la curva es muy abierta; por tanto, la esfera es muy grande. Nos consta que ha de ser así de sencillo porque llevó mucho tiempo decidir la esfericidad de la Tierra. Si la esfera fuese pequeña, la curvatura sería tan pronunciada que hubiera resultado imposible no darse cuenta de ella. Y cuanto más abierta fuera la curva, más llana parecería una pequeña región de la Tierra.

Pero ¿cómo medir el grado de curvatura de la Tierra?

Existe un procedimiento. Tome una fina banda metálica y dispóngala sobre una zona absolutamente llana, de tal manera que esté en contacto con la Tierra en todos sus puntos. De este modo se verá obligada a seguir la curvatura terrestre. A continuación retirará

la banda metálica y comprobará cuánto se ha curvado. Si la banda tiene 1 km de longitud, su curvatura será de unos 12,5 cm.

El inconveniente de esta medición es que resultaría difícil hallar 1 km de superficie terrestre de una absoluta uniformidad, y conseguir que una banda metálica la resiguiera con total exactitud, con lo cual se obtendría una cifra nada fiable. El menor error en la forma de la banda metálica determinaría un error grave en el cálculo del tamaño de la Tierra. En otras palabras: algunos experimentos que resultan perfectamente bien en teoría, difícilmente sirven en la práctica, y éste es uno de ellos. Así que vamos a buscar otro.

Suponga ahora que tiene una varilla larga y recta y que la hincan en un lugar de la Tierra, de manera que quede completamente recta. Si el día es claro y soleado y el sol se halla exactamente encima, la varilla no proyecta sombra alguna porque la luz solar cae sobre ella igual por todas partes. Pero imagine otra varilla también clavada en el suelo formando ángulo respecto a la vertical. Ahora la luz solar que incide sobre la varilla proyecta una sombra. Si se dispone una serie de varillas separadas entre ellas 1,80 m, pero formando diversos ángulos, cada una proyectará una sombra de diferente longitud. Cuanto más pronunciado sea el ángulo, más larga será la sombra.

Si medimos las longitudes de las sombras y las comparamos con las longitudes de las varillas, podemos calcular el ángulo de inclinación sin medir realmente dicho ángulo. La rama de las matemáticas que hace esto posible se llama trigonometría, y fue desarrollada por los antiguos matemáticos griegos en época muy temprana. Al filósofo griego Tales (h. 624-h. 546 a. C.) se le atribuye el empleo de la trigonometría en 580 a. C. para medir la altura de las pirámides de Egipto a partir de la sombra que proyectan.

Sin embargo, no necesita usted disponer esas varillas inclinadas. Suponga que tiene una varilla perfectamente recta en un lugar y otra también recta en otro situado a miles de kilómetros de distancia. Entre ambos lugares la Tierra se curva, de modo que si considera usted que una de las varillas es recta, la otra forma un ángulo con

respecto a ella, y el valor de ese ángulo depende del grado de curvatura de la superficie terrestre.

Hacia 240 a. C., el filósofo griego Eratóstenes (h. 276-h. 196 a. C.) trató de efectuar esa misma observación. Supo que en la ciudad egipcia de Siena el 21 de junio el sol se situaba en la exacta vertical a mediodía, de tal manera que una varilla recta no proyectaría sombra alguna. El mismo día, en la ciudad egipcia de Alejandría, donde habitaba Eratóstenes, una varilla asimismo recta proyectaba una leve sombra.

Eratóstenes midió la longitud de la sombra y la comparó con la longitud de la varilla, y eso le permitió determinar en qué medida la curvatura terrestre inclinaba la varilla de Alejandría respecto de la de Siena. Dado que conocía la distancia entre ambas ciudades, la curvatura que se apreciaba en dicha distancia le permitió calcular la longitud que precisaría esa curva para cerrarse sobre sí misma y completar así la esfera. Anunció que la esfera terrestre medía, en números redondos y empleando nuestro moderno sistema métrico, 40 000 km en torno al ecuador, lo que supondría la longitud de la circunferencia, y 12 800 km de lado a lado, esto es, el diámetro.

El cálculo era del todo correcto, y el descubrimiento se llevó a cabo hace veintidós siglos, sin que Eratóstenes abandonara nunca su lugar de residencia, recurriendo sólo a la agudeza mental y a una medición sencilla.

Ello no significó, sin embargo, que el trabajo de Eratóstenes fuera plenamente aceptado. Otros efectuaron mediciones similares y obtuvieron cifras inferiores, y en una época tan tardía como la de Cristóbal Colón (1451-1506), la creencia generalizada era que la longitud de la circunferencia terrestre se reducía a unos 29 000 km, o sea, menos de las tres cuartas partes de la cifra verdadera. En 1492 Colón zarpó con rumbo Oeste porque creía que Asia se hallaba a sólo 4800 km de distancia. En realidad le separaban de ella 16 000 km, y de no haber existido el continente americano no hubiera estado en condiciones de completar su viaje, y nunca más se hubiera oído hablar de él.

El asunto quedó definitivamente zanjado en 1522, cuando una expedición iniciada por el explorador portugués Fernando de Magallanes (h. 1480-1521) efectuó la primera circunnavegación del mundo. Magallanes no vivió para verla completada, pues murió en ruta, en las islas Filipinas, pero un barco con dieciocho hombres a bordo coronó la empresa. Este viaje probó que la medición de Eratóstenes era correcta.

3. Si la Tierra es esférica, ¿por qué no nos caemos?

Cuando se les dice a los niños que la Tierra es una esfera, la idea parece confundirlos. Los habitantes del otro extremo de la Tierra (es decir, los antípodas) deberían andar de coronilla y con los pies para arriba; ¿y por qué no se caen de la Tierra? Después de todo, si usted intenta caminar por el techo se cae.

Pero la cuestión aún empeora si supone usted que vive en lo más alto de una Tierra esférica (lo que ciertamente parece ser el caso, puesto que la Tierra se curva con suavidad hacia abajo en todas direcciones). Así las cosas, usted sólo se mantendrá a salvo en tanto permanezca exactamente en su sitio. Si se mueve en cualquier dirección empezará a deslizarse por un plano inclinado. Cuanto más avance, más se acentuará la inclinación del plano, hasta que su deslizamiento se acelere de manera progresiva, y acabe cayendo sin remedio fuera de la Tierra. Si esto fuese verdad, haría tiempo que todos los océanos se hubieran vertido fuera de nuestro planeta, y también el aire hubiera escapado de él. En definitiva, llegamos a la verosíblemente razonable conclusión de que resulta imposible vivir sobre una Tierra esférica; por tanto, la Tierra no puede ser una esfera.

Pero dado que la Tierra sí es una esfera, nuestro pensamiento debe haber incurrido en algún error. Y éste dimana de lo que entendemos por «abajo». Si permanecemos de pie, erectos, y queremos indicar la dirección «abajo», señalamos nuestros pies. Cuando lo hacemos, estamos señalando también el centro de la Tierra, que se halla a unos 6350 km debajo de nosotros. Si

admitimos que «abajo» significa siempre el centro de la Tierra, cualquiera que sea el lugar donde se halle de la superficie, cuando está de pie sus plantas están encaradas hacia el centro de la Tierra. Cuando los antípodas se colocan a su vez de pie, también sus plantas están encaradas hacia el centro de la Tierra, con lo que para ellos «abajo» parece coincidir con esa dirección, exactamente como nos sucede a nosotros.

Al igual que todo cuerpo pesado, somos atraídos hacia abajo, hacia el centro de la Tierra. Esto afecta a todo cuanto se halla sobre la superficie del planeta, con independencia de su localización. Puesto que no experimentamos la sensación de que la Tierra es curva mientras nos desplazamos por ella, y dado que parece más o menos horizontal y que «abajo» coincide siempre con la dirección de nuestros pies cuando permanecemos derechos, la Tierra «parece» plana, y nada cae más allá de ella. Ésta es otra de las razones que explican el largo tiempo transcurrido antes de que se aceptara su esfericidad. Aristóteles fue la primera persona que puso de manifiesto que todo cuanto se halla sobre la Tierra es atraído hacia su centro. La fuerza responsable de dicha atracción se denomina gravedad, término derivado de una palabra latina que significa pesado.

Suponga usted que tiene una gran cantidad de materia de cualquier forma, y que cada parte es atraída por las demás, de modo que todo el material queda lo más estrechamente junto posible. Cuando todas las partes están comprimidas al máximo y ya no pueden hallarse más cerca, afectan forma esférica. Ninguna otra forma sólida tiene todas sus partes tan juntas en promedio como una esfera. Y ésta es la razón de que la Tierra, por atraer todo hacia su centro, sea una esfera.

4. ¿Se mueve la Tierra?

A la mayoría de las personas de épocas antiguas, ésta le hubiera parecido la pregunta más estúpida imaginable. ¿Cómo podía haber la menor duda al respecto? Podemos ver que, sencillamente, la Tierra no se mueve. El mero planteamiento de la pregunta hubiera parecido un síntoma de locura.

Entonces, ¿por qué acabó formulándose?

Una razón es que todo se mueve en el cielo. El sol sale por Occidente, se traslada por el firmamento y se pone por Oriente. Lo mismo puede decirse de la luna. Las estrellas parecen girar en amplios círculos en torno a la Polar, que haría las veces de centro. Las estrellas más alejadas de la Polar describen círculos lo bastante amplios como para atravesar el horizonte, de modo que también ellas salen por el Este y se ponen por el Oeste.

Este movimiento en el cielo no sorprendía a la mayoría de las personas, a las que parecía natural que la Tierra permaneciera absolutamente quieta, sin efectuar movimiento alguno, y que los objetos celestes giraran en torno a ella, a razón de una vuelta por día. Si esto era lo que se veía, ¿por qué alguien había de dudar de lo que resultaba evidente a los sentidos? Sin embargo, algunos se preguntaron si no era posible que el cielo permaneciera inmutable en tanto la Tierra giraba en derredor. Para la mayoría, ésta no parecía una alternativa razonable: resultaba demasiado obvio que la Tierra, con su gran tamaño, se mantenía inmóvil.

Usted se halla en un tren, y hay otro tren junto al suyo. De pronto, este segundo tren empieza a retroceder lentamente. Usted se sorprende. ¿Por qué habría de retroceder? Usted continúa

observando, y finalmente el tren retrocede tanto, que la cabecera pasa ante su ventanilla y se hace visible el paisaje, un paisaje que ¡también está retrocediendo! De inmediato comprende usted que era su tren el que estaba avanzando, mientras que el otro permanecía parado. Mientras el movimiento de su tren era muy suave, usted no podía advertir la diferencia, y no estaba en condiciones de apreciar qué convoy estaba en marcha y cuál seguía detenido.

Los antiguos, sin embargo, no se beneficiaban de nuestras ventajas, y no estaban acostumbrados a trasladarse con tanta suavidad como para no percatarse de que se movían. Caminar, correr, viajar en un carruaje sin suspensión por caminos con roderas o montar un caballo al trote o al galope, daba una sensación tal de avance irregular, que nunca se planteó la cuestión de si uno se movía o no. Por tanto, si la Tierra no daba sensación de movimiento, la conclusión era, sencillamente, que permanecía inmóvil.

Imaginémonos ahora de nuevo en nuestro tren, observando cómo el convoy junto al nuestro retrocede lentamente. Para comprobar si se mueve él o se mueve usted, todo cuanto ha de hacer es mirar en otra dirección. Por la ventanilla del otro lado verá la estación o la calle de una ciudad. Si ese paisaje también se mueve hacia atrás, usted comprenderá que es usted quien se mueve, no el otro tren. En el caso de la Tierra y del cielo, sin embargo, no hay un lugar neutral adonde mirar.

La primera persona que nos consta sugirió que la Tierra podía girar mientras el cielo se mantenía inmóvil, fue el filósofo griego Heráclides (h. 390-h. 322 a. C.) hacia 350 a. C. No se le tomó en serio. Pero en 1609, el científico italiano Galileo Galilei (1564-1642) enfocó hacia el cielo un primitivo telescopio, y entre sus descubrimientos se cuentan las manchas oscuras en el sol. Al ir observando éstas día tras día, se dio cuenta de que se movían lentamente en torno al sol, de lo que concluyó que este último giraba a su vez con idéntica lentitud alrededor de una línea imaginaria

llamada eje, y que completaba una vuelta en aproximadamente veintisiete días.

Si el sol tenía un movimiento de rotación, pensaba Galileo, ¿por qué no había de tenerlo también la Tierra, una vez cada veinticuatro horas? Halló una tenaz oposición a esta idea, y en 1633 la Iglesia católica le obligó a renunciar públicamente a sus puntos de vista y a admitir que la Tierra permanecía inmóvil.

Pero eso no ayudó a los conservadores, y en 1665 el astrónomo francoitaliano Gian Domenico Cassini (1625-1712) fue capaz de demostrar que el planeta Marte completaba su rotación cada veinticuatro horas y media. En 1668, demostró que el planeta Júpiter efectuaba ese movimiento en diez horas. Después de esto, los científicos empezaron a sospechar que también la Tierra giraba en torno a sí misma, y que lo hacía tan regular y suavemente que nadie se había dado cuenta de ello. Pero la rotación de la Tierra no dependía de que otros mundos también rotaran; esto último constituía una prueba adicional. Conforme los astrónomos iban percatándose de la vastedad del universo (de lo cual ya nos ocuparemos más adelante), fue perdiendo sentido la suposición de que la Tierra no se movía y de que todo ese universo inconmensurable giraba en torno a ella.

Pero hasta 1851 no se demostró fehacientemente el movimiento de rotación, de tal manera que el público pudiera «ver» cómo se producía. El físico francés Jean B. L. Foucault (1819-1868) dejó que un largo y pesado péndulo oscilara suspendido de la bóveda de una iglesia. Tenía una púa en su parte inferior, que iba trazando un surco en la arena extendida sobre el pavimento de la iglesia. El péndulo mantenía su oscilación en el mismo plano hora tras hora, pero la marca en la arena iba cambiando lentamente de dirección a medida que la Tierra giraba bajo el péndulo. Por primera vez, el público pudo ver girar la Tierra. Hoy día hemos enviado hombres a la luna, y desde allí es posible presenciar directamente el fenómeno.

5. Cuando usted da un salto, ¿por qué no cae en un lugar distinto?

Cuando en el siglo XVII los astrónomos insistieron en que la Tierra giraba, las personas que no les creían oponían objeciones. Si la Tierra girase, decían, cuando una persona diera un salto en el aire la Tierra giraría bajo sus pies y volvería a caer un poco más allá de donde inició el salto. Si lanzara usted una pelota a lo alto, daría en el suelo mucho más allá de donde fue arrojada. Si un pájaro echara a volar de su nido, nunca hallaría el camino de regreso. Y como nada de eso sucedía, se llegaba a la conclusión de que la Tierra no podía moverse.

Estas objeciones parecían tener sentido, y si usted acabara de enterarse de la rotación terrestre, podría hallar dificultades para impugnarlas, por lo que necesitaría pensar un poco.

Suponga que viaja usted en un tren y ocupa un asiento contiguo al pasillo central, y que un amigo se sienta a su misma altura, pero al otro lado del pasillo. El tren está parado en una estación, y como usted no tiene nada mejor que hacer, le lanza a su amigo una pelota a través del pasillo. Él la recoge y se la lanza a su vez, lo cual no plantea problema alguno. Suponga ahora que el tren no está parado en la estación, sino que corre suavemente por un tramo de vía recto a 96 km por hora. Usted lanza la pelota a su amigo: el movimiento del tren ¿afectará a la pelota mientras está en el aire, con lo cual no le llegará a su amigo, sino a alguien situado un par de asientos detrás de él? En realidad, no. La pelota cruzará el pasillo exactamente igual que si el tren estuviera detenido. Si piensa usted en ello, su sola experiencia le bastará para corroborar mi ejemplo de

la pelota, sin necesidad de repetir el experimento. (Cuando, como en el presente caso, basta con imaginar un ejercicio de esta clase, sin llevarlo realmente a la práctica, se habla de «experimento mental»).

¿Por qué resulta igual de fácil arrojar la pelota en un tren en marcha que en un tren parado? Porque mientras el convoy corre sobre los raíles, todo cuanto transporta se mueve a idéntica velocidad: usted, su amigo, el aire que hay entre ustedes y la pelota que lanzan a través del pasillo. Si algo avanza a la misma velocidad, no importa si ésta es de 96 km por hora o de 0 km por hora.

La Tierra efectúa su movimiento de rotación a una velocidad aproximada de 1600 km por hora en el ecuador, pero usted, yo, el aire y cualquier pelota que se arroje se mueven a la misma velocidad, de modo que puede usted jugar al béisbol en cualquier parte del planeta sin preocuparse por el movimiento de la Tierra.

Nuestros antepasados, claro está, no disponían de algo parecido a un tren, por lo que Galileo recurrió a un experimento mental distinto. Imagine usted que navega en un barco que surca la mar viento en popa. Sube usted al palo mayor y se le cae un pasador o cualquier otro instrumento de los que usan los marinos. Cae, pues, y durante la caída el barco avanza tan aprisa, que cuando el objeto llega a la cubierta el barco ya debería haber pasado, dejando que cayera en el océano, detrás de él.

Naturalmente, debe de haber habido miles de barcos en los que, en plena navegación, a los marinos se les hayan caído por accidente miles de instrumentos desde lo alto de los mástiles, y es de todos sabido que jamás fueron a parar al océano. Cayeron de manera invariable al pie del mástil. O sea, que durante su caída avanzaron con el barco.

No son válidos los argumentos de este tipo en contra de la rotación terrestre, y nadie ha podido nunca presentar uno que resultara convincente. Así pues, la Tierra se mueve.

6. ¿Por qué sopla el viento?

Si el aire se mueve a la vez que la Tierra a medida que ésta gira, ¿por qué hace viento? Al fin y al cabo, el viento es aire en movimiento, y tal vez parezca moverse porque en realidad permanece quieto mientras la Tierra gira bajo él. Pero esta hipótesis es errónea.

La Tierra se mueve de Oeste a Este, y ésta es la razón de que todos los objetos en el cielo parezcan desplazarse de Este a Oeste, de la misma manera que el tren contiguo al nuestro parece retroceder cuando nosotros avanzamos. La rotación se efectúa a 1600 km por hora en el ecuador. En puntos distantes del ecuador en dirección Norte y Sur, la Tierra se mueve a velocidades inferiores en el mismo tiempo, porque dichos puntos están situados en círculos menores que el ecuador. (En los polos Norte y Sur no hay movimiento alguno).

Si el aire permaneciera inmóvil en tanto que la Tierra gira, sentiríamos un viento uniforme que soplaría de Este a Oeste en el ecuador a velocidades en torno a los 1600 km por hora. En los demás lugares, las velocidades serían menores. Pero nada de esto ocurre, de modo que la causa principal del viento no puede ser la rotación terrestre.

Cuando Colón atravesó el Atlántico en 1492, se encontró con que allí soplaban unos vientos del Este, de fuerza uniforme (que ahora llamamos alisios), y que le impulsaron en su navegación. En su viaje de regreso, mantuvo el rumbo Norte hasta que halló vientos uniformes del Oeste (vientos de poniente) que le devolvieron al punto de partida. Este descubrimiento fue importante, porque hasta

entonces los marinos occidentales habían considerado que los vientos eran fuerzas erráticas cuya presencia, ausencia y dirección dependían por entero de la voluntad de las divinidades. Después del viaje de Colón, quedó claro que los vientos soplan ajustándose a unas leyes, y que pueden aprovecharse para el comercio marítimo. Lo que se ignoraba en esa época era por qué los vientos se comportaban de una forma tan ordenada.

El primer intento de respuesta llegó en 1686. El científico inglés Edmund Halley (1656-1742) señaló que si toda la atmósfera terrestre se calentara a la misma temperatura, el aire permanecería más o menos en calma sobre la superficie y no soplarían vientos dignos de mención. Sin embargo, el sol calienta más en los trópicos, y el aire alcanza allí una temperatura superior a la que se registra más al Norte o más al Sur. El aire caliente se expande, se torna más ligero y asciende, mientras que el aire frío del Norte y del Sur se desplaza para ocupar el lugar del anterior. Este aire frío que llega es el que forma los vientos alisios.

Uno tendería a creer que el aire más frío llega directamente del Norte en la región situada al norte del ecuador, y directamente del Sur en la región al sur del ecuador, pero no es así. Los alisios del norte del ecuador llegan procedentes del Noreste, mientras que los que soplan al sur del ecuador llegan desde el Sudeste.

Halley no pudo explicar este fenómeno, pero en 1735 el abogado inglés George Hadley (1685-1768) lo consiguió. El aire frío del Norte avanza a velocidad inferior a la del aire en el ecuador, y a medida que este aire frío se mueve hacia el Sur mantiene su lentitud porque no puede aumentar de velocidad debido al movimiento más rápido de la Tierra en sentido Oeste-Este. Como resultado de ello, el viento parece soplar desde el Noreste. El mismo efecto del movimiento de la Tierra y la lentitud del avance de los vientos hacia el sur del ecuador determinan que el viento parezca soplar desde el Sudeste.

Viceversa, cuando el aire del ecuador se ve forzado a tomar la dirección Norte, avanza más aprisa hacia el Norte que la superficie

terrestre, y la sobrepasa, lo que hace que el viento parezca provenir del Oeste. Y eso produce los vientos de poniente.

Este mecanismo fue expresado matemática y detalladamente en 1835 por el físico francés Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843). En su honor, este cambio en la dirección del viento, debida a las distintas velocidades de rotación en otras tantas partes de la Tierra, se conoce como efecto Coriolis. Este efecto puede hacer girar el aire en círculos con diversos grados de fuerza, dando lugar a las conocidas tormentas, huracanes e incluso tornados.

Los vientos son importantes. Acondicionan el aire de la Tierra, distribuyendo el calor de manera que las zonas cálidas no lo sean tanto como podrían serlo, y provocando idéntico efecto en las regiones frías. Arrastran el vapor de agua desde el océano cuando se calientan, y dejan caer el agua como lluvia al enfriarse, con lo que los continentes reciben el agua fresca que permite la existencia de la vida terrestre.

Si comprendemos cabalmente los principios que gobiernan los movimientos del aire y el viento, podremos predecir con precisión el tiempo atmosférico, incluidas la formación del calor y del frío, la lluvia, las tormentas, las tempestades, etc. La dificultad radica en que esos principios son tan complicados que todavía hoy la predicción del tiempo es imperfecta.

En realidad, nunca seremos capaces de predecir el tiempo con rigor, porque nunca podremos medir las condiciones iniciales con suficiente exactitud, e incluso el cambio más leve en dichas condiciones puede traducirse en enormes diferencias en sus consecuencias finales. Esta situación se conoce como «caos», y va haciéndose patente que cada vez son más los fenómenos naturales que resultan poseer propiedades caóticas que no pueden predecirse con facilidad o, incluso, que resultan totalmente imprevisibles. Esto apunta a una deficiencia en materia científica y a una limitación del conocimiento humano; pero si en verdad se oponen limitaciones a lo que podemos hacer, resulta inteligente saber al menos qué limitaciones son esas.

7. ¿Por qué en verano hace más calor que en invierno?

En el apartado anterior he señalado que las temperaturas son más elevadas en los trópicos que en cualquier otra parte de la Tierra. Esto se debe a que el sol incide directamente en la superficie en los trópicos, de tal modo que éstos reciben el calor solar en su forma más concentrada. Más al Norte o al Sur, la luz solar llega más inclinada y se extiende por un área más amplia, de modo que el calor está menos concentrado.

Los habitantes de las latitudes septentrionales, como, supongamos, Estados Unidos o Europa, saben sin necesidad de abandonar su lugar de residencia que el tiempo se vuelve más caluroso o más frío. En julio y agosto hace mucho más calor que en enero y febrero. (En el Hemisferio Sur la situación se invierte). La explicación más sencilla sería que el sol está más próximo a la Tierra en verano y, por tanto, nos calienta más, pero esto no es verdad. El sol irradia más o menos el mismo calor a lo largo de todo el año.

Lo que cuenta es la posición del sol en el cielo. Si el sol brillara siempre directamente sobre el ecuador, a mediodía, en cualquier punto a lo largo del ecuador estaría siempre exactamente encima. Los lugares situados al norte del ecuador siempre lo verían en el cielo meridional a mediodía, mientras que los lugares al sur del ecuador lo verían en el Norte. Cuanto más al Norte se situara usted en la superficie terrestre, más lejos hacia el Sur hallaría el sol de mediodía, y cuanto más al Sur estuviera usted, más al Norte brillaría el sol.

La trayectoria recorrida por el sol, sin embargo, forma un ángulo respecto al ecuador. A mediodía, el sol luce directamente sobre el ecuador el 20 de marzo de cada año, y en esa fecha la noche y el día tienen cada uno doce horas en toda la Tierra. Ese día se conoce como equinoccio vernal: vernal proviene de una palabra latina que significa primavera; equinoccio, de otra que quiere decir «noche igual».

Posteriormente, de día en día, el sol de mediodía se desplaza hacia el Norte hasta que el 21 de junio incide directamente sobre el Trópico de Cáncer, que pasa un poco al norte de La Habana, Cuba. En ese momento se detiene y comienza a desplazarse de nuevo hacia el Sur. El 21 de junio se conoce como solsticio de verano (de una palabra latina que significa «el sol permanece quieto»).

El sol empieza a desplazarse hacia el Sur hasta llegar a situarse directamente encima del ecuador el 23 de septiembre (equinoccio de otoño), y prosigue el recorrido hasta colocarse encima del Trópico de Capricornio —que pasa algo al sur de Río de Janeiro, Brasil— el 21 de diciembre. Ese día (solsticio de invierno) el sol deja de moverse hacia el Sur y empieza a avanzar otra vez hacia el Norte, alcanzando el ecuador el 20 de marzo y repitiendo idéntico ciclo año tras año.

Quienes habitan el Hemisferio Norte observan cómo el sol de mediodía se va levantando más y más en el cielo hasta el 21 de junio, para ir descendiendo luego hasta el 21 de diciembre. Cuanto más alto esté el sol, más largo será el día y más corta la noche. En la ciudad de Nueva York, el 21 de junio hay dieciséis horas de luz diurna y ocho de oscuridad nocturna. La situación se invierte el 21 de diciembre, cuando hay dieciséis horas de noche y ocho de día. La diferencia entre día y noche es tanto más acusada cuanto más al Norte nos trasladamos, y en la región polar existe un período en torno al solsticio de verano, durante el cual el sol no se pone en todo el día durante casi seis meses, según la proximidad al Polo Norte. De la misma manera, hay un período alrededor del solsticio de invierno en que el sol no sale en un largo período de tiempo.

En el Hemisferio meridional, todo sucede al revés. Cuando el sol de mediodía se eleva en el Hemisferio Norte, desciende en el Sur, y viceversa. El solsticio de verano en el Norte coincide con el de invierno en el Sur, y así sucesivamente.

Como es natural, cuanto más alto esté el sol en el cielo y más tiempo permanezca en él, mayor calor irradia, de tal manera que, durante el solsticio de verano, el Hemisferio Norte recibe más calor por el día del que pierde por la noche. El mayor calor llega en julio y agosto —pese a que por entonces el sol está empezando a descender— porque el aumento continúa siendo superior a la pérdida durante esos dos meses. Igualmente, en la época del solsticio de invierno se pierde más calor por la noche del que se gana durante el día, y la época más fría coincide con los meses de enero y febrero. En el Hemisferio Sur el proceso es el inverso: julio y agosto son los meses fríos, y enero y febrero, los calurosos.

En los tiempos primitivos, la caída del sol era contemplada con particular alarma, pues quienes no comprendían la naturaleza irrevocable de la caída y alzamiento del sol, siempre temían que en aquella ocasión continuara hundiéndose para acabar desapareciendo. Por consiguiente, la llegada del solsticio de invierno, cuando el sol volvía a levantarse hacia el Norte una vez más, era época de alivio y de celebraciones festivas. Aún conservamos el recuerdo de esa fiesta en nuestras navidades.

8. ¿Cómo medimos el tiempo?

Si, como acabamos de hacerlo, consideramos las estaciones del año, se plantea de forma natural la pregunta de cómo se mide el tiempo.

Existen varios aspectos del tiempo que son psicológicos y fisiológicos. Así, el tiempo parece avanzar más despacio cuando estamos enfermos que cuando estamos sanos, cuando experimentamos dolor que cuando no lo sentimos, cuando estamos tristes o aburridos que cuando somos felices y estamos ocupados, cuando hacemos algo que detestamos que cuando nos dedicamos a algo que nos gusta. No importa cuán inconsistentemente el tiempo parezca correr o arrastrarse; lo cierto es que siempre avanza. Además, todos tenemos la sensación de que el tiempo posee un aspecto objetivo, independiente de lo que a nosotros se nos antoje y del estado de nuestra mente y de nuestro cuerpo: el tiempo avanza en realidad a un ritmo constante e inmutable. Y este tiempo físico es el que nos interesa medir.

Imagine que carece usted de mecanismos que le indiquen el tiempo, pero que necesita conocer su transcurso. Con seguridad, el procedimiento lógico —de hecho, el único— para medirlo sería hallar algún cambio que fuese regular y repetitivo y contar el número de veces que se produce. Uno de esos cambios, del que ya debió percatarse la humanidad primitiva muy tempranamente, sería la alternancia incesante del día y la noche. Los días pueden ser contados y enumerados con facilidad, y nadie tuvo la menor dificultad para comprender el significado de expresiones como

«hoy», «mañana», «ayer», «anoche», «hace tres días» y «dentro de cinco días».

Contar los días presentaba sin embargo sus inconvenientes si había que considerar prolongados períodos de tiempo, pues resulta fácil perder la cuenta. Otro cambio no tan evidente, pero bien conocido ya en tiempos prehistóricos, era el cambio de forma de la luna de una noche a otra (sus fases, término que deriva de una palabra griega que significa apariencia). En efecto, la luna cambia desde el cuarto creciente al plenilunio, para seguir con el menguante, y así una y otra vez. (Ya nos ocuparemos más adelante de por qué sucede eso). Un ciclo lunar completo consta de veintinueve días y medio: se trata del llamado mes lunar.

La sucesión de esos meses puede contarse y utilizarse como un calendario. La palabra calendario proviene de un término latino que significa proclamación, porque los sacerdotes romanos proclamaban el advenimiento de un nuevo mes la noche en que se iniciaba un cuarto creciente. Lo que significaba que se regían por un calendario lunar.

El mes lunar tenía 29,5 días como promedio, con meses alternativos de 29 y 30 días. Doce meses como éstos representaban una duración conjunta que casi igualaba el ciclo de las estaciones: primavera, verano, otoño, invierno y otra vez primavera.

El ciclo de las estaciones marca un año completo. Dicho ciclo es un poco menos claro que el día-noche o las fases de la luna, pero su duración es, como promedio, de 365 1/4 días.

Sucede sin embargo que los doce meses lunares no cubren exactamente el ciclo de las estaciones: en efecto, doce ciclos de las fases de la luna se completan en 354 días, o sea once menos que los que tiene el año. Lo cual significaba que de vez en cuando era preciso añadir un decimotercer mes a fin de igualar el ciclo mensual con el estacional. Esta particularidad era importante, porque el calendario debía señalar a las gentes cuándo era tiempo de plantar o de recolectar, cuándo podían esperar lluvias durante la estación seca, etc. Los babilonios elaboraron un sistema para sumar el mes

adicional en determinados años de un ciclo de diecinueve, que mantenía el calendario lunar exactamente igualado al estacional. Dicho calendario sigue empleándose con fines religiosos en el judaísmo.

En el antiguo Egipto, un acontecimiento significativo era la crecida del Nilo, que extendía un suelo nuevo y fértil sobre los campos, fenómeno que se producía a intervalos de casi exactamente 365 días. Revestía una importancia tal para los egipcios, que éstos prescindieron en absoluto de las fases de la luna, y alargaron el mes hasta 30 días. Transcurridos doce meses, añadían cinco días y el ciclo recomenzaba. Se trataba de un calendario solar.

El calendario egipcio fue adoptado por Roma en 44 a. C. Los cinco días adicionales fueron repartidos a lo largo de todo el año, y un año cada cuatro tenía 366 días, debido a que el año constaba de 365 $\frac{1}{4}$ días. Con unos pocos cambios menores, este calendario es el que sigue usándose hoy día.

9. ¿Cómo medimos los intervalos de tiempo inferiores a un día?

No existen cambios naturales, regulares y repetidos, inferiores a un día que atraigan la atención de los seres humanos. Pero ya desde tiempos antiguos se dejó sentir la necesidad de referirse a fracciones de día.

Durante el día puede considerarse la posición del sol en el cielo. Podemos, en efecto, hablar de amanecer, cuando el sol aparece en el horizonte oriental; de mañana, cuando continúa elevándose; de mediodía, cuando se halla en su punto más alto; de tarde, cuando declina; de atardecer, cuando desaparece en el horizonte occidental; de crepúsculo, cuando una luz mortecina precede a la noche cerrada. Una vez oscurecido, la operación resulta algo más difícil, pero las gentes obligadas a trabajar durante esas horas (sobre todo los marinos) pueden tener una idea aproximada del transcurso del tiempo observando la posición de las estrellas que efectúan su trayectoria por el firmamento.

Sin duda desearíamos medir el tiempo con más precisión, a fin de determinar la posición exacta del sol en el cielo. Se plantea sin embargo el problema de que si se fija la mirada en el sol para determinar esa posición exacta, el observador quedará ciego. Así pues, el hombre primitivo hubo de idear un método para conseguir esa medición sin mirar al sol, y la solución fue sencilla. Después de todo, el sol proyecta una sombra, y si se hinca un palo en el suelo, su sombra será muy alargada al amanecer, cuando el sol se halla en el horizonte oriental, y como es lógico apuntará hacia el Oeste. A medida que el sol cruza el cielo, la sombra se irá acortando y a

mediodía alcanzará la longitud mínima y apuntará al Norte (en el Hemisferio septentrional). A continuación, empezará a alargarse y a tomar la dirección Este.

Si se mantiene la vista fija en la sombra, es posible seguir el recorrido del sol meticulosamente, sin poner en peligro los ojos. Es posible que los primeros de estos relojes de sol fueran utilizados en Egipto hacia 3000 a. C. El palo o gnomon (de una palabra griega que significa «el que conoce»; el tiempo, se sobreentiende) se inclinó en dirección Norte, a fin de que el extremo de la sombra discurriera por un semicírculo, el cual podía dividirse en doce segmentos iguales llamados horas (de una palabra griega que significa «tiempo del día»). Los antiguos sumerios utilizaron por primera vez el doce como número común divisor. El reloj de sol funcionaba bien en Egipto, donde el tiempo es soleado durante casi todo el año, y donde la duración del día apenas varía con la sucesión de las estaciones; en cambio, más al Norte, la variación en la longitud del día es mayor, y a menudo el tiempo está nublado, y entonces el reloj de sol no sirve para nada.

Naturalmente, podía escogerse otro procedimiento seguro que no dependiera de la luz solar. Por ejemplo, se podía calcular el paso del tiempo quemando una vela de una longitud dada y hecha de una materia también siempre igual. Cuando se consumiera una cantidad determinada de la vela habría transcurrido, supongamos, una hora. O bien podía disponerse una cantidad de arena seca que resbalara de un recipiente superior a otro inferior, pasando a través de una pequeña abertura. Podría fijarse, por ejemplo, que toda la arena se vertiera en dos horas. Estos artilugios podían funcionar día y noche, con tiempo nublado o claro, y además eran portátiles.

Podía continuarse la medición del tiempo sustituyendo por una vela nueva la ya consumida, o volviendo del revés el reloj de arena, una vez esta última se hubiera vaciado de la ampolla superior. Con todo, estos dispositivos adolecían de defectos. Las distintas velas se gastaban en tiempos diferentes, e incluso una misma vela podía arder con mayor o menor rapidez, según la variación de las

corrientes de aire. Por lo que respecta a los relojes de arena, ésta pasaba por la abertura tanto más aprisa cuanto mayor fuera el peso de la arena acumulada sobre ella, con lo que sólo podían utilizarse para medir con exactitud la duración del vaciado total de la ampolla, pero no servían para determinar las fracciones.

Tal vez el mejor reloj antiguo fue la clepsidra o reloj de agua: esta última goteaba a través de un reducido orificio desde un depósito superior a otro inferior. Los primeros relojes de agua se remontan a 1400 a. C., y en el año 100 a. C. ganaron en eficacia, gracias a un flujo continuo de agua que alimentaba el depósito superior y lo hacía rebosar. De esta manera, dicho depósito siempre contenía la misma cantidad de agua, y el volumen del goteo no cambiaba con el tiempo. Más adelante, los relojes de agua fueron provistos de pequeños flotadores en los que había instaladas agujas, y que ascendían con el nivel del agua en el depósito inferior. La aguja señalaba entonces automáticamente el número de cada hora a medida que iba transcurriendo el tiempo.

Pero los relojes de agua se prestaban a confusión, pues de vez en cuando aquélla se vertía y era preciso secarla. En la Edad Media se aprovechó la gravedad. Un peso tiraba de una cuerda atada a un eje. A medida que el peso descendía a causa de la gravedad, obligaba al eje a girar, y una aguja unida a él iba marcando las horas en una esfera. El problema radicaba en adaptar el instrumento de tal manera que la aguja girara a una velocidad constante alrededor de la esfera en doce horas, o sea, que diera dos vueltas en un día. Hacia 1300, se inventó un mecanismo llamado «escape». Se trataba de un dispositivo dentado que retenía el eje y le permitía moverse sólo limitadamente. A continuación, el eje se liberaba, pero era agarrado por el diente siguiente, que le obligaba a girar lo bastante despacio y con regularidad como para medir un día entero.

Incluso el mejor de esos relojes de gravedad tendía a atrasar al menos un cuarto de hora diario, de modo que periódicamente debía ser comparado con un reloj de sol. Estos ingenios eran útiles para la mayor parte de las aplicaciones, pero no así para los experimentos

científicos, en los que algo puede depender de un intervalo exacto de tiempo.

En 1581, Galileo (de sólo diecisiete años por entonces) asistía a una ceremonia religiosa en la catedral de Pisa, y se encontró observando una lámpara movida por las corrientes de aire, que ora le hacían describir un amplio arco, ora otro más pequeño. Galileo consideró que cualquiera que fuese la amplitud del arco, la lámpara efectuaba un movimiento atrás y adelante igual número de veces. Midió el fenómeno contando los latidos de su propio pulso (el cual no brinda en verdad un criterio fiable porque su ritmo varía según la actividad mental y física). De nuevo en casa, experimentó suspendiendo pesos de las vigas, dejándolos oscilar describiendo arcos pequeños y amplios. De esta manera descubrió el principio del péndulo (de una palabra latina que significa colgar u oscilar).

El péndulo efectúa un movimiento que, en principio, puede utilizarse para conseguir que los engranajes de un reloj se muevan con gran regularidad. Sus dos inconvenientes consisten en que debe mantenerse el movimiento oscilatorio y que su tictac no es completamente regular.

En 1656, el físico holandés Christiaan Huygens (1629-1695) hizo oscilar un péndulo entre dos defensas curvas que le obligaban a moverse en un tipo de arco llamado cicloide, y de este modo su período era constante. También ideó métodos para utilizar pesas a fin de que el péndulo recibiera suficiente impulso, con objeto de mantener indefinidamente su oscilación.

El péndulo de Huygens fue el primer reloj lo bastante exacto para fines científicos. Podía medir el tiempo hasta la sesentava parte de la hora —o sea un minuto—, y por primera vez a un reloj se le pudo dotar de dos saetas. El minuterero efectuaba una vuelta completa cada vez que transcurría una hora. Desde entonces se han construido relojes capaces de medir el tiempo con suficiente exactitud como para señalar la sesentava parte de un minuto, esto es, un segundo, y por eso se les añadió una tercera saeta.

Hoy día pueden medirse con rigor incluso fracciones inferiores al segundo.

10. ¿Cuál es la edad de la Tierra?

Después de haber tratado de la medida del tiempo, planteémonos una pregunta acerca de la Tierra en relación con el tiempo: ¿cuál es la edad de la Tierra?

Sabemos con absoluta certeza que la Tierra tiene al menos 5000 años de existencia, pues disponemos de fuentes escritas que se remontan al 3000 a. C., cuando los sumerios inventaron la escritura. Conservamos artefactos, esto es, objetos debidos a la mano del hombre, como cerámica y estatuillas, que datan de antes de aquella fecha. Hasta los albores del siglo XIX, casi todas las personas pertenecientes a nuestra tradición occidental suponían que la Tierra contaba unos 6000 años de antigüedad. Quienes eso creían se basaban por entero en su interpretación de la Biblia, cuyas palabras aceptaban como verdad revelada por Dios, pero eso era materia de fe y no una prueba científica.

Naturalmente, hubo algunos —muy pocos— que reunieron pruebas y llegaron a conclusiones muy distintas de las que ofrecía la Biblia. Esos pensadores consideraban que las fuerzas de la naturaleza —la lluvia, el viento, la acción de las olas— iban cambiando lentamente el aspecto de la Tierra. Concluyeron que esas fuerzas podían explicar buena parte de dicho aspecto en nuestros días, con tal de que hubieran dispuesto de un tiempo lo bastante prolongado para actuar: mucho más de 6000 años. Uno de los hombres que así pensaron fue el erudito francés Bernard Palissy (h. 1510-1589).

Quienes aceptaban la antigüedad de 6000 años no negaban la existencia del cambio, pero lo atribuían por entero a la leyenda del

diluvio universal. Palissy se negó a creer en la posibilidad de ese diluvio de alcance mundial, y sugirió que el aspecto de la Tierra se debía a lentos cambios producidos a lo largo de prolongados períodos de tiempo. Fue ejecutado en la hoguera en 1589: mala época para los que pensaban por su cuenta.

En 1681, un clérigo inglés, Thomas Burnet (h. 1635-1715), escribió un libro en apoyo del relato del diluvio, pero en 1692 publicó otra obra en la que ponía en duda la historia de Adán y Eva, lo que arruinó su carrera.

En 1749, el francés Georges-Louis de Buffon (1707-1788) empezó a escribir una extensa enciclopedia en la que trató de explicar el mundo en términos naturalistas. Estimó que la Tierra había precisado al menos 75 000 años para alcanzar su presente estado. Esta conclusión le ocasionó dificultades, y se vio obligado a retractarse, como en su momento lo hiciera Galileo.

Pero a la postre nada pudo evitar que la gente pensara. El punto de inflexión cabe situarlo en 1795, cuando el geólogo escocés James Hutton (1726-1797) escribió un libro titulado *Teoría de la Tierra*, en el que compiló cuidadosamente todas las pruebas en favor de la noción de cambios graduales actuantes en un prolongado período de tiempo. Durante el medio siglo que siguió, aproximadamente, los científicos empezaron a aceptar el punto de vista de Hutton, que pasó a llamarse uniformismo: el cambio lento y constante. Esta teoría, sin embargo, no da cuenta de los episodios catastróficos ocasionales, como las erupciones volcánicas gigantescas.

Los científicos empezaron entonces a considerar qué cambios se estaban operando en la Tierra en aquel momento, y a calcular con cuánta rapidez acontecían. Si se admite que los cambios se producen siempre al mismo ritmo, puede deducirse cuánto tiempo llevan actuando para haber modelado el aspecto actual de nuestro planeta.

El primero en dedicarse a esos cálculos fue Edmund Halley, que había sido también el primero en determinar las causas de que

sople el viento. En 1715 estudió la salinidad marina y razonó que la sal había sido transportada hasta el mar por los ríos, los cuales disolvían pequeñas cantidades de sal del terreno que atravesaban. Descubrió además que el agua puede evaporarse del mar por causa del calor del sol, pero no así la sal, de modo que toda la lluvia que se vierte es potable, y cuando alimenta los ríos y regresa al mar, aporta a éste más sal.

Si imagina que en un principio el océano estaba compuesto de agua dulce, y calcula cuánta sal le aportan los ríos, averiguará cuánto tiempo han precisado los ríos para comunicar a los océanos su actual grado de salinidad. Este razonamiento parece plausible, pero no deja de plantear incertidumbres. En primer lugar, tal vez los océanos no eran de agua dulce en sus comienzos, sino que siempre contuvieron sal. Y tampoco se conocía con exactitud la cantidad de sal aportada anualmente por los ríos. En tiempo de Halley se ignoraba casi todo acerca de los ríos extraeuropeos. Cabía pues la posibilidad de que el total de sal acarreada hasta el océano fuera hoy inferior o superior a la de tiempos pasados. Por no mencionar ciertos procesos que extraen la sal del océano. La evaporación ordinaria no provoca ese fenómeno, pero en ocasiones algunos brazos de mar quedan aislados y acaban secándose, dejando vastas áreas que se convierten en minas de sal.

Halley trató de hallar explicación a esas irregularidades, y al cabo decidió que para que los océanos hubieran alcanzado su salinidad actual, la Tierra debería contar mil millones de años de antigüedad. Esta cifra parecía tan inadmisiblemente elevada, que nadie pudo tomarla en serio en aquella época. Superaba en más de 13 000 veces la duración estimada por Buffon casi tres cuartos de siglo después, pero las condiciones eran más favorables en la Gran Bretaña de entonces, y Halley no fue molestado.

Otro procedimiento para calcular la edad de la Tierra se basaba en las cantidades de sedimentos. Los ríos, lagos y océanos del mundo contenían fango que se depositaba en el fondo y formaba los llamados sedimentos (de una palabra latina que significa

asentamiento). A medida que se iban acumulando sedimentos en el fondo, el peso de las capas superiores comprimía las inferiores, transformándolas en rocas sedimentarias. Se pudo calcular el ritmo al que se produce la sedimentación en época actual, y si se admitía que había regido siempre el mismo ritmo, cabía deducir el tiempo necesario para producir el grosor de roca sedimentaria que se encontraba en la Tierra. Los resultados así obtenidos arrojaron una antigüedad que parecía atribuir a la Tierra más de 500 millones de años.

Pero esas estimaciones eran muy toscas. Resultaban sugestivas pero no convincentes. Lo que se precisaba era hallar un cambio absolutamente regular, que estuviera operándose en la Tierra desde su mismo principio y que se midiera con facilidad. Nadie creía posible tal cambio en los tiempos de Halley o Hutton, y cuando por fin se dio con él, un siglo después de Hutton, el descubrimiento se debió por entero al azar.

11. ¿Cómo se determinó finalmente la edad de la Tierra?

En 1896, el físico francés Antoine-Henri Becquerel (1852-1908), mientras buscaba otra cosa, descubrió por casualidad que cierta sustancia que contenía átomos del metal llamado uranio emitía radiaciones hasta entonces desconocidas. La química francopolaca Marie Sklodowska Curie (1867-1934) prosiguió el estudio del fenómeno, y en 1898 llegó a la conclusión de que la nueva radiación era resultado de la radiactividad. El uranio y otro tipo de átomo, el torio (similar al anterior), eran radiactivos. El químico británico Frederick Soddy (1877-1956) fue uno de los que en 1914 demostraron que, como resultado de la radiactividad, los átomos de uranio y de torio se descomponían en átomos más simples, los cuales a su vez se descomponían en otros hasta que, por fin, al término de la llamada cadena radiactiva, se producían átomos de plomo. Éstos no eran radiactivos, de modo que el proceso de degradación concluía.

Con Soddy trabajaba el neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937), quien demostró que todo elemento radiactivo tenía lo que llamó una vida media. En otras palabras, una cantidad dada de cualquier elemento radiactivo perdía la mitad de sus átomos por descomposición durante un tiempo cuya duración era característica. La mitad de lo que restaba se perdía a continuación en otro período de tiempo, y lo mismo ocurría con la mitad de lo que quedaba, etc. Esto significaba que podía predecirse con exactitud cuánta cantidad de uranio o de torio se perdería transcurrido un número determinado de años.

Pero resultó que tanto el uranio como el torio se descomponían muy, muy despacio. La vida media del uranio era de 4500 millones de años, y la del torio, 14 000 millones. Estas vidas medias tan prolongadas demostraban por qué el uranio y el torio continuaban presentes en la corteza terrestre, aun en el caso de que Halley y otros estuvieran en lo cierto y la Tierra tuviese mil millones de años de antigüedad. Este descubrimiento también señaló un límite máximo a dicha antigüedad: si la Tierra tenía un billón de años, la mayor parte de su uranio y su torio ya se hubieran descompuesto.

En 1907, aun antes de que la naturaleza de la descomposición radiactiva se hubiera desentrañado por completo, el físico norteamericano Bertram Borden Boltwood (1870-1927) sugirió que si una roca contenía uranio, éste se descompondría lentamente y produciría plomo a un ritmo fijo. De la cantidad de plomo producida, podría calcularse cuánto tiempo llevaba la roca en su lugar, entera e inafectada.

No resultaba tan fácil determinarlo, porque la roca pudo haber contenido ya desde buen principio algo de plomo. Pero este último se presenta en cuatro variedades íntimamente vinculadas llamadas isótopos, los cuales se hallan de forma natural en ciertas proporciones fijas. Uno de los isótopos no se produce por descomposición radiactiva, y si se mide en qué proporción se encuentra ese isótopo en la roca, es posible calcular cuánta cantidad de los cuatro isótopos contenía la roca en un principio. Así pues, en la determinación de la edad de las rocas sólo cuenta la presencia de exceso de plomo.

No resultaba difícil encontrar rocas de mil millones de antigüedad, y la estimación original de Halley ya no se consideró ridícula. En efecto, en 1931 se descubrieron rocas de 2000 millones de años, y las más antiguas conocidas se han localizado en el oeste de Groenlandia: tienen 3800 millones de años.

Pero eso sólo nos da cuenta de los años que tienen las rocas más antiguas que podemos encontrar en la Tierra. Esta última puede aventajarlas en edad, pero antes de esos 3800 millones de

años la acción volcánica pudo haber fundido una y otra vez las rocas, de tal manera que no haya sobrevivido ninguna en la intacta forma sólida que presentaba en ese remoto período. En realidad, los científicos han sido capaces de resolver ese problema del modo que describiré más adelante. En la actualidad se acepta generalmente que la Tierra cuenta 4600 millones de años.

12. ¿Qué es la masa?

Con objeto de averiguar algo más acerca de la Tierra, consideramos útil precisar qué entendemos por masa. Pero antes de proceder a la pertinente explicación debemos preguntarnos también qué significa el peso.

El peso es el resultado de la atracción que la Tierra ejerce sobre un objeto en concreto. Algunos objetos son atraídos con tal fuerza, que resulta difícil contrarrestar la fuerza de la gravedad: tales objetos se dice que son pesados. Sobre otros objetos la fuerza ejercida es menor, y por ello resulta más fácil levantarlos, o sea, que son ligeros. El peso lo medimos en kilogramos.

De acuerdo con la ley de la gravitación de Newton, la atracción ejercida por la Tierra varía con la distancia. Esa fuerza actúa como si se concentrara en el centro del planeta, y nosotros nos hallamos en su superficie, a 6350 km de distancia. No somos conscientes de la mayor parte de los cambios gravitatorios que se producen, pues al fin y al cabo siempre nos encontramos más o menos a la misma distancia del centro de la Tierra. Ni siquiera la escalada del pico más alto o el descenso a las mayores profundidades oceánicas significa un cambio notable, y de ahí que usualmente consideremos el peso como una fuerza que no experimenta variación.

Pero si lográsemos elevarnos a una altitud de 6350 km por encima de la superficie terrestre, nos hallaríamos a una distancia doble del centro de la que nos encontramos ahora, y la incidencia de la gravedad se reduciría 2×2 veces, o sea 4. Si pudiéramos alcanzar esa altura mediante una escalera, sentiríamos que sólo

alcanzábamos una cuarta parte de nuestro peso normal, y cuanto más ascendiéramos, menos pesaríamos.

Isaac Newton, que formuló las leyes del movimiento en 1687, buscó una medida igual al peso, pero que no guardara relación alguna con la fuerza de la gravedad y que, por consiguiente, no variase con la distancia respecto a la Tierra. Si un objeto pesa más que otro, se debe a que el primero es atraído con más fuerza por la Tierra. ¿Existe otro procedimiento para determinar dicha diferencia?

Newton sostenía que la velocidad de un objeto puede incrementarse o disminuir, o bien puede alterarse su dirección, sólo mediante la aplicación de una fuerza, y que ese objeto pesado requiere una fuerza superior a la que precisa otro ligero.

Realmente, eso pertenece a la experiencia común de los seres humanos. Suponga usted que tiene una pelota de básquet en el suelo, y que desea imprimirle movimiento. No es difícil: bastará un impulso de su dedo, y una vez la pelota se halle en movimiento, otro empujón la hará cambiar de dirección o la detendrá. Suponga ahora que lo que tiene es una bala de cañón, de hierro, y del mismo tamaño que la pelota de básquet, la cual sigue en reposo sobre el suelo. La primera es mucho más pesada que la segunda, por lo que si trata de mover la bala se encontrará con que precisa un mayor esfuerzo, y una vez ha conseguido moverla, advertirá que ha de aportar también mayor fuerza para detenerla o desviarla.

La resistencia de un objeto a los cambios en su movimiento se llama inercia, y la cantidad de esta última que posee un objeto se denomina su masa. La masa no cambia según la fuerza o debilidad de un campo gravitatorio, de modo que los científicos prefieren referirse a la masa antes que al peso. Dicen que un objeto tiene más o menos masa, mejor que más o menos peso.

Lo mismo que el peso, la masa se mide en kilogramos, y ello se hace de dos maneras: determinando el peso, con tal de que se tenga en cuenta la fuerza del campo gravitatorio en que se halle, o bien determinando la inercia, en cuyo caso el campo gravitatorio no cuenta. Los dos métodos parecen no guardar relación alguna, pero

siempre dan el mismo resultado, pues las masas gravitatoria e inercial son una misma, hecho éste que desconcierta a los científicos.

13. ¿Qué es la masa de la Tierra?

La masa de la Tierra plantea un problema, por supuesto. No podemos medir su masa inercial porque tiene demasiada masa como para que podamos generar una fuerza capaz de alterar su movimiento apreciablemente. Tampoco podemos medir la masa gravitatoria de la Tierra porque no hay forma de pesarla. Pero es que realmente no hace falta pesarla. Si toma usted un objeto corriente y mide su impulso gravitatorio a cierta distancia, puede compararlo con la fuerza gravitatoria producida por la Tierra a la mucha mayor distancia que media entre su centro y su superficie. Si conoce la masa del objeto corriente, puede calcular la de la Tierra.

El problema radica en que la gravitación es una fuerza tan increíblemente débil que se manifiesta en cantidad sólo con un objeto pesado. Creemos que la gravedad es fuerte, lo bastante fuerte como para matar, pero sólo es así porque la asociamos con la Tierra, que es enorme. Un objeto ordinario, como un trozo de hierro, produce una atracción gravitatoria que ni siquiera puede ser medida. O al menos así parece.

El científico británico Henry Cavendish (1731-1810) zanjó el problema en 1798. Colgó un pararrayos por su centro mediante un alambre, y en cada extremo de la varilla ató una bolita de plomo. El pararrayos podía girar de un lado a otro libremente, sujeto como estaba por el alambre, de tal manera que una fuerza mínima aplicada a las bolas determinaría el movimiento. De este modo, Cavendish logró medir el giro que eran capaces de imprimir diversas pequeñas fuerzas.

A continuación dispuso dos bolas metálicas de amplio diámetro cerca de las pequeñas, una a cada lado. La fuerza de gravedad entre las bolas grandes y la pequeña imprimía un leve giro al alambre, y la extensión de dicho giro permitió a Cavendish calcular la fuerza gravitatoria entre los dos pares de bolas. Conocía la distancia que mediaba entre ellas, de centro a centro, y las masas respectivas. Conocía asimismo el valor de la fuerza, muy superior, ejercida por la Tierra sobre las bolas en función de la distancia entre el centro del planeta y su superficie. A partir de la diferencia de fuerzas entre la atracción gravitatoria, pudo calcular la masa de la Tierra.

Decidió que dicha masa equivalía a 6×10^{24} kg. (O sea, seis mil trillones de kilogramos). Seguimos dando esta cifra por buena, o sea que Cavendish hizo un excelente trabajo, habida cuenta de que era la primera vez que se intentaba la medición.

14. ¿Qué es la densidad?

Podría parecer que un objeto de gran tamaño habría de tener, invariablemente, una masa superior a la de otro objeto de menores dimensiones. Pero la experiencia nos enseña que eso no es cierto. Un objeto grande hecho de corcho puede tener menos masa (y peso, en este caso) que otro objeto menor hecho de plomo. Sencillamente, algunos materiales parecen encerrar más masa que otros en el mismo volumen. La cantidad de masa en un volumen dado representa la densidad de un objeto, y de ahí que podamos decir que unos objetos son más densos que otros.

El agua contenida en un recipiente de 1 cm de lado (es decir, 1cm^3) pesa exactamente 1 g. (Esto no es una coincidencia, pues los valores de ambas unidades fueron escogidos deliberadamente a fin de que se obtuviera ese resultado).

Si conocemos la masa de un objeto en gramos y su volumen en centímetros cúbicos, podemos dividir la masa por el volumen y obtener así una cifra que representará la densidad.

Los antiguos griegos descubrieron cómo determinar el volumen de una esfera a partir de su diámetro, y puesto que conocemos el diámetro de la Tierra, podemos calcular su volumen. Una vez Cavendish hubo determinado la masa de la Tierra, estuvo en condiciones de averiguar su densidad, dividiendo la masa por el volumen. De esta operación resulta que la densidad promedio de nuestro planeta es $5,518\text{ g por cm}^3$, esto es, que es 5,518 veces más densa que el agua.

15. ¿Es hueca la Tierra?

Esta pregunta puede sorprender a algunos de ustedes, que ni por un momento han creído que la Tierra pudiera estar hueca, pero muchas personas lo han creído así a lo largo de los siglos, y la idea ha inspirado muchos relatos y leyendas. Después de todo hay cuevas, aunque sólo sean superficiales. La más honda conocida se halla en los Pirineos occidentales y sólo mide 1,17 km de profundidad, lo que es bien poca cosa si se compara con los 6350 km que nos separan del centro de la Tierra. Pero nunca faltan personas lo bastante fantasiosas como para dar con una cueva que las conduzca a las profundidades del interior hueco de la Tierra.

La idea de que nuestro planeta puede estar hueco se remonta a los tiempos más primitivos. En los mitos griegos, los gigantes que se rebelaron contra Zeus fueron encadenados bajo tierra, y se creía que sus contorsiones provocaban los terremotos. El Hades de los griegos y el Sheol de los judíos se localizaban supuestamente en el ámbito subterráneo, y la existencia de volcanes parecía confirmar que el interior de la Tierra era un lugar lleno de fuego y azufre, apropiado para aplicar torturas.

En los primeros tiempos de la ciencia, algunos estudiosos se empeñaron en justificar esa idea, de origen religioso, de una Tierra hueca. En 1665, el erudito alemán Athanasius Kircher (h. 1601-1680) publicó un libro de geología que alcanzó el mayor prestigio en su tiempo. El autor describía la Tierra agujereada por cavernas y túneles en los que habitaban dragones. A principios del siglo XIX, el militar norteamericano Cleve Symmes (1742-1814) expuso unas elaboradas teorías sobre la Tierra hueca, y sostuvo que en las

regiones polares septentrionales había aberturas a través de las que el hombre podía acceder al interior. La idea cautivó la imaginación de las gentes en la forma en que suelen hacerlo las nociones desatinadas, incluso en nuestra época, y con posterioridad a Symmes se registró una constante afluencia de libros de ciencia-ficción que relataban viajes al centro de la Tierra. En 1864, el escritor francés Jules Verne (1828-1905) publicó el mejor de esos títulos: *Viaje al centro de la Tierra*, en el que describía océanos subterráneos, dinosaurios y hombres mono, y sugería que la abertura que daba acceso al interior estaba en Islandia. Con anterioridad, Edgar Allan Poe (1809-1849) había escrito un relato parecido, en el que la abertura se situaba en el Polo Norte.

Naturalmente, cuando el explorador norteamericano Robert Edwin Peary (1856-1920) alcanzó el Polo Norte en 1909, quedó de manifiesto que no había tales aberturas en aquellas regiones septentrionales. Pero aun así continuaron publicándose historias al respecto. La más popular de cuantas se referían a la Tierra hueca fue una serie escrita por Edgar Rice Burroughs (1875-1950) dedicada a Pellucidar, el nombre que dio al mundo subterráneo. La primera novela se publicó en 1913.

Y, sin embargo, nos consta desde 1798 que la Tierra no es hueca ni puede serlo. Una vez Cavendish hubo medido su masa, supimos que su densidad era de 5,5 g por cm^3 (la cifra que suele darse es 5,518). Por término medio, la densidad de las rocas en la corteza terrestre es de 2,8 g por cm^3 . Si la Tierra fuera hueca, y ese espacio estuviera lleno de aire, como cabría suponer, la densidad total sería inferior a los 2,8 g por cm^3 . El hecho de que la densidad promedio sea de 5,518 g por cm^3 nos revela que el interior ha de ser, en realidad, considerablemente más denso que las rocas de la corteza. O sea, que de ningún modo puede ser hueca la Tierra. Muchas otras razones así lo demuestran, pero la densidad por sí sola ya aporta una prueba convincente.

16. ¿A qué se parece realmente el interior de la Tierra?

Puesto que sabemos que la corteza parece tener una densidad de $2,8 \text{ g por cm}^3$, y que la densidad de la Tierra en su conjunto es de algo más de $5,5 \text{ g por cm}^3$, de inmediato deduciremos que una parte de la densidad interna de la Tierra debe superar los $5,5 \text{ g}$ para que cuadre la cifra total.

Si pensamos un poco más en esta particularidad, puede ocurrir que lleguemos a conclusiones que ya esperábamos. El tamaño de una bola ordinaria de materia que podemos manipular en el laboratorio es tan pequeño, que sus efectos gravitatorios resultan inapreciables. En el caso de la Tierra, sin embargo, actúa una enorme fuerza gravitatoria que ejerce una atracción hacia su centro. Supongamos que el interior de la Tierra está completamente formado por rocas: las capas inferiores de éstas deberían ser aplastadas bajo el peso de las superficiales. Este peso que actúa comprimiendo los estratos más profundos reduciría su masa hasta darle un volumen menor. Así, de manera natural, las capas más profundas presentarían una densidad más elevada que las demás capas, lo que podría dejar el problema resuelto.

Pero no es así. Los seres humanos pueden ejercer cierta presión sobre la roca y calcular a qué presión aquélla se comprime y aumenta su densidad. Resulta de ello que todo el peso de las capas superficiales de la Tierra no puede llevar a las capas más profundas a una densidad siquiera aproximada a la precisa para obtener el promedio de $5,5 \text{ g por cm}^3$.

De ello podemos concluir que la Tierra no es roca sólida, y que en los estratos más profundos debe haber otros materiales mucho más densos que la roca. Pero ¿cuáles son esos materiales y cómo podemos averiguar algo acerca de ellos? Ya he dicho que las cuevas naturales más hondas tienen escasa profundidad. El pozo de petróleo más hondo que se ha excavado ha alcanzado los 9600 m, lo cual significa alrededor de la seiscientas setentava parte de la distancia hasta el centro de la Tierra.

Así pues, ¿somos completamente incapaces de llegar a saber algo acerca del centro de la Tierra? En realidad, no. De forma ocasional se producen terremotos que agitan la superficie terrestre y provocan elevadas vibraciones que viajan a través del interior de la Tierra en forma de distintos tipos de ondas. Este movimiento ondulatorio se asemeja a la manera en que las ondas se propagan por la superficie de un estanque cuando se agitan sus aguas, o es similar a como las ondas sonoras se desplazan por el aire. De hecho, algunas ondas sísmicas, las llamadas primarias u ondas P, tienen unas propiedades que las hacen semejantes a las ondas sonoras, mientras que las llamadas ondas secundarias u ondas S comparten sus propiedades con las ondas acuáticas.

Las ondas sísmicas avanzan a través de la Tierra y pueden emerger en la superficie a una distancia considerable del punto donde se registró el fenómeno. El primero y más sencillo de los instrumentos para estudiar esas ondas, el sismógrafo, fue inventado en 1855 por el físico italiano Luigi Palmieri (1807-1896). Los sismógrafos no tardaron en perfeccionarse en los años siguientes, y en la década de 1890 el ingeniero británico John Milne (1850-1913) instaló una serie de sismógrafos en diversas partes del mundo. Ahora existen más de cien sismógrafos de gran complejidad distribuidos por la superficie del planeta.

Como los sismógrafos nos informan de dónde y cuándo reaparecen las ondas sísmicas, los científicos pueden reconstruir el camino que recorren a través de la estructura terrestre. Si las propiedades de la sustancia que constituye la Tierra fuera la misma

en todas partes, esas ondas viajarían siempre a la misma velocidad y en línea recta. Pero dado que la densidad de la Tierra se incrementa con la profundidad, debida en parte a la compresión, la trayectoria que siguen las ondas se curva. De la naturaleza de las curvas, los científicos pueden deducir en qué medida aumenta la densidad de la Tierra a profundidades diversas. En algunos lugares, las ondas se desvían abruptamente de su trayectoria, lo que pone de manifiesto un cambio súbito en la densidad debido a una diferencia en la estructura química antes que a un cambio gradual determinado por la compresión.

El estudio de las ondas sísmicas establece tres divisiones principales en la estructura terrestre. La capa más superficial se denomina corteza, y está constituida por las rocas que nos resultan familiares. Unos 32 km por debajo de la superficie se registra un cambio brusco que fue descubierto en 1909 por el geofísico croata Andrija Mohorovicic (1857-1936). Se ha llamado por esta razón discontinuidad de Mohorovicic o, simplemente, Moho. Bajo la corteza terrestre se extiende el manto, que también se compone de roca. Estas rocas del manto son más densas que las de la corteza, en parte porque están comprimidas y en parte porque su material es más denso por naturaleza. Pero el manto no es lo bastante denso como para dar cuenta por sí mismo de la elevada densidad media de nuestro planeta.

A una profundidad de 2900 km por debajo de la superficie, las ondas sísmicas se desvían de nuevo bruscamente, fenómeno demostrado por primera vez en 1914 por el geólogo alemán Bruno Gutenberg (1889-1960). La región más interior de la Tierra, el núcleo, es por supuesto lo bastante densa como para explicar la elevada densidad media terrestre. Los científicos determinaron la composición del núcleo al advertir que las ondas P lo atraviesan, pero no las ondas S. Las propiedades de estas últimas les impiden atravesar un líquido, cosa que sí pueden hacer las P. Lo cual nos permite deducir que la mayor parte del núcleo terrestre se halla en estado líquido. (La corteza, el manto y el núcleo líquido guardan

entre ellos una relación muy parecida a la de la cáscara, la clara y la yema de un huevo, pero ésta es una simple coincidencia interesante y nada más).

Queda por decidir, sin embargo, en qué consiste el núcleo, pues puede estar hecho de sustancias más densas que la roca y con puntos de fusión más bajos. Los candidatos más comunes son los diversos metales: así pues, sospechamos que la Tierra cuenta con un núcleo de metal líquido. Pero ¿de qué metal se trata?

En realidad, tuvimos una respuesta verosímil a esa pregunta mucho antes de que los datos sismológicos revelaran los mínimos detalles de la estructura interna de la Tierra. Los meteoritos inciden ocasionalmente en la superficie terrestre (ya me referiré a ellos más adelante) y, aunque la mayor parte de ellos son de naturaleza rocosa, alrededor del 10% son metálicos. En estos casos, son siempre de hierro y de otro metal afín, el níquel, en una proporción de 9 a 1.

El geólogo francés Gabriel-Auguste Daubrée (1814-1896) sugirió ya en 1886 la posibilidad de que el núcleo terrestre estuviera formado por una mezcla de níquel y hierro. La idea parecía razonable, y la mayoría de los científicos actuales admiten que el núcleo terrestre está compuesto por un 90% de hierro y un 10% de níquel, si bien tampoco faltan argumentos en favor de la presencia de oxígeno, azufre o ambos en cantidades significativas.

17. ¿Se desplazan los continentes?

Puesto que hemos mencionado los terremotos, es lógico que consideremos cuál puede ser su causa, y para ello nos interrogaremos en primer lugar sobre si los continentes se desplazan. Desde luego que se mueven, en el sentido de que giran en torno al eje terrestre como parte del globo que son, pero ¿experimenta cada uno de ellos algún movimiento en relación con los demás?

Podría parecer obvia una respuesta negativa. ¿Cómo podrían moverse los continentes? Lo cierto es que ya en tiempos pasados se tenía la sensación de que los continentes o partes de ellos se movían, al menos en el sentido de que podían emerger o hundirse. En 540 a. C., el filósofo griego Jenófanes (h. 560-h. 480 a. C.) señaló que en ocasiones se hallaban conchas marinas enterradas en las rocas de los picos montañosos, esto es, que en otro tiempo aquellas alturas debieron haber estado sumergidas. Estos hallazgos le llevaron a sostener que las montañas se formaron a partir de un material que se hallaba al nivel del mar y que fue elevado desde allí por algún empuje. En esto estaba completamente en lo cierto, pero nadie le tomó en serio en su tiempo.

Hacia 1889, el geólogo norteamericano Clarence Edward Dutton (1841-1912) exhumó la idea pero aportándole mayor complejidad. Sostenía, en efecto, que las rocas que formaban los continentes eran menos densas que las que constituían el fondo marino. De modo que los continentes flotaban considerablemente más que los fondos oceánicos y en consecuencia sobresalían por encima de la superficie de los mares. Las regiones montañosas se apoyaban

sobre roca menos densa, y de ahí que sobresalieran también del nivel general del terreno. Dutton llamó a ese fenómeno isostasia. Pero aunque los continentes y sus partes estuvieran sometidos a movimientos ascendentes y descendentes, no parecía haber indicio de que se desplazaran de su sitio.

Y, sin embargo, el mapamundi resulta sugestivo. Una vez descubierto el continente americano y cartografiado su litoral atlántico, se puso de manifiesto un hecho curioso que señaló por vez primera el filósofo británico Francis Bacon (1561-1626). Si mira usted la costa oriental de Sudamérica, advertirá que encaja notablemente bien con la costa occidental de África. Es imposible mirar el mapa y no empezar a preguntarse si África y Sudamérica formaron parte alguna vez de una misma masa terrestre que luego se partió por la mitad, tras lo cual las partes segregadas se separaron.

En 1912, el geólogo alemán Alfred Lothar Wegener (1880-1930) estudió la cuestión con detalle y señaló que ambos continentes pudieron haberse desplazado hasta separarse, flotando sobre rocas más pesadas situadas bajo los océanos. En efecto, según su teoría, todos los continentes formaron parte en otro tiempo de una única masa de tierra a la que llamó Pangea (de las palabras griegas que significan «toda la Tierra»), la cual se fragmentó y dio lugar a continentes separados. Este fenómeno lo denominó deriva continental. En cierto modo tenía razón, pero la idea de que los continentes flotaban sobre los fondos oceánicos resultaba inconsistente, pues las rocas que subyacían a aquéllos eran demasiado rígidas para permitirlo. La idea, por tanto, fue desechada en 1960.

Pero entonces se abrió paso otra idea. En la década de 1850 hubo intentos de tender un cable a través del fondo del océano Atlántico, lo que permitiría enviar telegramas entre Norteamérica y Europa. Un oceanógrafo de aquel país, Matthew Fontaine Maury (1806-1873), sondeó el océano Atlántico a fin de decidir cuál sería la mejor trayectoria para el cable. Durante las operaciones, en 1854

descubrió que la profundidad de dicho océano era menor en medio que en ambas orillas. Ello le indujo a creer que existía una meseta en aquella zona, que denominó meseta del Telégrafo.

Resultaba muy difícil efectuar sondeos en el océano. Era preciso lanzar un cabo lastrado, que debía tener miles de metros de longitud, determinar cuándo alcanzaba el fondo, izarlo de nuevo y proceder a la consiguiente medición. Era una tarea muy tediosa y además incierta, por lo que se podían medir unos pocos puntos con exactitud en el transcurso de un solo viaje. Por tanto, el trabajo de Maury fue tan sólo un comienzo.

En 1872, una expedición británica al mando de Charles Wyville Thomson (1830-1882) pasó cuatro años en la mar, viajó a través de 78 000 millas y realizó 372 sondeos en aguas profundas, con un cabo de 6400 m. Durante medio siglo esta prueba no fue superada, pero la expedición dio todavía una visión muy tosca del fondo oceánico. Durante la primera guerra mundial se desarrolló la técnica del eco, que empleaba ondas ultrasónicas, demasiado altas para ser percibidas por el oído humano, pero que penetraban hasta el fondo del océano y, una vez reflejadas por éste, regresaban en cuestión de minutos. El lapso que mediaba entre la emisión de dichas ondas y su recepción permitía estimar la profundidad. En 1922, un buque alemán fue el primero en aplicar esta técnica a la exploración de los océanos, y de este modo llegamos a conocer con detalle la naturaleza del fondo.

El más grande de los exploradores del fondo oceánico fue el geólogo norteamericano William Maurice Ewing (1906-1974), quien llevó a cabo innumerables mediciones, y ya en 1950 demostró que la meseta del Telégrafo no era tal, sino una larga y escarpada cordillera que se incurvaba en medio del Atlántico. Algunos de sus picos más elevados asomaban fuera del océano, formando islas. En 1956, Ewing demostró que esa cordillera se extendía en torno a África por el océano Índico y a la Antártida por el Pacífico. Se trataba de un sistema montañoso que circundaba el mundo y que recibió el nombre de Dorsal oceánica. En 1957, Ewing demostró

también que existía una profunda falla, la Gran Falla global, que recorría el centro de la dorsal, lo que comunicaba la impresión de que la corteza terrestre estaba fragmentada en numerosas placas íntimamente encajadas. Se las denominó placas tectónicas, de la palabra griega que significa carpintero, porque su unión era tan ajustada que parecía, en efecto, un trabajo de carpintería.

Otro geólogo norteamericano, Harry Hammond Hess (1906-1969), estudió las placas tectónicas y en 1962 sugirió que los materiales de las regiones más profundas de la Tierra surgían a través de la Gran Falla global, situada en medio del océano Atlántico, y forzaban la separación de las placas a ambos lados. La placa de la parte africana era empujada hacia el Este, y la de la parte sudamericana, al Oeste, en tanto el océano que se extendía entre ambas iba ensanchándose, en un proceso llamado de extensión del fondo marino. Esta idea no tardó en ser aceptada por los geólogos. Sudamérica y África, en efecto, habían constituido originalmente una única masa terrestre, tal como sugiriera Wegener, pero no se separaron porque flotaban y se desplazaban, sino porque sobre esos continentes actuaba una fuerza que los apartaba. Wegener había llegado a una conclusión acertada, pero se equivocó en cuanto al mecanismo que sospechó era el causante del fenómeno. En cambio, el nuevo mecanismo propuesto era correcto, y toda la geología se interpreta hoy sobre la base de la tectónica de placas, esto es, el estudio del lento movimiento de las placas tectónicas.

18. ¿Cuál es la causa de los terremotos y de los volcanes?

Los terremotos y los volcanes existen desde los tiempos más antiguos. Siempre han tenido gran capacidad de destrucción y han conseguido aterrorizar a los seres humanos, pues en cuestión de minutos pueden matar a muchos miles de personas. La erupción volcánica más fuerte registrada en tiempos históricos destruyó de repente la isla de Tera, en el mar Egeo, al norte de Creta, hacia el año 1500 a. C. La isla no había manifestado signo alguno de potencial volcánico en la memoria de quienes allí habitaban, pero en las profundidades de la Tierra la presión acabó por hacer estallar la cumbre del volcán. No sólo quedó destruida Tera, suceso que probablemente dio nacimiento a la leyenda de la Atlántida, sino que la isla de Creta resultó tan dañada por la lluvia de cenizas y por los maremotos, que su floreciente civilización sobrevivió poco tiempo. De hecho, todo el Mediterráneo oriental se precipitó en el caos, y el Imperio egipcio entró en una decadencia de la que ya no se recobraría.

En Italia, un volcán próximo a Nápoles también había permanecido inactivo durante tanto tiempo que las gentes se olvidaron del peligro. Pero en el año 79 entró en erupción y enterró las ciudades de Pompeya y Herculano. El gran escritor latino Plinio (23-79) murió al acercarse demasiado en su intento de observar y describir la erupción. Ésta mató a 4000 personas, pero el monte Etna, en Sicilia, el más elevado y el más continuamente activo de los volcanes europeos, acabó con 20 000 vidas en una erupción registrada en 1669. Otra gran catástrofe tuvo por escenario Islandia

en 1783. Dos volcanes indonesios estallaron en 1815 y 1883, respectivamente: el Tambora, en la isla de Sumbawa, y el Krakatoa. En estos dos casos y en el anterior, las pérdidas humanas fueron cuantiosas. En 1902, entró en erupción el monte Pelée, en la isla de la Martinica, en las Indias occidentales. Proyectó por la ladera, hasta alcanzar la entonces capital de la Martinica, Saint Pierre, gases ardientes y venenosos que, en tres minutos, dieron muerte a sus 38 000 habitantes, excepto uno solo, que se salvó. (El cual era un asesino convicto que aguardaba su ejecución en un calabozo subterráneo).

Los terremotos aún pueden ser más mortíferos. El 24 de enero de 1556, uno de ellos se cree que aniquiló en pocos minutos a 800 000 personas en la provincia china de Shensi. En 1703, otro produjo 200 000 víctimas en Tokio, y en 1737 perecieron por la misma causa 300 000 personas en Calcuta. El mayor de los terremotos europeos en tiempos modernos se registró el 1 de noviembre de 1775 en Lisboa: un movimiento sísmico (al que siguieron un maremoto y un incendio) destruyó la ciudad y ocasionó 60 000 muertos. También se produjo un terrible temblor de tierra en 1812 a lo largo del río Mississippi, en las cercanías de la localidad actual de Nuevo Madrid, pero por entonces la zona estaba tan despoblada que no hubo desgracias personales.

¿Qué causa estos fenómenos? Podemos desechar teorías arcaicas de dioses vengativos, espíritus del fuego, etc. Aristóteles creía que en el subsuelo había quedado atrapado aire, y que los terremotos los causaban las ocasionales descargas de ese aire que escapaba. Pero cuando se empezó a estudiar con rigor estos desastres naturales, se observó que la gran mayoría de ellos se producía en determinadas áreas. En efecto, de los quinientos volcanes activos de la Tierra, casi trescientos se localizan en una amplia curva que circunda las costas del océano Pacífico, ocho más se encuentran en la orla del archipiélago indonesio, y unos pocos más, en el mar Mediterráneo. Los terremotos se desencadenan las más de las veces en esas mismas regiones, lo que sugiere que

ambos fenómenos guardan alguna relación, y tal vez los originen idénticas causas.

El terremoto de Lisboa estimuló una oleada de investigaciones científicas, y propició la instalación de sismógrafos en diversos puntos, como ya expliqué. En 1906 un terremoto destruyó la ciudad de San Francisco, y el geólogo norteamericano Harry Fielding Reid (1859-1944), que acudió a investigar en el lugar del suceso, se percató de que el terreno próximo a la ciudad había sufrido un deslizamiento. Un lado de lo que parecía una grieta en el suelo había avanzado si se comparaba con el otro lado. La mayor parte de la gente dio por sentado que la grieta la había producido el propio terremoto, pero Reid sustentaba una idea distinta: consideró que la grieta o falla podía estar allí desde siempre. (Ahora la llamamos falla de San Andrés). Con el tiempo, la presión actuó de tal manera que hizo juntarse los bordes de la falla. Ordinariamente, éstos eran mantenidos en su lugar por fricción, pero al arreciar la presión, uno de los bordes avanzó rozando el otro, en una serie de movimientos bruscos que provocaron unas vibraciones lo bastante fuertes como para arrasarse una ciudad y terminar con millares de vidas.

Aunque Reid tomó el buen camino, la causa de los terremotos no quedó del todo clara hasta que se descubrió la tectónica de placas. Se comprendió entonces que como resultado de fuerzas que actuaban en la profundidad de la Tierra, las placas estaban siempre moviéndose muy lentamente, pero que en los límites entre las placas dichas fuerzas provocaban en ocasiones un movimiento lateral, como el que Reid advirtió al estudiar el terremoto de San Francisco. Al fin y al cabo, la falla de San Andrés es una sección del límite entre la placa que subyace en Norteamérica y la que se sitúa bajo el océano Pacífico.

Además, en las líneas de falla alrededor del mundo hay puntos débiles donde la roca inferior puede proyectarse hacia arriba y producir erupciones volcánicas. Y cuando dos placas colisionan, sus bordes a veces se pliegan, dando nacimiento a cordilleras. El Himalaya, la región montañosa más extensa del mundo

actualmente, surgió cuando la placa que sustenta la India experimentó una lenta colisión con la subyacente al resto de Asia. A veces una placa se desliza bajo otra, succionando el fondo marino y dando lugar a fosas que, en algunos lugares, pueden alcanzar los 11 000 m de profundidad.

Antes de descubrirse la tectónica de placas, resultaba imposible comprender del todo los diversos fenómenos que afectan a la corteza terrestre. Pero esa teoría aportó una explicación sencilla a lo que parecía imposible, lo cual es siempre señal de que se trata de una buena teoría.

Con posterioridad a la redacción de este texto, han continuado sucediéndose fenómenos como los enumerados. Uno de los más catastróficos se produjo el 26 de diciembre de 2004 en el océano Índico: después de un terremoto de 9º en la escala Richter hubo un gran maremoto o tsunami que asoló las costas de varios países de la zona y que causó más de 280 000 muertos.

19. ¿Qué es el calor?

En este punto parecería razonable preguntarse acerca de la naturaleza de esas fuerzas que actúan en la profundidad de la Tierra y que ocasionan terremotos y erupciones volcánicas. Pero antes de formular esos interrogantes deberíamos empezar por este otro: ¿qué es el calor?

Todos experimentamos calor y damos éste por supuesto. Nos llega ante todo del sol, y de ahí que sintamos calor allá donde da su luz, y dejemos de sentirlo cuando nos colocamos en la sombra. En menor grado podemos notar el calor que desprenden el fuego, las bombillas eléctricas, los radiadores o los recipientes de agua caliente, y aunque ignoremos qué es, conocemos bien cómo actúa: fluye de un cuerpo a otro. Si tenemos frío y nos situamos ante el fuego, el calor pasa del fuego a nosotros. Pero si permanecemos allí demasiado tiempo, podemos absorber calor en exceso y empezar a sentirnos cada vez más incómodos, de tal manera que nos veremos obligados a retirarnos. Si ponemos un recipiente de agua fría sobre la llama de gas, el calor de esta última fluye al recipiente, y el agua fría se calienta hasta el punto de que termina hirviendo.

Puede usted multiplicar los ejemplos como éstos, pues todos ellos conducen a aceptar que el calor es una especie de fluido sutil que pasa de un objeto a otro en cierta manera igual a como lo hace el agua. Una sustancia concreta, en determinadas circunstancias, sólo contiene una cantidad limitada de fluido de calor. Y sin duda cuando un recipiente de agua caliente se pone en contacto con una superficie fría, pierde gradualmente su calor hasta que termina por enfriarse del todo.

En 1798, el físico norteamericano-británico Benjamin Thompson, lord Rumford (1753-1814), se dedicaba a convertir bloques de metal en cilindros largos y gruesos para la manufactura de cañones. Se dio cuenta de que el taladro que se empleaba calentaba el metal hasta el punto de que precisaba ser enfriado constantemente con agua. La explicación que acostumbraba darse era que como el metal era vaciado por la acción del taladro, el fluido de calor era liberado y salía al exterior.

Sin embargo, Rumford se dio cuenta de que continuaba produciéndose calor en tanto proseguía la perforación, y que no mostraba signos de ceder. En efecto, se generaba el suficiente como para hervir grandes cantidades de agua, y si se creía que ese calor se devolvía al metal, éste hubiera debido calentarse hasta el punto de fusión. O sea, que se desprendía más calor del metal del que este último hubiera podido contener conservando su forma sólida.

Por otra parte, Rumford trató de perforar el metal utilizando un instrumento cuya acción era tan débil que no logró penetrar en el metal y, en consecuencia, no hubiera debido desprender el menor fluido de calor. Pero no era así; antes bien, se producía más calor con un taladro embotado que con otro aguzado. De este rudimentario experimento concluyó que el calor no era un fluido sino una forma de movimiento. Dedujo que el movimiento del taladro embotado era comunicado de algún modo al metal, y que diminutas partículas de éste (tan pequeñas como para resultar invisibles) acusaban dicho movimiento, que era lo que se observaba como calor.

Resultó que Rumford iba por buen camino. En 1803, el químico británico John Dalton (1766-1844) manifestó su punto de vista de que toda la materia está compuesta por diminutas partículas, demasiado pequeñas para ser vistas, llamadas átomos. Con el tiempo quedó de manifiesto que toda la materia estaba constituida por átomos, generalmente unidos en grupos llamados moléculas. En la década de 1860, el matemático británico James Clerk Maxwell

(1831-1879) y el físico austríaco Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906), trabajando independientemente, demostraron que el calor podía ser mejor interpretado como los movimientos aleatorios —a través del espacio, vibratorios o giratorios— de átomos y moléculas. A esta explicación se le llama teoría cinética del calor (de una palabra griega que significa movimiento).

20. ¿Qué es la temperatura?

Unas cosas están más calientes que otras. Un determinado recipiente de agua puede estar sólo tibio, en tanto otro puede hallarse a punto de hervir: la diferencia entre uno y otro podemos establecerla fácilmente tocándolos. De hecho, ni siquiera necesitamos tocarlos; bastará con que coloquemos nuestra mano un par de centímetros por encima de cada recipiente para poder decir con rapidez cuál es el que está a punto de hervir.

¿Por qué unas cosas están más calientes que otras? ¿Acaso una cosa caliente contiene más calor que otra fría? Esta idea parecía tener tanto más sentido cuanto que resultaba irrefutable.

Ya en 1760, el químico británico Joseph Black (1728-1799) fue capaz de demostrar que la simple cantidad de calor no era lo único que explicaba que las cosas estuvieran calientes o que, para hablar con propiedad, tuvieran una elevada temperatura. Suponga que tiene usted un pedazo de hierro y otro pedazo de plomo, ambos del mismo peso e igual de calientes. Coloca cada uno en un recipiente distinto lleno de agua fría. En ambos casos el metal pierde calor, el cual fluye al agua, con lo que el metal se enfría y el agua se calienta hasta que la transferencia de calor se ha completado. Usted esperaría que el agua estuviera igual de caliente en los dos casos, pero no es así. El agua en la que ha sido sumergido el hierro está claramente más caliente que la que ha contenido el plomo. Ambos metales estaban igual de calientes y, por tanto, tenían la misma temperatura, pero el hierro contenía más calor.

Si introduce un trozo de hierro caliente en una mezcla de hielo y agua, el hierro fundirá algo del hielo a medida que se enfría, pero la

mezcla de hielo y agua (ahora más agua y menos hielo) tendrá la misma temperatura que antes. Así pues, es posible calentar una sustancia sin elevar su temperatura. En lugar de eso, el calor provoca otras consecuencias, como la ruptura de las moléculas de hielo sólido y su disposición en las menos compactas del agua líquida.

Para entender esta idea, podemos comparar el flujo de calor con el flujo de agua. Si bien el calor no es realmente fluido como el agua, sí posee algunas características similares a ella, y el comportamiento del agua puede ayudarnos a comprender el del calor.

La cantidad de calor puede compararse a la cantidad de agua, mientras que la temperatura puede compararse a la presión del agua. Si se vierte agua en un cilindro de determinada altura, ejerce una determinada presión sobre el fondo del cilindro. Una cantidad determinada de agua vertida en un cilindro amplio no alcanzará la misma altura que el agua vertida en un cilindro estrecho. El agua contenida en un cilindro delgado podrá ejercer más presión sobre el fondo que el agua de un cilindro grueso, aunque la cantidad total de agua del cilindro ancho sea la misma que en el estrecho. De la misma manera, se precisa más calor para elevar la temperatura del hierro a un nivel dado, que el que sería necesario para elevar hasta idéntico nivel la temperatura de la misma cantidad de plomo. El hierro es como el cilindro más ancho: tiene mayor capacidad calórica.

El calor no fluye necesariamente de un objeto con gran cantidad de calor al material con escasa cantidad de calor, sino que fluye de la materia a elevadas temperaturas hacia la materia a temperaturas inferiores, sin tener en cuenta la cantidad total de calor en cada una de ellas. Del mismo modo, si tiene usted un cilindro lleno de agua con un tapón en el fondo, y lo introduce en una bañera, de tal modo que el nivel del agua del cilindro esté considerablemente por encima del nivel del agua de la bañera, la presión del agua en el cilindro es superior a la que ejerce el agua en la bañera, aun en el caso de que

haya mucha más agua en la bañera que en el cilindro. Si ahora retira el tapón del fondo del cilindro, la presión se iguala. El agua fluye del cilindro a la bañera: de la presión superior a la inferior. No fluye de la mayor cantidad de agua a la menor, esto es, de la bañera al cilindro.

De la misma manera, unas pocas gotas de agua caliente están a superior temperatura que una bañera llena de agua tibia, por más que el calor total de esta última supere el de la pequeña cantidad de agua. Si vierte usted un chorrito de agua caliente en la bañera, el calor fluye de esas escasas gotas de agua caliente al agua tibia de la bañera, y no viceversa. Dado que la temperatura es la que impone el flujo de calor, los científicos se muestran más interesados en la temperatura que en la cantidad de calor.

21. ¿Cómo medimos la temperatura?

Podemos determinar fácilmente si una sustancia está más caliente que otra por simple tacto y comparándolas. Pero nuestro sentido del tacto no es lo bastante fiable como para medir con exactitud cuánto más caliente está una respecto de la otra. Existe un experimento familiar que se realiza como sigue: introduzca una mano en agua muy caliente, y la otra en agua muy fría, y déjelas así un rato. A continuación, sumerja ambas manos en agua tibia. En esta última ocasión sentirá fría la mano caliente y caliente la mano fría.

En resumen: no es usted mejor juzgando la temperatura mediante el tacto que calculando la longitud a ojo. Precisarí de una cinta métrica para determinar longitudes y de un instrumento similar para medir la temperatura. Buscará usted algún fenómeno que cambie con regularidad, con ascensos y descensos de temperatura y distribuirá a continuación esos cambios en unidades adecuadas. Galileo fue el primero en tratar de idear un instrumento semejante. En 1603 introdujo, invertido, un tubo de cristal lleno de aire caliente en un recipiente con agua. A medida que la habitación se caldeaba, el aire contenido en el tubo se expansionaba y el nivel del agua descendía. Cuando la habitación se enfriaba, el aire del tubo se contraía y el nivel de agua aumentaba. Midiendo el nivel de agua podía obtenerse la temperatura de la estancia.

El dispositivo de Galileo fue el primer y rudimentario termómetro (de las palabras griegas que significan «medir el calor»), y también el primer instrumento científico hecho de cristal. Por supuesto que no era un termómetro muy bueno, pues estaba abierto al aire, lo cual significaba que el nivel del agua en el tubo se veía también

afectado por la presión del aire, lo que introducía la confusión en los resultados. En 1654, el gran duque de Toscana Fernando II (1610-1670) inventó un termómetro al que no afectaba la presión del aire. Una ampolla de cristal de cierto tamaño, completamente cerrada, contenía un líquido y de ella salía un tubo delgado: ni la una ni el otro contenían aire. Los líquidos también se expanden a medida que la temperatura asciende, y se contraen cuando ésta baja. No se expanden ni se contraen tanto como el aire, pero incluso una expansión o contracción ligera puede determinar un cambio considerable en el nivel del líquido contenido en un tubo delgado.

Los primeros líquidos utilizados con ese propósito fueron el agua o el alcohol, pero ninguno resultaba satisfactorio. El agua se hiela y adquiere el estado sólido, y no serviría para medir las temperaturas en los fríos días invernales. El alcohol hierve con excesiva facilidad y no resultaría útil para medir la temperatura del agua caliente. Hacia 1695, el físico francés Guillaume Amontons (1663-1705) propuso el empleo del mercurio, que resultaba un líquido útil para ese propósito. Conservaba el estado líquido mucho más allá del límite del agua o el alcohol, y parecía expandirse y contraerse con suave regularidad conforme cambiaba la temperatura.

El físico germanoholandés Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736) inventó un termómetro en 1714 en el que una columna de mercurio se expandía hacia arriba por un tubo delgado al vacío, provisto de un depósito consistente en una ampolla llena de mercurio. Puso una marca en el nivel de mercurio cuando el termómetro fue introducido en hielo en fusión, y otra marca cuando se puso en agua hirviendo. Dividió a continuación la longitud que mediaba entre ambas señales en 180 partes iguales, que actualmente se llaman grados Fahrenheit. La temperatura del hielo en fusión es de 32 °F, y la del agua hirviendo, de 212 °F. No han faltado las discusiones a propósito de por qué eligió Fahrenheit esos números, pero en cualquier caso así lo hizo.

El astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744) ideó la que hoy se llama escala Celsius en 1742. El punto de congelación del agua

se sitúa en los 0 °C, y el punto de ebullición, en los 100 °C. La escala Celsius es más clara que la Fahrenheit, y hoy día se usa en todo el mundo excepto en Estados Unidos, que se obstina en adherirse al sistema antiguo. Por lo demás, no resulta difícil la reconversión de una escala a otra.

22. ¿Qué es la energía?

El calor es simplemente una forma de lo que los científicos llaman energía, nombre dado a cualquier fenómeno que tenga la capacidad de producir trabajo. El término energía proviene de las palabras griegas que significan «que contiene trabajo». De todas formas, debemos mostrarnos cautelosos, pues los científicos utilizan el vocablo «trabajo» en un sentido sumamente concreto, que no corresponde al que se le da en la vida ordinaria. Para los científicos, es lo que tenemos cuando aplicamos una fuerza en una distancia dada y en contra de una resistencia que se nos opone.

Si levantamos un objeto, que posee una determinada masa, a la altura de un metro en contra de la resistencia que ofrece la fuerza de la gravedad, estamos efectuando un trabajo sobre la masa en el sentido científico. Si sostenemos dicho objeto sin imprimirle movimiento alguno, a una altura de un metro, ya no efectuamos trabajo. Podemos creer que sí lo hacemos porque nos sentimos cansados, pero ello se debe sólo a que nuestros músculos están gastando energía para mantenerse tensos. O sea, que no aplican ningún trabajo sobre la masa. Si colocara usted esta última sobre un soporte situado a un metro de altura, el soporte sostendría la masa a dicha altura por un período indefinido sin experimentar cansancio, y tampoco desarrollaría trabajo. Por mi parte, yo no desarrollo trabajo cuando pienso en la ordenación de las palabras que entran en la composición de este libro, pese a que sin duda eso me fatiga al cabo de cierto tiempo.

El calor producirá trabajo en el sentido científico. Expandirá el mercurio, por ejemplo, elevando cierta cantidad de él en contra de la

fuerza de gravedad. Sus músculos pueden levantar una masa. Un imán levantará un clavo de hierro. La electricidad, la luz, el sonido y las sustancias químicas pueden producir trabajo en las circunstancias adecuadas. Como también puede producirlo cualquier objeto que esté en movimiento y que, por tanto, posea energía cinética (del griego «energía del movimiento»), o un objeto situado a cierta altura y que posea capacidad para caer y producir con ello trabajo, de la misma manera que las pesas del reloj producen con su caída el movimiento de las manecillas. (Un objeto situado a una altura se dice que tiene «energía potencial»).

Todas estas clases de energía ¿son independientes o guardan alguna relación entre ellas? La corriente eléctrica producirá un efecto magnético, y el magnetismo puede crear una corriente eléctrica. A su vez, una corriente eléctrica puede producir sonido en un timbre, luz y calor en una lámpara de incandescencia y movimiento en un motor. La luz puede producir electricidad y el sonido, movimiento. De hecho, cualquier forma de energía puede ser convertida en otra forma de energía; se trata, en definitiva, de un único fenómeno susceptible de adoptar formas diversas.

Pero cuando una forma de energía se convierte en otra, ¿se experimenta alguna pérdida durante el proceso? O cuando se mantiene en una forma concreta, ¿se produce también alguna pérdida? La respuesta a estas preguntas parecía ser en otros tiempos un rotundo sí. La clase de energía más familiar y mejor estudiada era la cinética, esto es, la del movimiento. Una voluminosa bala de cañón que se mueva lo bastante aprisa como para derrumbar los muros de un castillo es, ciertamente, una expresiva demostración de energía. Pero si la bala de cañón se deja que rueda por el suelo, no seguirá moviéndose indefinidamente. De manera gradual se vuelve más lenta y acaba deteniéndose, pues la energía contenida en la bala decrece. ¿Qué le ha ocurrido? Se puede decir que, sencillamente, su energía ha desaparecido.

Los científicos tardaron en darse cuenta de que siempre que la energía parecía desaparecer se transformaba en calor. En efecto, la

energía de la bala rodante se convertía en calor conforme rodaba, pero el calor se repartía por la larga franja de terreno recorrido, de tal manera que resultaba inapreciable. Si ese calor se toma en consideración, ¿se registra alguna pérdida de energía en la conversión de una forma de energía en otra?

La primera persona que planteó este problema en una serie de persistentes y cuidadosas pruebas fue el físico británico James Prescott Joule (1818-1889). En la década de 1840, llevó a cabo numerosísimos experimentos en los que convertía una forma de energía en otra. Medía el contenido original de energía y la energía producida, incluido el calor, y llegó a la conclusión de que ni se perdía ni se ganaba energía en esos procesos. Publicó sus experimentos y conclusiones en 1847, pero era un científico aficionado (su oficio era el de cervecero) y no se le tomó lo bastante en serio.

El mismo año, sin embargo, el físico alemán Hermann L. F. von Helmholtz (1821-1894) llegó a idéntica conclusión. Como era profesor, su análisis de la teoría fue realizado cuidadosamente, y atrajo la atención. Por ello se le suele considerar el primero que enunció la «ley de la conservación de la energía», según la cual la energía no puede crearse ni destruirse, pero puede cambiar de forma. Otra manera de formularla es que «el contenido total de energía del universo permanece constante». Algunas personas consideran este concepto como la más fundamental de las leyes de la naturaleza.

Puesto que los estudios acerca de la energía suelen reducirse al del flujo de calor, la ciencia del intercambio de trabajo y energía se llama «termodinámica» (de las palabras griegas que significan «movimiento del calor»). La ley de la conservación de la energía se denomina a veces «primera ley de la termodinámica».

La importancia de esta ley (y de todas las similares) radica en que pone límites en la medida de lo posible. Con independencia de la clase de fenómeno observado, cabe formularse en todos los casos esta pregunta: «¿de dónde proviene la energía y adónde

va?». Si no puede responderse, el error está en alguna parte. O bien el punto de partida carece de justificación, o la observación está equivocada, o la información es incompleta.

Por otra parte, la ley de la conservación de la energía y otras grandes generalizaciones similares no pueden probarse. Todo cuanto podemos decir es que los científicos aún no han sido capaces de hallar excepciones. Pero éstas podrían surgir repentina e inesperadamente, forzándonos a reconsiderar esa ley, alterarla, ampliarla o sustituirla. Sin embargo, después de siglo y medio la ley de la conservación de la energía mantiene su plena vigencia.

No obstante, incluso las leyes científicas más sólidamente establecidas están sujetas a revisión. En 1900 no se tomaba en cuenta la energía nuclear, y todas las consideraciones relativas a la conservación de la energía eran incompletas sin ella. También la noción de que la masa es en sí misma una forma muy concentrada de energía aún no se comprendía, y por eso mismo el conocimiento acerca de la conservación de la energía era incompleto. Los físicos no lo advertían porque la energía nuclear y la energía de la equivalencia de la masa desempeñaban un papel insignificante en las investigaciones del siglo XIX. Esto nos induce a considerar que en nuestros días podría haber aspectos cruciales del universo sobre los que lo ignoramos todo, pero que, una vez aprendidos, nos obligarán a revisar nuestros conocimientos. Nada en la ciencia es imposible de perfeccionar o modificar, incluida la ley de conservación de la energía, una de las piezas que confieren al juego científico su apasionante interés.

23. ¿Es posible que la energía se agote?

La ley de la conservación de la energía deja bien claro que esta última no puede destruirse. Lo cual parece indicar que siempre dispondremos de energía para desarrollar cuanto trabajo deseemos. Después de todo, si la energía no se destruye, sino que, todo lo más, cambia de forma, cabe suponer que podemos volver a usarla en esa nueva forma, cualquiera que sea, cambiar otra vez de forma y así indefinidamente.

Por desgracia, el proceso no funciona así. Según la experiencia de los científicos, cada vez que se emplea energía para efectuar trabajo sólo puede aprovecharse una parte de dicha energía. El resto se convierte en calor. Entonces podemos utilizar este calor para desarrollar trabajo, pero sólo cuando está desigualmente distribuido, o sea, cuando existe una región caliente y otra fría. Si esta diferencia se emplea para generar trabajo, de nuevo sólo una parte de la energía que empleamos se convierte en trabajo; el resto se pierde como calor, que está más homogéneamente distribuido que antes. Una vez una cantidad de calor se ha distribuido con absoluta uniformidad, ya no puede obtenerse más trabajo de ella. El resultado es que siempre que utilizamos energía para obtener trabajo, se da lugar a una energía menos útil para seguir obteniendo trabajo. La energía, considerada como un todo, no puede ser destruida, pero la «energía libre» —esa parte de la energía que puede destinarse a producir trabajo— decrece continuamente.

Otra manera de enfocar el tema es considerar que toda energía puede generar trabajo sólo cuando está desigualmente distribuida, y que no basta con que haya calor. Cada vez que producimos trabajo,

distribuimos la energía con un poco más de uniformidad. La medida de la distribución uniforme de energía (que también puede definirse como el desorden de un sistema: cuanto más uniformemente distribuida más desorden) se denomina entropía. Cuanto mayor sea la entropía, menos trabajo obtendremos de la energía. De esta manera, podemos concebir el universo como un lento pero inexorable desgaste.

Todo cuanto hacemos eleva la entropía del universo. En efecto, todo cuanto acontece, aunque los seres humanos nada tengan que ver con ello, eleva la entropía. Este perpetuo e inevitable aumento suele llamarse «segunda ley de la termodinámica».

La primera persona que mencionó la existencia de esta ley fue el físico francés Nicolas L. S. Carnot (1796-1832), quien en 1824 publicó un opúsculo en el que recogía sus estudios sobre la capacidad de las máquinas de vapor para convertir la desigual distribución del calor en trabajo. El tema, sin embargo, fue estudiado con detalle a partir de 1850 por el físico alemán Rudolf J. E. Clausius (1822-1888), quien fue el primero en concebir un universo en proceso de agotamiento.

Pero si la energía libre está en perpetuo declinar y la entropía no deja de acrecentarse, ¿cómo es que, pese a contar miles de millones de años de existencia, el universo no se ha agotado ya? La respuesta es que el suministro de energía a partir del cual se inició el universo era tan elevado que, aun habiendo transcurrido miles de millones de años, apenas se ha perdido una pizca de esa energía. El universo podrá estar desgastándose, pero precisará aún más miles de millones de años para completar el proceso, por lo que carece de sentido preocuparse de manera inmediata. Además, si bien sabemos hoy día mucho más del final del universo de lo que sabía Clausius hace siglo y medio, seguimos ignorando mucho más de lo que quisiéramos. Ahora no estamos tan seguros de esa decadencia como lo estaban en su momento Clausius y sus seguidores.

24. ¿Cuál es la temperatura interna de la Tierra?

Ahora podemos regresar a la Tierra y plantearnos más preguntas, como por qué la temperatura en sus profundidades es superior a la que se registra en la superficie.

Siempre ha existido la tendencia a considerar la Tierra como más caliente en su interior. Después de todo, brotan manantiales de agua caliente acá y allá, y existe la dramática prueba de las erupciones volcánicas. Pudo haber volcanes que inspiraran a los primitivos seres humanos la idea de que el interior de la Tierra contenía el infierno, una región de fuego incesante en la que las almas de las personas que a uno no le gustaban eran torturadas para siempre por una divinidad vengativa e implacable.

No hay pruebas de la existencia del infierno en las profundidades de la Tierra, pero sí las hay de que el centro de la Tierra es una región de elevado y al parecer perpetuo calor. Una vez los seres humanos empezaron a excavar profundamente en busca de riquezas como oro y diamantes, de inmediato se puso de manifiesto de que cuanto más hondo se llegaba, más elevada era la temperatura. En las minas más profundas, la temperatura resulta insoportable, pese a la instalación de aire acondicionado.

A juzgar por la proporción con que aumenta la temperatura con la profundidad, es razonable suponer que el centro de la Tierra puede alcanzar los 5000 °C.

Pero ahora que conocemos la ley de la conservación de la energía, tenemos la obligación de preguntarnos: ¿de dónde vino la

energía que produjo el calor? Responderemos a la pregunta, pero más adelante, cuando hayamos tratado de cómo se formó la Tierra.

25. ¿Por qué no se enfría la Tierra?

Aunque hayamos convenido en aplazar la pregunta acerca de la procedencia del calor interno de la Tierra, todavía cabe interrogarse sobre por qué ese calor sigue conservándose. Después de todo, si la Tierra cuenta 4600 millones de años de antigüedad, ¿por qué no hace ya tiempo que se ha enfriado?

En virtud de las leyes de la termodinámica, el calor debería fluir siempre desde una región sometida a elevada temperatura hacia otra región de baja temperatura. O sea, que debería irradiar del centro caliente de la Tierra a la fría superficie, y de ésta, al espacio.

La Tierra recibe calor del sol, el cual equilibra la pérdida de calor de la superficie; pero aun añadiendo el calor solar, la temperatura de la superficie terrestre es, como promedio, alrededor de 14°C , ¿y qué es eso comparado con 5000°C ? El calor debería seguir fluyendo desde el centro, donde reina esa elevadísima temperatura, hasta comunicarla a todo el planeta. Aunque la superficie rocosa es un buen aislante —o sea, que el calor se difunde por ella despacio, lo que retrasa en gran medida el proceso de enfriamiento interior—, no reduce por completo el flujo. Ciertamente parece que en 4600 millones de años ha habido mucho tiempo para que la Tierra se enfríe, pero continúa siendo un cuerpo muy caliente. ¿Por qué?

Podría darse el caso de que las leyes de la termodinámica fueran erróneas, pero los científicos se resisten a admitirlo salvo como último recurso. En primer lugar, han de admitir que puede existir una energía disponible para la Tierra que ellos no hayan tenido en cuenta, y esto ya resultó cierto en el pasado.

Después del descubrimiento de la radiactividad, el químico francés Pierre Curie (1859-1906), el esposo de *Madame Curie*, se dio cuenta de que cuando los átomos radiactivos se descomponen, deben liberar energía. En 1901, fue el primero en medir esa energía, y halló, en esencia, que cuando un átomo de materia radiactiva se descompone, libera mucha más energía que una molécula de gasolina cuando entra en combustión, o que una molécula de TNT cuando estalla. Así se descubrió una poderosa y nueva forma de energía, la energía nuclear, cuya existencia los científicos nunca habían sospechado.

Los materiales radiactivos liberan su energía tan despacio, que en el curso ordinario de los acontecimientos nunca resulta apreciable; sin embargo, el proceso continúa durante períodos de tiempo increíblemente prolongados. En los 4600 millones de años de existencia de la Tierra, sólo se han descompuesto la mitad de su contenido original de uranio, y la quinta parte del de torio. Mientras se desarrollaba el fenómeno, el uranio y el torio presentes en los estratos rocosos de la Tierra han producido calor que ha venido a añadirse al suministro de la propia Tierra, con lo cual se ha impedido que descendiera su temperatura. Si acaso, nuestro planeta se habrá calentado un poco más, un efecto que continuará durante más miles de millones de años, aunque disminuye con extrema lentitud.

26. ¿Todo el firmamento gira al mismo tiempo?

Ha llegado el momento de volver al resto del universo, lo que nos sugerirá algunas preguntas más concernientes a la Tierra.

En tiempos antiguos, la Tierra era considerada el universo entero (en el sentido natural, dejando aparte cielo, infierno y otros ámbitos sobrenaturales de los que no existen pruebas científicas). Todo cuanto existía al margen de la Tierra era el firmamento: azul de día, cuando el sol lo iluminaba, y negro de noche, cuando lo alumbraban la luna y las numerosas estrellas. (La luna aparece también a veces en el cielo diurno, y puede verse desprovista de brillo, pese a que el sol luce).

En consecuencia, el cielo parecía, y así se consideró, una bóveda sólida que encerraba la Tierra. Para los primitivos, que creían que la Tierra era plana, se trataba de una cubierta semiesférica y achatada que se juntaba con el horizonte en todos los confines terrestres. Para quienes consideraban que la Tierra era esférica, el cielo era otra esfera, mucho mayor, que contenía la primera. Pero también creían que se trataba de una bóveda delgada y sólida. Firmamento es término bíblico, y el prefijo *firm* demuestra que se tenía por sólido: se trata de la traducción de un término hebreo que designa una delgada lámina de metal.

Si el cielo fuera de una sustancia sólida, metálica o de otro material, debería girar como si fuera de una sola pieza, con lo que todo cuanto contuviera giraría al unísono. ¿Y es realmente así?

En nuestros días, las personas no miran mucho al cielo porque las grandes ciudades en que la mayoría de nosotros vive están tan brillantemente iluminadas de noche que la visión del cielo se ve en

gran medida malograda. En tiempos antiguos, en cambio, el mundo permanecía en verdad a oscuras durante la noche, y cuando el cielo estaba claro, en particular cuando no había luna, era posible una gloriosa visión de las estrellas parpadeantes. Los marineros contemplaban el cielo nocturno porque podían guiar sus barcos mediante las estrellas. Los astrólogos también lo observaban porque creían que ciertos detalles del cielo proporcionaban indicios acerca del futuro de las naciones y de los individuos. Y algunas personas lo contemplaban sencillamente por su belleza. Los que escrutaban las estrellas desde lugares como Grecia, Babilonia y Egipto, advirtieron que todas las estrellas giraban en torno a la Polar. Las más próximas a ella describían pequeños círculos y permanecían en el cielo durante toda la noche. Las estrellas más alejadas desaparecían por el horizonte en su movimiento giratorio, pero reaparecían más tarde. Lo importante era que todas parecían moverse a la vez. Dibujaban trayectorias en las que las gentes imaginativas podían descubrir figuras de animales y otras configuraciones (constelaciones) que permanecían inmutables noche tras noche mientras eran observadas. Las estrellas semejabán refulgentes lentejuelas fijadas en el cielo sólido, de tal manera que todas giraban juntas y permanecían quietas en su lugar mientras se producía ese movimiento.

Por esta razón se las llamaba estrellas fijas. Para una persona con buena visión, resultan visibles unas 6000 en el transcurso de la noche. Unas pocas son muy brillantes, pero la mayoría se perciben más bien apagadas. Pero ¿por qué se las llamó estrellas fijas? Si todos los objetos del cielo permanecen fijos, ¿por qué no dar por supuesta esta particularidad y llamarlas sencillamente estrellas? El problema radica en que son pocos los objetos celestes que no están fijos en su lugar.

Uno de ellos es la luna, el objeto más notorio del cielo nocturno, que debió de ser cuidadosamente estudiada ya por el hombre prehistórico. La luna sale por el Este y se pone por el Oeste, al igual que las estrellas, pero más tarde. Resulta imposible no percibir que

cambia de posición en el cielo respecto de las estrellas, desplazándose con regularidad de Oeste a Este y completando un giro en dicha dirección cada veintinueve días y medio.

El sol procede de la misma manera, pero más despacio. Desde luego que no puede usted ver la posición del sol entre las estrellas cuando está luciendo, porque entonces el cielo es azul y aquéllas no son visibles. Pero una vez el sol se ha puesto, aparecen las estrellas, y si observa su situación noche tras noche, advertirá que todas las constelaciones se desplazan ligeramente hacia el Oeste con cada crepúsculo. La manera más sencilla de explicar este fenómeno es admitir que el sol, al igual que la luna, se desplaza de Oeste a Este sobre el fondo estrellado, completando un giro en el cielo cada $365 \frac{1}{4}$ días.

El sol y la luna son cuerpos celestes específicos. No se parecen a los demás, pues se trata de discos brillantes y no de puntos rutilantes. Pero hay cinco objetos que presentan el aspecto de estrellas (si bien particularmente brillantes) que se desplazan entre las restantes estrellas. Los primeros en estudiar esos cinco objetos fueron los sumerios, hacia 3000 a. C., y les parecieron tan insólitos que les dieron nombres de dioses. Este hábito persistió entre los griegos y luego entre los romanos. Todavía utilizamos para designarlos nombres de dioses romanos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Estos cinco objetos más el sol y la luna son los astros móviles, y se denominaron «planetas», de la palabra griega que significa andar errante. (Hoy día ya no consideramos el sol y la luna como planetas por razones que explicaré más adelante).

Los siete planetas han atraído siempre el interés de los seres humanos, porque sus trayectorias erráticas las consideran los indoctos como una especie de código que encierra mensajes divinos relativos al futuro (una circunstancia explotada por astrólogos inescrupulosos que descifran esos mensajes, carentes de valor, a cambio de dinero). La semana de siete días fue inventada por los babilonios para honrar a los siete planetas, y aún en nuestros días las lenguas europeas designan cada uno de los días de la semana

con nombres derivados de los que se dan a los planetas: lunes (luna), martes (Marte), miércoles (Mercurio), jueves (Júpiter), viernes (Venus), sábado (Saturno). Los antiguos hebreos adoptaron la semana babilónica y trataron de conferirle un carácter religioso en los dos primeros libros del Génesis, pero los nombres siguen acusando su origen pagano.

Dado que los siete planetas erran libremente por el cielo y no pueden fijarse a la sólida bóveda que constituye aquél, los antiguos griegos razonaron que cada uno de los planetas debía de estar fijado a una esfera propia que giraba entre el cielo (la esfera más externa, en la que estaban fijadas las estrellas) y la Tierra. Dado que estas esferas interiores no resultaban visibles, se aceptó que eran perfectamente transparentes, y se les dio el nombre de «esferas cristalinas», de una palabra griega que significa transparente. Así pues, a la pregunta de si el cielo giraba como si fuera de una sola pieza, los antiguos respondían que sí. Pero con unas pocas excepciones que ya explicaremos en su momento, estaban del todo equivocados.

27. ¿Es la Tierra el centro del universo?

Es ésta otra pregunta que para algunos no merece siquiera formularse. Para las gentes de las épocas antigua y medieval parecía de todo punto evidente que la Tierra era el centro del universo. Al fin y al cabo, el universo entero, para su modo de pensar, estaba constituido por la Tierra y el cielo. Parecía como si este último estuviera siempre encima de nosotros, aproximadamente a la misma distancia en todas partes, curvándose con la Tierra cuando la superficie de ésta se curvaba a su vez. Incluía la Tierra, situada en su centro. Así pues, ¿dónde estaba la dificultad?

La única incertidumbre era la materia de los planetas. ¿En qué lugar exacto entre el cielo y la Tierra se hallan? Puesto que viajan a velocidades distintas, los griegos admitieron que cuanto más aprisa parecía moverse un planeta sobre el firmamento estrellado, más cerca debía estar de la Tierra. Esto es el resultado de una experiencia común: cuando presenciamos una carrera de caballos, en el momento en que se hallan en la parte más alejada de la pista, parecen avanzar más despacio, pero cuando llegan junto al lugar donde estamos y galopan delante mismo de nosotros, nos parece que corren como el viento. Puede usted observar el mismo efecto en una carrera de coches. Y de la misma manera, un avión que vuela bajo en el cielo parece avanzar con rapidez, y en cambio el mismo aparato volando muy alto a idéntica velocidad parece ir muy despacio.

Así pues, juzgando por la rapidez del movimiento, los griegos decidieron que la luna era el planeta más cercano a la Tierra. Más

allá de ella estaban Mercurio, Venus, el sol, Marte, Júpiter y Saturno, por este orden. Cada uno de ellos tenía su propia esfera cristalina, siete en total, y más allá había una octava esfera en la que estaban las estrellas fijas.

Era éste un cuadro muy sugestivo, pero no resolvía por entero el problema de los planetas. Los antiguos debían conocer el movimiento exacto de los planetas si se proponían efectuar cálculos astrológicos. Los astrólogos (la mayoría de los que trabajaban en aquellos tiempos eran completamente sinceros en sus creencias) debían estudiar aquellos movimientos con gran cuidado, y al hacerlo dieron nacimiento a la auténtica ciencia de las estrellas, que llamamos astronomía.

Incluso los hombres prehistóricos prestaron gran atención al cielo. Así, el monumento de piedra de Stonehenge, en el sudoeste de Inglaterra, que data aproximadamente de 1500 a. C., pudo haber sido un recurso para calcular futuros movimientos del sol y la luna.

Las estrellas se mueven uniforme y regularmente, y si los planetas hicieran otro tanto, no se suscitaría problema alguno en la determinación de sus posiciones futuras (y no habría astrología, pues el código representado por sus movimientos resultaría demasiado sencillo para despertar preocupación). Pero los planetas no se mueven de manera uniforme y regular. La luna se mueve un poco más despacio durante la mitad de su recorrido por el cielo, en relación con la otra mitad. Y lo mismo puede decirse, aunque en menor medida, a propósito del sol.

Los demás planetas actúan aún peor. En general, se desplazan de Oeste a Este (un efecto conocido como movimiento directo) sobre el fondo constituido por las estrellas fijas. De vez en cuando, sin embargo, su movimiento se detiene, y por un momento se desplazan hacia atrás, de Este a Oeste (efecto conocido como movimiento retrógrado, esto es, que retrocede), antes de reanudar su trayectoria directa. Cada planeta se ajusta a su propia pauta de movimiento directo y retrógrado, y cada uno de ellos aventaja en brillo a los demás en determinados momentos.

Aquellas pautas complicaron grandemente el cálculo de la situación de los planetas en momentos dados del futuro. Varios astrónomos griegos idearon métodos para determinar los movimientos planetarios, dando por supuesto que los diversos planetas seguían su trayectoria por esferas pequeñas, cuyos centros se movían a su vez con respecto a esferas mayores, algunas de las cuales estaban ligeramente descentradas, etc. Desde luego que todo eso resultaba muy complicado, y el sistema se resumió en un libro escrito hacia 150 por el astrónomo griego Claudio Ptolomeo (h. 100-h. 170). La estructura matemática del universo, con la Tierra situada en el centro y los diversos sistemas de esferas rodeándola, se llama «universo ptolemaico» o «universo geocéntrico» (del griego «centrado en la Tierra»). Fue aceptado por casi todo el mundo durante 1700 años, y apenas alguien osaba impugnarlo. En cualquier caso, era completamente erróneo.

28. Entonces, una vez más, ¿es la Tierra el centro del universo?

Hubo, claro está, un reducido número de pensadores audaces que pusieron en tela de juicio el sistema geocéntrico generalmente aceptado. La primera persona cuyo nombre conocemos y que supuso que la Tierra no era el centro del universo, sino que se movía por el espacio en torno a algún otro objeto que, éste sí, estaba en el centro, fue el filósofo griego Filolao (480-¿? a. C.). Hacia 450 a. C. sugirió que la Tierra, junto con todos los planetas y el sol, se movían en torno de un fuego central, invisible, del que sólo podía verse el reflejo en el sol. Fue ésta una sugerencia sin prueba alguna ni razonamiento lógico que la apoyara, y nadie la tomó en serio.

Un siglo más tarde, hacia 350 a. C., un astrónomo griego, Heráclides (388-315 a. C.), hizo otra sugerencia, esta vez más afinada. Advirtió que los planetas Mercurio y Venus nunca se apartaban mucho del sol, sino que se alejaban de él para regresar a su proximidad; luego se alejaban otro poco en dirección distinta, se acercaban de nuevo, y el ciclo se repetía una y otra vez. En consecuencia, postuló que Mercurio y Venus giraban en torno al sol, y que éste, llevando consigo a esos planetas, giraba por su parte alrededor de la Tierra. Esta solución era bastante sensata, pero la mayoría de los astrónomos griegos la consideró inaceptable, pues se adherían al principio de que la Tierra estaba en el centro del universo, y de que todo giraba en torno a ella sin excepciones.

Hacia 260 a. C., otro astrónomo griego, Aristarco (h. 310h. 230 a. C.), propuso una teoría aún más radical. Concibió su idea al intentar

determinar la distancia del sol. Cuando la luna se encuentra exactamente en uno de sus cuartos, ésta, la Tierra y el sol se sitúan en los vértices de un triángulo rectángulo. (Algo más adelante volveré a ocuparme de este tema). Y ésta es exactamente la clase de triángulo que estudia la trigonometría. Si se conoce el valor de sus ángulos, puede recurrirse a la trigonometría para determinar cuánto más lejos está el sol que la luna. Por desgracia, Aristarco no disponía de recursos para efectuar una medición precisa de los ángulos, por lo que sus estimaciones fueron muy inexactas. Aun así, decidió que el sol debía hallarse veinte veces más lejos de la Tierra que la luna, y dado que el sol parece tener el mismo tamaño que la luna en el cielo, si está veinte veces más lejos ha de ser veinte veces mayor.

A partir de estos datos, concluyó que el diámetro del sol superaba en siete veces el de la Tierra, lo que constituía una grave subestimación. En cualquier caso, bastó para convencer a Aristarco de que era ridículo suponer que un sol enorme se movía en torno a una pequeña Tierra. En lugar de eso, sugirió que el nuestro y todos los demás planetas giraban alrededor del sol.

Aristarco fue la primera persona que nos consta sugiriera que era el sol y no la Tierra el centro del universo (esta concepción se llama «heliocéntrica», del griego «centrada en el sol»), lo cual no le reportó el menor reconocimiento. En efecto, apenas astrónomo alguno tomó en consideración su idea.

Pero con el transcurso de los siglos crecía la frustración de los astrónomos ante la complejidad matemática que planteaba la comprensión del universo geométrico. En 1252, Alfonso X el Sabio, rey de Castilla, supervisó la elaboración de nuevas tablas planetarias, las llamadas tablas alfonsíes en su honor, y exclamó exasperado: «Si Dios me hubiera pedido consejo cuando llevó a cabo la Creación, le hubiera sugerido un modelo más sencillo del universo». En el siglo XVI al astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) se le ocurrió que, en efecto, había un modelo más sencillo del universo: el heliocéntrico propuesto por Aristarco.

Aristarco se había limitado a formular la idea, pero no la desarrolló. Copérnico se basó en ella y demostró que un sistema heliocéntrico podía dar cuenta fácilmente de los movimientos retrógrados de los planetas, y también podía explicar por qué perdían y ganaban brillo alternativamente. Y lo que era más importante: el sistema heliocéntrico simplificaba en medida considerable el cálculo de las tablas planetarias.

Copérnico dudó antes de hacer público su trabajo, porque sabía que iba a tropezar con la oposición de los dirigentes religiosos, partidarios del geocentrismo porque creían que la Biblia lo corroboraba. Pero su manuscrito circuló entre los astrónomos, y en 1543, el mismo año de su muerte, fue publicado. (Aun en un universo heliocéntrico la Tierra no está enteramente despojada de su posición central, pues al menos la luna gira en torno a ella).

La primera persona que se basó en el universo heliocéntrico para calcular unas tablas planetarias fue el astrónomo alemán Erasmus Reinhold (1511-1553). Se publicaron en 1551 con el patrocinio del duque Alberto de Prusia, y por eso se llamaron *tabulae prutenicae* (tablas prusianas). Aunque eran mucho mejores que las tablas alfonsíes, que ya contaban trescientos años, la vieja guardia se negó a aceptarlas. La mayoría de los astrónomos rechazó abandonar la concepción geocéntrica del universo porque no podía creer que la Tierra navegara por el espacio. Algunos sostenían que el universo heliocéntrico daba lugar a mejores tablas planetarias porque era un simple recurso matemático, atractivo, eso sí, pero que no significaba que la Tierra girase en realidad alrededor del sol.

La disputa continuó durante medio siglo, hasta que la zanjó Galileo, valiéndose del telescopio. En 1610, observando el planeta Júpiter, halló que el telescopio permitía verlo rodeado de un pequeño halo luminoso. Éste fue el primer indicio de que Júpiter podía ser realmente un mundo. Además lo rodeaban cuatro esferas menores, de la misma manera que la luna gira en torno a la Tierra. Esos cuerpos subsidiarios se llamaron «satélites», término derivado

de una palabra latina que designaba a los aduladores que rodeaban a las personalidades importantes. Así pues, la luna es el satélite de la Tierra, y Galileo había descubierto cuatro satélites de Júpiter.

La importancia de este hallazgo en su época consistió en que demostró definitivamente que al menos cuatro objetos no giraban en torno a la Tierra, sino a Júpiter. Lo cual significaba sin la menor duda que nuestro planeta no era el centro de todo.

Podía objetarse, por supuesto, que Júpiter girase en torno a la Tierra, llevando consigo sus cuatro satélites, pero entonces Galileo se dedicó a estudiar Venus. Éste, según la vieja teoría geocéntrica, era un cuerpo oscuro que sólo reflejaba luz. Su posición entre el sol y la Tierra le hacía aparecer siempre en creciente. Si la teoría heliocéntrica era correcta, Venus tendría que presentar las mismas fases que la luna: desde cuarto menguante a pleno. Y Galileo descubrió que ése era exactamente el caso.

Este descubrimiento contribuyó a consolidar el sistema heliocéntrico. Los planetas, incluida la Tierra, giraban en torno al sol, y el término planetas sólo se aplicó en lo sucesivo a esos cuerpos. En otras palabras, el sol no era un planeta, sino que se hallaba en el centro de ellos. La luna tampoco era un planeta, pues giraba en derredor de la Tierra. Esta última, en cambio, sí lo era. Por consiguiente, con el sol en el centro, se conocían ahora seis planetas que giraban en torno de él con arreglo al orden siguiente: Mercurio, Venus, la Tierra (con la luna), Marte, Júpiter (con sus cuatro satélites) y Saturno. El conjunto de estos cuerpos se conoció en lo sucesivo como sistema solar.

Los partidarios del sistema antiguo trataron de objetar que todo cuanto podía verse a través del telescopio constituía una ilusión óptica. Pero con eso sólo despertaron hilaridad. En 1633, la Iglesia católica recurrió a la fuerza y obligó a Galileo (bajo amenaza de tortura) a declarar que la Tierra permanecía inmóvil. Pero esa retractación no constituía prueba alguna. El esquema de un sistema solar con todos los planetas (incluida la Tierra) girando en torno al

sol ha sido aceptado por todas las personas instruidas a partir de la época de Galileo.

El sistema heliocéntrico, sin embargo, no dejaba de suscitar algunos interrogantes. El sol parece seguir una trayectoria a través del cielo, formando un ángulo en relación con el ecuador terrestre, lo que da lugar a las estaciones. ¿Cómo se compagina este fenómeno con un sistema heliocéntrico? Si el eje de la Tierra fuese perpendicular al plano en que girase en torno al sol, este último parecería moverse en el cielo inmediatamente encima del ecuador. Pero el eje terrestre está desplazado $23,5^\circ$ respecto de la perpendicular, y ese valor permanece constante mientras el planeta se traslada alrededor del sol. Lo cual significa que durante la mitad de la órbita terrestre, el extremo septentrional del eje se inclina hacia el sol, de tal manera que es mediodía al norte del ecuador; y que durante la otra mitad de la órbita, ese extremo septentrional se aleja del sol, y es mediodía al sur del ecuador. Este esquema explica con exactitud el ascenso y caída del mediodía y el ciclo de las estaciones.

Las principales divisiones de la medición del tiempo pueden considerarse ahora en su forma astronómica verdadera: el día es el período de rotación de la Tierra sobre su eje; el mes es el período de la revolución lunar en torno a la Tierra, y el año es el período en que la Tierra completa un giro alrededor del sol.

29. ¿Puede perfeccionarse el sistema de Copérnico?

Toda concepción o teoría científica puede mejorarse. En efecto, en ciencia la búsqueda del perfeccionamiento es interminable. Realmente, el sistema de Copérnico no es muy distinto del propuesto por Ptolomeo. Cambia tan sólo el centro del universo, que se desplaza de la Tierra al sol. Alrededor de este último continúan las viejas esferas cristalinas. En lugar de estar la Tierra rodeada por siete esferas planetarias más una octava correspondiente a las estrellas, ahora el sol está rodeado de seis esferas cristalinas con una séptima de más para las estrellas. En cuanto a la luna, posee una esfera subsidiaria propia que incluye la Tierra. Con ello, el cálculo de tablas continuaba siendo muy complicado, y pese a que los resultados eran más fáciles de obtener y más exactos que antes, persistían muchas dificultades.

El astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) dedicó un tiempo considerable a estudiar las posiciones de los planetas. Construyó el primer observatorio importante de la Edad Moderna, y diseñó instrumentos para determinar las posiciones planetarias. No disponía de telescopios, pues aún no se habían inventado. Pese a ello, estableció las posiciones de los planetas, en especial de Marte, mejor que ninguno de sus predecesores. Consideró que sus cálculos permitirían la elaboración de tablas planetarias más exactas, y si bien falleció antes de dar a conocer esos trabajos, legó sus cálculos a su discípulo, el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630).

Kepler pasó años calculando las cifras y no halló círculos que dieran adecuada razón de las posiciones de los planetas. Pero le sorprendió que si empleaba una elipse (una especie de círculo alargado), ésta se adecuaba notablemente a las posiciones de Marte. La elipse, al igual que el círculo, tiene un centro, pero también posee dos centros llamados focos, a ambos lados del centro de la línea de diámetro máximo. Estos focos están situados de tal manera que la suma de las distancias desde cualquier punto de la elipse a los dos focos da como resultado la misma longitud. Cuanto más elongada sea la elipse, más alejados del centro estarán los dos focos. En 1609, Kepler fue capaz de demostrar que cada planeta se trasladaba en torno al sol describiendo una elipse, y que la posición del sol coincidía con uno de los dos focos. En cuanto a la luna, también orbitaba en torno a la Tierra en una elipse, con la Tierra situada en uno de los focos. Ésta es la primera ley de Kepler, y significaba que en un extremo de la trayectoria del planeta (u órbita, de un término latino que significa círculo, pese a que no se trata de un círculo), dicho planeta se encontraba más cerca del sol que cuando se hallaba en el otro extremo, y que la luna se encontraba más cerca de la Tierra en uno de los extremos de su órbita que en el otro. La primera ley de Kepler acabó por fin con la idea de las esferas cristalinas, que había formado parte de la astronomía durante dos mil años.

Kepler también desarrolló una manera de calcular cómo la velocidad de traslación de un planeta cambiaba con su distancia del sol. Cuanto más cerca se hallara de éste, más aprisa avanzaría, de acuerdo con una relación matemática específica (segunda ley de Kepler). En 1619, Kepler calculó una relación matemática que demostraba el tiempo que precisaría un planeta para completar una revolución en torno al sol, conociendo su distancia del sol en aquel momento (tercera ley de Kepler). Las leyes de Kepler sobre movimientos planetarios hicieron posible la delineación de un modelo del sistema solar, demostrando con exactitud qué clase de

elipse describía cada planeta y cómo sus distancias del sol se relacionaban entre sí.

Por supuesto que si las esferas cristalinas no existían, los hombres se sentían impulsados a interrogarse qué era lo que mantenía los planetas sujetos a sus órbitas. ¿Por qué no se limitaban a errar por el espacio? A este dilema respondió el científico inglés Isaac Newton (1642-1727), que enunció las leyes del movimiento y una teoría de la gravitación universal. Afirmó que cada objeto en el espacio atrae a cada uno de los demás objetos de acuerdo con una simple relación matemática, una fórmula que corroboraba cabalmente las leyes de Kepler y explicaba lo que sostenía los planetas en sus órbitas. El esquema del sistema solar configurado por Kepler sigue siendo, en lo esencial, el que utilizamos hoy día, y los científicos se muestran completamente satisfechos de que en el futuro ya no se requieran cambios esenciales.

30. ¿Cómo se formó la Tierra?

Ahora que ya disponemos de un diseño claro de a qué se asemeja el sistema solar, podemos preguntarnos cómo se formó la Tierra. Realmente no podemos considerar que se constituyera del todo por sí misma, ya que, como veremos, hubo de proceder de una formación más amplia: el conjunto del sistema solar. Entonces, ¿qué ocurrió hace 4600 millones de años, que dio nacimiento a la Tierra y al sistema solar en general?

El naturalista francés Georges-Louis de Buffon (1707-1788) se planteó ese problema sin referirse al viejo relato bíblico (para el que desde luego no hay prueba científica), y consideró que la Tierra podía tener 75 000 años de antigüedad. En 1749, Buffon razonó que los planetas, incluida la Tierra, estaban relacionados con el gigantesco sol de la misma forma que los polluelos con la clueca. Y sugirió que tal vez la Tierra había nacido del sol.

Buffon imaginó la colisión del sol con algún otro gran cuerpo celeste, con el consiguiente impacto, que arrancó un fragmento del sol, el cual se enfrió y se transformó en la Tierra. La propuesta era interesante, pero no tuvo en cuenta a los demás planetas, ni tampoco la formación del sol. Admitió sencillamente que el sol estaba ahí.

Se precisaba, pues, una explicación mejor. Una vez Kepler hubo trazado su representación del sistema solar, estaba claro que de algún modo implicaba una unidad. Todos los planetas se movían casi en el mismo plano (con lo cual el modelo entero del sistema solar podría introducirse en una gigantesca caja de *pizza*), y todos ellos giraban en torno al sol en la misma dirección, como hacía la

luna respecto de la Tierra y los satélites de Júpiter en relación con este último. Además, giraban con sus ejes en idéntica dirección, lo mismo que el sol. Los astrónomos consideraron que el sistema solar no mostraría tales semejanzas si no hubiera sido formado todo de una pieza, por así decirlo.

La primera sugerencia relativa a la formación del sistema solar, y no sólo de la Tierra, se formuló como consecuencia de la observación de que en el cielo había algo más que estrellas. En 1611, en los primeros días del telescopio, el astrónomo alemán Simon Marius (1573-1624) descubrió una mancha de luz neblinosa en la constelación de Andrómeda. Se le llamó «nebulosa de Andrómeda» (en latín, nebula significa nube). En 1694, Huygens (el inventor del reloj de péndulo) descubrió otra mancha como la anterior en la constelación de Orión, la «nebulosa de Orión». Y más adelante fueron localizadas otras nebulosas.

Parecía posible que esas nubes luminosas fueran vastos conglomerados de polvo y gas que aún no se hubieran condensado para formar estrellas, y que todas las estrellas hubieran sido nebulosas en sus comienzos. En 1755, el filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804) publicó un libro en el que sugería precisamente eso. Pensaba que una nebulosa se constituía en virtud de su propia fuerza gravitatoria, y que durante ese proceso giraba en torbellino. La parte central se convertía en una estrella, y la periferia se transformaba en planetas. Esta propuesta parecía explicar por qué todos los planetas se mueven en el mismo plano y efectúan sus movimientos de rotación y traslación en el mismo sentido.

En 1798, el astrónomo francés Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), quien posiblemente ignoraba el trabajo anterior de Kant, desarrolló idéntica idea en un libro, pero entró en mayores detalles. Describió la nebulosa contrayéndose lentamente y, a medida que lo hacía, giraba en remolino cada vez más aprisa. Ésta no es una idea que Laplace tuviera que inventar: la contracción es el resultado de la fuerza gravitatoria, que nos consta actúa en el sistema solar, y el acelerado torbellino de la nebulosa a medida que se contrae es

consecuencia de la «ley de la conservación del momento angular», un efecto que conoce todo patinador sobre hielo: cuando gira sobre sí mismo, cobra mayor velocidad cuanto más cerca del cuerpo coloca los brazos.

A medida que la nebulosa se contraía y se arremolinaba más y más aprisa, sus regiones centrales se desplazaban hacia el exterior y se perdían. Tampoco este proceso hubo que inventarlo, pues es el resultado del «efecto centrífugo», bien conocido a raíz de observaciones y experimentos efectuados en la Tierra. Laplace imaginó que la parte perdida se contrajo y formó un planeta. Las regiones centrales continuaron contrayéndose y se formó otro planeta, y luego otro, y poco después todos giraban en la misma dirección. Finalmente, lo que restaba de la región central se convirtió en el sol. Puesto que Kant y Laplace partieron de la contracción de una nebulosa, esta idea de la formación del sistema solar se ha llamado «hipótesis nebular». (Una hipótesis es una sugerencia que carece de la fuerza probatoria que tiene una teoría).

Durante un siglo, los astrónomos se mostraron más o menos satisfechos con la hipótesis nebular, pero desafortunadamente su insatisfacción fue aumentando de manera paulatina. El problema provenía del «momento angular». El momento angular mide la cantidad de giro de un objeto, debida en parte a la rotación de dicho objeto en torno a su eje, y en parte a su revolución en torno a otro objeto. El planeta Júpiter, que gira sobre su eje y orbita en torno al sol, tiene un momento angular treinta veces superior al del sol, que es un cuerpo mucho mayor. Todos los planetas juntos tienen casi cinco veces el momento angular del sol. Si el sistema solar empezó como una sola nube con un momento angular dado, ¿cómo casi todo ese momento llegó a concentrarse en pequeñas porciones de materia que se disgregó para formar los planetas? Los astrónomos no pudieron dar con una respuesta, y comenzaron a buscar otras explicaciones.

En 1900, los científicos norteamericanos Thomas Chrowder Chamberlin (1843-1928) y Forest Ray Moulton (1872-1952)

regresaron a una versión de la idea desarrollada por Buffon. Sugirieron, en efecto, que otra estrella pasó hace mucho tiempo por la proximidad del sol, y que la fuerza de la gravedad entre ambos cuerpos arrebató materia al uno y al otro. Al separarse las estrellas, la fuerza gravitatoria ejercida sobre esta materia determinó un movimiento giratorio que se transformó en turbulencia, de tal modo que a los planetas se les imprimió un elevado momento angular. Tras la separación final, la materia se condensó en objetos pequeños y sólidos o «planetésimos», los cuales más adelante colisionaron y se combinaron para formar planetas. Las dos estrellas, ya individualizadas, se alejaron cada una con una familia de planetas. Esta explicación se llamó «hipótesis planetesimal».

Existe una diferencia particularmente importante entre las dos hipótesis consignadas. Si la nebular es correcta, cada estrella podría formar planetas. Si la hipótesis válida es la planetesimal, sólo podrían tener planetas las estrellas que hubieran estado a punto de colisionar, y las estrellas están tan alejadas unas de otras y se mueven tan despacio en comparación con las distancias que las separan, que las semicolisiones deben ser rarísimas. La diferencia radica, pues, en los numerosísimos sistemas planetarios que propugna la hipótesis nebular y los sumamente escasos que considera la hipótesis planetesimal.

Esta última acabó siendo desechada. En la década de 1920, el astrónomo británico Arthur Stanley Eddington (1882-1944) demostró que el interior del sol estaba mucho más caliente de lo que se creía. (Más adelante volveremos a ocuparnos de este asunto). El material proyectado más allá del sol (o de otra estrella) tendría una temperatura tan elevada que no podría condensarse en planetas, sino que se diseminaría por el espacio. El astrónomo norteamericano Lyman Spitzer Jr. (1914-1997) así lo demostró convincentemente en 1939.

En 1944, el astrónomo alemán Carl Friedrich von Weizsäcker (n. en 1912) regresó a la hipótesis nebular, pero la perfeccionó. Describió la nebulosa girando en torbellino y dando lugar a

turbulencias menores, las cuales formaban primero planetésimos y luego planetas. Los astrónomos pudieron tomar en consideración los efectos electromagnéticos sobre la nebulosa (algo desconocido en los tiempos de Laplace) para dar cuenta de la manera en que el momento angular era transferido del sol a los planetas.

La formación de los planetas a partir de los planetésimos, por cierto, explica el calor interno de la Tierra. Los planetésimos se mueven rápidamente y poseen una enorme energía cinética, pero cuando se concentran se detienen, y la energía cinética se transforma en calor. Con el tiempo, se forma un planeta, y el calor producido por todas las detenciones del movimiento es enorme, razón por la cual el núcleo de la Tierra podría alcanzar los 5000 °C. Naturalmente, cuanto mayor es un planeta, más cantidad de energía cinética se habrá transformado en calor durante el proceso de su formación, y más caliente estará su núcleo. Y cuanto menor sea el planeta, menos energía cinética tendrán sus planetésimos, y más frío estará su centro. Así, no cabe duda de que el centro de la luna registra una temperatura muy inferior a los 5000 °C, pues es menor que la Tierra, y Júpiter, que aventaja a esta última en tamaño, pues se trata del mayor de los planetas, debe tener un centro mucho más caliente. En efecto, algunas estimaciones le asignan una temperatura de 50 000 °C. Por todo ello, la nueva versión de la hipótesis nebular parece completamente satisfactoria.

31. ¿Es la Tierra un imán?

Puesto que hemos mencionado los fenómenos electromagnéticos al tratar de la formación del sistema solar, parecería que los cuerpos de ese sistema poseen propiedades magnéticas. ¿Podría darse entonces el caso de que la Tierra fuera un imán? Desde luego, los eruditos se han estado interrogando al respecto durante siglos.

La primera persona que nos consta describió la propiedad de ciertas sustancias para atraer el hierro fue Tales (h. 636-h. 546 a. C.) hacia 550 a. C. Su descripción se refería a un fragmento de roca encontrado cerca de la ciudad de Magnesia, en Asia Menor, de donde derivó el término magnetismo. Los imanes permanecieron como mera curiosidad hasta que los chinos descubrieron que las agujas magnetizadas se orientaban de manera invariable, si se les daba la oportunidad, en dirección Norte-Sur. En 1180, el erudito inglés Alexander Neckam (1157-1217) mencionó una de esas brújulas que, con el tiempo, se utilizarían para guiar a los barcos por el océano y conducirían a la gran era europea de las exploraciones, iniciada en torno a 1420.

En 1269, el erudito francés Petrus Peregrinus (h. 1240-¿?) fue el primero que estudió de manera sistemática los imanes. Entre otras cosas descubrió que todo imán tiene dos polos con propiedades magnéticas opuestas. Usualmente se les llama polo norte magnético y polo sur magnético. El polo norte de un imán atrae el polo sur de otro, y ambos polos de igual signo se repelen. Pero ¿por qué el polo norte de un imán había de señalar el Norte geográfico? ¿Acaso era la propia Tierra un gigantesco imán? Esta posibilidad la investigó el científico inglés William Gilbert (1544-1603), quien dio forma esférica

a una piedra imán, la misma que había estudiado Tales. En 1600 publicó un libro en el que describía la forma en que una brújula se comportaba en la proximidad de la esfera magnética, y demostró que actuaba exactamente igual como lo hacía respecto a la Tierra. Consideró entonces que esta última debía de ser un imán.

Pero ¿por qué? Una posibilidad era que hubiese un enorme fragmento de sustancia magnética en el centro de la Tierra, orientado hacia el Norte y el Sur, y cuando se empezó a especular acerca de que la Tierra podía tener un núcleo de hierro, aquélla pareció ser la respuesta. Pero en 1895, Pierre Curie descubrió que el hierro pierde su magnetismo a temperaturas superiores a los 760 °C, y dado que es muy probable que la temperatura del núcleo terrestre esté muy por encima de esa cifra, resulta obvio que dicho núcleo no es un imán en el sentido ordinario del término.

No obstante, el hierro en fusión aún es capaz de conducir una corriente eléctrica, y si el hierro gira en torbellino, esa corriente, al girar a su vez, creará un campo magnético. O sea, que la Tierra podría no ser un imán común, sino un electroimán. En 1939, el geofísico germanoamericano Walter Maurice Elsasser (1904-1991) sugirió que la rotación terrestre podía determinar turbulencias en el núcleo que darían lugar a un campo magnético.

Aunque esta idea está ampliamente aceptada en nuestros días, los problemas subsisten. Los polos magnéticos norte y sur de la Tierra no coinciden con los geográficos, de los que los separan unos 1600 km en cada caso. Si se traza una línea de uno a otro polo magnético atravesando la Tierra, esa línea no pasa por el centro. Además, los polos magnéticos se desplazan lentamente, y el campo magnético gana o pierde intensidad con el tiempo. En efecto, a veces cae hasta cero para invertir el proceso y ganar de nuevo intensidad. Son muchos los detalles que todavía ignoramos acerca del mecanismo del campo magnético terrestre.

32. ¿Es la Tierra una esfera perfecta?

A medida que aumentamos nuestros conocimientos sobre la Tierra, podemos formularnos preguntas más detalladas. Por ejemplo, los científicos hace casi 2500 años que saben que la Tierra es una esfera, pero ¿se trata de una esfera perfecta?

¿Y por qué no habría de serlo? Si en efecto se trata de una esfera porque la fuerza de la gravedad atrae todo lo posible hacia el centro la sustancia de que está hecha, sin duda debería afectar una forma perfecta. Además, el sol describe en todo tiempo un círculo perfecto en el cielo, al igual que la luna, lo cual significa que esos cuerpos son esferas perfectas.

La primera prueba que puso en tela de juicio esa idea fue la observación de Júpiter y Saturno a través de un telescopio a comienzos del siglo XVII. Ambos parecían ser más elípticos que esféricos, y conservaban esa forma mientras efectuaban su movimiento de rotación. Además, el diámetro mayor de esa elipse planetaria parecía en ambos casos corresponder al plano del ecuador, lo que significaba que las dos esferas se ensanchaban por esa parte y se achataban por los polos. Realmente a esos cuerpos se les podía llamar esferoides oblongos.

¿Por qué Júpiter y Saturno presentaban esa forma?

La respuesta no llegó hasta que Newton formuló las leyes del movimiento, con lo que el problema quedó atajado en 1687. Cada partícula de un planeta se ve obligada a girar a la vez que el planeta efectúa una revolución en torno a su eje, pese a que la tendencia natural de un objeto es continuar en línea recta una vez está en movimiento. Se llega a una solución intermedia: el planeta gira, pero

la superficie se ensancha ligeramente con ese giro, puesto que su tendencia le impulsa no a girar sino a continuar en línea recta. Es éste el «efecto centrífugo» (de las palabras latinas que significan escapar del centro), un fenómeno que ha sido estudiado con detalle en la Tierra. Cuanto más aprisa gira un objeto, más tendencia tiene a ensancharse.

A medida que un planeta gira, las partes de su superficie próximas al polo describen círculos reducidos en el transcurso de su revolución. Esos puntos no giran tan aprisa y, por tanto, apenas experimentan ensanchamiento. Conforme se aleja uno del polo, la superficie describe un círculo más amplio, pero tiene que recorrerlo en el mismo tiempo. Los puntos de la superficie han de moverse por tanto más aprisa, con lo que el ensanchamiento es mayor, efecto éste que alcanza su máximo en el ecuador. Así, en un planeta que gira se aprecia un ensanchamiento central, más pronunciado en el ecuador.

El tamaño del ensanchamiento ecuatorial de un mundo depende de la rapidez con que gire la superficie y la fuerza con que la gravedad de ese cuerpo se resista a la formación del ensanchamiento. La luna, Venus y Mercurio giran tan despacio que carecen de un ensanchamiento ecuatorial digno de mención. Por su parte, el sol gira muy aprisa, y un punto de su ecuador se traslada a una velocidad de 13 600 km por hora, pero la fuerza de su gravedad es tan intensa que tampoco presenta ensanchamiento ecuatorial apreciable.

Júpiter y Saturno son muy grandes comparados con la Tierra, y giran sobre sus ejes mucho más rápidamente. Júpiter gira en poco menos de diez horas, y Saturno, aunque algo menor, invierte algo más de ese tiempo. Un punto situado en el ecuador de Júpiter se desplaza a 45 765 km por hora, y otro punto de la misma zona de Saturno, a 36 850 km por hora. Estos movimientos aventajan en rapidez a los que se registran en el ecuador solar, pues si bien Júpiter y Saturno poseen gravedades inferiores a la del sol, no bastan para resistir el efecto centrífugo. Por consiguiente, ambos

planetas presentan pronunciados ensanchamientos ecuatoriales. La superficie de Saturno se mueve más de prisa que la de Júpiter, pero aquél ejerce una gravedad inferior y por eso tiene un ensanchamiento ecuatorial mayor.

Pero si todo eso es cierto para Júpiter y Saturno, ¿por qué no puede aplicarse a la Tierra? Nuestro planeta gira sobre su eje más aprisa que la luna, Mercurio o Venus en derredor de los suyos respectivos. Un punto del ecuador terrestre lleva una velocidad de 1670 km por hora, cifra muy por debajo de la que registraría si estuviese en el sol, Júpiter y Saturno. Pero sucede que también la fuerza de la gravedad terrestre es muy inferior. Newton consideró que el ensanchamiento ecuatorial de la Tierra tenía que ser lo bastante pronunciado como para poder medirse.

La manera de poner a prueba esta teoría sería trasladarse a las diversas partes de la Tierra y efectuar cuidadosas mediciones de distancias y ángulos, lo que nos permitiría precisar la curvatura superficial. Si la Tierra fuese una esfera perfecta, la curvatura sería la misma en todas partes; si se tratara de un esferoide oblongo, la curvatura sería más acentuada en la proximidad del ecuador que en los polos. En 1736, una expedición francesa al mando de Louis de Maupertuis (1698-1759) viajó a Laponia, cerca del Polo Norte, con el fin de medir la curvatura en aquella región. Al mismo tiempo, otra expedición francesa encabezada por Charles de la Condamine (1701-1774) se dirigió a Perú, junto al ecuador, también para medir la curvatura terrestre.

Se demostró que Newton estaba en lo cierto. La Tierra presentaba un ensanchamiento ecuatorial, aunque de escasa relevancia. El diámetro ecuatorial es de 12 756 km, y el polar, de 12 713, o sea que la diferencia es de 43 km. En otras palabras, la Tierra es casi una esfera perfecta, pero sólo «casi».

En 1959, Estados Unidos puso en órbita alrededor de la Tierra un satélite llamado Vanguard I. Por su forma exacta de rodear la Tierra, pudo calcularse que el ensanchamiento ecuatorial era 7,6 m más elevado al sur del ecuador que al norte. Este hallazgo se

anunció como una prueba de que la Tierra tenía forma de pera, esto es, más ancha en su mitad meridional que en la septentrional. Fue ésta una observación desafortunada, pues la diferencia de ensanchamiento sólo es mensurable si se aplica la más extrema minuciosidad. En efecto, el conjunto del ensanchamiento es tan pequeño que no resulta perceptible a simple vista, y todos cuantos han contemplado la Tierra desde el espacio la han visto como una esfera perfecta. Decir que tiene «forma de pera» puede inducir a error. Por suerte, esa expresión no tardó en caer en desuso.

33. ¿Por qué la luna cambia de forma?

Ahora es el momento de volver nuestra atención a otras partes del universo. Los antiguos griegos creían con toda razón que la luna era el objeto celeste más próximo a la Tierra, así que parece oportuno tratar de ella a continuación.

La luna es el único objeto celeste permanente que cambia visiblemente de forma noche tras noche. El sol permanece siempre como un círculo de luz cegadora. Los demás planetas y estrellas siempre son puntos luminosos. Algunos cometas poseen formas peculiares y cambiantes, pero no resultan permanentemente visibles en el cielo nocturno. (Ya me ocuparé de ellos más adelante).

La luna experimenta, pues, una serie regular, progresiva y repetitiva de cambios. Una noche aparece baja en el firmamento occidental, inmediatamente después del crepúsculo, dejando visible tan sólo una pequeña parte. Cada noche se va desplazando hacia el Este y va creciendo de tamaño. Al cabo de una semana, aproximadamente, forma un semicírculo de luz y continúa agrandándose, hasta que, transcurrida otra semana, se ha convertido en un círculo luminoso perfecto. A continuación, empieza a menguar. Al cabo de una semana más ya es de nuevo un semicírculo (pero lo que ahora se ilumina es la otra mitad del círculo) y, por último, otra semana y el menguante se ha reducido al mínimo en el cielo oriental poco antes del alba. Luego desaparece un par de noches y el ciclo completo se reinicia.

El pensamiento espontáneo puede inducir a considerar la luna como un ser vivo: nace, crece, alcanza el máximo crecimiento, merma y muere, cumpliendo todas estas etapas en el transcurso de

un mes. Todavía hoy oímos llamar «luna nueva» al momento que precede a la aparición del cuarto creciente en el cielo occidental, y «luna llena» al período entre los cuartos creciente y menguante. Como ya he explicado, este ciclo de fases lunares sirvió para establecer el mes como unidad de tiempo, y el primer calendario se basó en él. Pero ¿por qué se producen las fases? ¿Realmente era una luna nueva la que nacía cada mes? El filósofo griego Tales no lo creía así, y probablemente tampoco, antes que él, los astrónomos babilónicos.

La razón de este escepticismo derivaba de considerar la posición de la luna en relación con la del sol a medida que transcurría el mes. En principio, parecía natural suponer que las leyes que gobernaban las cosas de la Tierra eran distintas de las que gobernaban las del cielo. En la Tierra, todo caía; en el cielo, todo se movía formando círculos. En la Tierra, todo cambiaba y decaía; en el cielo, todo parecía permanente y no sujeto a cambios. La sustancia de la Tierra era oscura; en el cielo, todos los objetos brillaban sin cesar. Si el material del que estaba hecha la luna brillara sin cesar, como el del sol, los planetas y las estrellas, la luna sería siempre un círculo luminoso inmutable. Ahora bien, no era así, sino que aumentaba y disminuía en el transcurso del mes y no brillaba todo el tiempo. Si la luna fuese tan oscura como la Tierra y brillara sólo con la luz reflejada del sol, esta luz incidiría en sus distintas partes, según la situación de la luna y el sol, la una respecto del otro.

Por ejemplo, si la luna se encuentra entre la Tierra y el sol, éste iluminará la cara de la luna más alejada de nosotros, por lo que no podremos ver absolutamente nada de la luna. Pero dado que ésta efectúa el recorrido Oeste-Este doce veces más aprisa que el sol, la noche siguiente se hallará un poco más al este del sol, y podremos percibir una pequeña parte de la cara iluminada en su parte Oeste, que se presentará como un leve creciente. A medida que la luna continúa desplazándose hacia el Este, iremos distinguiendo más y más superficie de su parte iluminada, y el creciente se irá agrandando.

Cuando ha recorrido la cuarta parte de su trayectoria por el cielo, si se compara con el sol, su cara occidental está iluminada y advertimos un semicírculo de luz. Nos hallamos en la mitad de la fase. Continúa creciendo hasta que la luna se encuentra en la parte del cielo opuesta a donde se halla el sol. Éste envía entonces los rayos «por encima del hombro» de la Tierra, por así decirlo, e ilumina la cara completa de la luna que mira hacia nosotros, con lo que vemos la «luna llena».

Después la luna empieza otra vez a «atrapar» al sol, y la parte iluminada que nosotros percibimos se encoge. Al cabo de una semana, sólo está iluminada la mitad oriental, y continúa menguando. Luego la luna le «pasa» al sol, y todo el ciclo comienza de nuevo. Cualquier persona que considere con atención este proceso, deberá concluir que la luna, lo mismo que la Tierra, es un cuerpo oscuro que sólo brilla porque refleja la luz solar.

34. ¿Brilla la Tierra?

Si la luna es un cuerpo oscuro que brilla porque refleja la luz solar, ¿por qué no puede ser ése también el caso de la Tierra, que es asimismo un cuerpo oscuro? Parece razonable suponerlo, pero las gentes se resistían a aceptar esta idea, pues persistían en su convicción de que las cosas de la Tierra eran fundamentalmente distintas de las del cielo. ¿Cómo podía la Tierra brillar como si fuera un objeto celeste, si no lo era?

Por supuesto, la mejor manera de determinar si la Tierra brilla como la luna sería salir al espacio exterior y alejarse lo bastante como para contemplar adecuadamente nuestro planeta. Pero tal cosa no fue posible hasta la década de 1960, de modo que la cuestión tenía que resolverse sin despegarse de la superficie.

Y esa cuestión no dejaba de presentar sus rarezas. En ocasiones, cuando la luna se ve pequeña, se percibe también el resto de ella, apagada y rojiza, hasta completar su forma circular. Se trata del resto de la luna y no de cualquier otro cuerpo, porque la luna presenta ciertas marcas visibles en su superficie, y aquella parte apagada y rojiza presenta las mismas marcas. Durante mucho tiempo nadie dio con una explicación convincente de esta peculiaridad. Hacia el año 100 a. C., el filósofo griego Posidonio (h. 135-h. 50 a. C.) consideró que la luna era en parte transparente, por lo que sólo la atravesaba un poco de luz solar. Hacia 1550, el matemático alemán Erasmus Reinhold sugirió que la luna no era enteramente oscura, sino que emitía un brillo suave incluso cuando el sol no incidía en ella.

Pero supongamos que la Tierra refleja la luz solar de la misma manera que lo hace la luna.

Cuando la luna se halla en uno de sus cuartos, se encuentra exactamente entre nosotros y el sol, de tal manera que sólo vemos una pequeña parte de su superficie iluminada a lo largo de un lado. Si en ese momento estuviera usted en la luna, vería lucir el sol «por encima del hombro» de la luna, por expresarlo de algún modo, iluminando toda la cara de la Tierra que estuviera mirando hacia la luna. En resumen, estando usted en la Tierra, la luna se hallaría en fase de luna nueva, y si en ese momento se encontrara en la luna vería desde allí una «Tierra llena». (En efecto, si la Tierra brillase con luz reflejada como lo hace la luna, las fases de nuestro planeta vistas desde la luna serían exactamente opuestas a las fases de la luna vistas desde la Tierra en el mismo momento).

Durante la luna nueva, la cara lunar que mira hacia nosotros no recibe luz del sol, pero en el cielo visto desde la luna se asistiría a la «Tierra llena». La Tierra es mayor que la luna, y debido a su atmósfera nubosa refleja más luz solar que la luna. En su conjunto, la «Tierra llena» vista desde la luna es unas setenta veces más brillante que el plenilunio contemplado desde la Tierra.

La cara no iluminada de la luna recibe sin embargo la luz de la «Tierra llena», pero ésta es mucho más débil que la luz solar, aunque basta para iluminar esa cara oscura en una proporción mensurable. Nos permite asimismo observar esa cara oscura de la luna de manera muy tenue, en el momento de la luna nueva. Galileo fue el primero en explicar este fenómeno, y de forma tan convincente, que pocos dudaron ya a partir de entonces.

35. ¿Por qué hay eclipses de sol y de luna?

De vez en cuando, en el transcurso de un prolongado período, algo oscuro avanza a través de la faz del sol. Éste empieza a menguar más y más, y en ocasiones queda reducido a un pequeño gajo para terminar desapareciendo. En donde estaba el sol momentos antes, sólo queda un círculo oscuro en el cielo, rodeado de un resplandor tenue y perlino. La tierra se oscurece, se levanta un viento frío, los pájaros empiezan a recogerse, y los seres humanos en ocasiones se asustan y pierden la serenidad. ¿Qué ha sucedido? La suposición natural es que algún lobo o dragón cósmico ha devorado el sol, el cual nunca volverá a lucir, por lo que un frío y una oscuridad permanentes señorearán la Tierra, y toda forma de vida, incluidos los seres humanos, perecerá. Pero tal cosa no sucede nunca: al cabo de unos minutos, el sol reaparece por el mismo lado que se ocultó. Crece y crece, y poco después brilla ya con todo su esplendor.

¿Qué ha sucedido realmente?

El punto crucial es probable que ya fuera advertido por los astrónomos babilónicos. Cuando se produce un eclipse de sol, el cielo se oscurece y aparecen las estrellas, pero no así la luna. Ello se debe a que el eclipse de sol siempre parece ocurrir durante la luna nueva, esto es, cuando la luna pasa ante el sol de Oeste a Este. Ahí está la respuesta. La luna transita delante del sol y lo oculta a la vista. Luego continúa su trayectoria, se aleja y el sol reaparece.

En este caso, ¿por qué no hay un eclipse de sol con cada luna nueva? ¿Por qué no se registra un eclipse cada mes? Porque el sol

y la luna no siguen exactamente la misma trayectoria a través del firmamento. Ambos recorridos forman un pequeño ángulo el uno en relación con el otro, y cuando la luna pasa ante el sol, suele avanzar ligeramente por encima o por debajo de él. Sólo cuando la luna pasa ante el sol en el momento en que ambos astros se hallan en aquella parte de su trayectoria donde se cruzan, la luna se coloca realmente delante del sol. Existen dos de tales puntos de cruce, los «nodos», en lugares opuestos del cielo, y en las ocasiones en que se produce el cruce, se registra un eclipse de sol.

Cuando la luna pasa frente al sol, la sombra de aquélla se proyecta sobre la superficie terrestre. (La luna proyecta, en efecto, una sombra, como lo hacen todos los sólidos bañados en luz pero carentes de luz propia). La sombra que llega a la Tierra se ha ido estrechando hasta el punto de que sólo cubre una pequeña parte de la superficie terrestre. Podría tener sólo 160 km de ancho o incluso mucho menos, lo cual significa que aunque usted pueda ver desaparecer el sol entero, las personas situadas unos pocos kilómetros más allá verán la luna cubrir sólo una parte de la faz solar (eclipse parcial), y las que se hallen aún más lejos no verán eclipse alguno. La sombra se desplaza sobre la superficie terrestre a medida que la luna se mueve, pero aun así cubre sólo una pequeña parte de dicha superficie, y en cada punto permanece sólo siete minutos como máximo.

El sol y la luna parecen presentar tamaños ligeramente distintos en las diversas partes del cielo. Dado que la luna parece en general algo más pequeña que el sol, a veces no cubre éste por entero cuando pasa directamente ante él. Entonces puede distinguirse un delgado anillo de brillante luz solar en derredor de la luna oscura, efecto conocido como «eclipse anular».

Una vez los astrónomos han averiguado las trayectorias del sol y la luna, pueden predecir cuándo se producirá un eclipse. Ésta era una tarea importante de los astrónomos antiguos, pues el pueblo debía estar preparado para el evento, ya que éste solía considerarse un mensaje de los dioses. La predicción exacta

procuraba grandes ventajas a los astrónomos, pues los hacía aparecer como lúcidos intérpretes de la voluntad de aquellos dioses.

Los babilonios aprendieron a calcular con antelación los eclipses, y en Grecia, Tales aprendió a su vez de ellos el procedimiento. Se le atribuye la predicción cumplida de un eclipse de sol en Asia Menor en 585 a. C. Los ejércitos de las dos naciones que se disputaban esa región, Media y Lidia, estaban dispuestos a enfrentarse en una batalla cuando se produjo el eclipse. Los contendientes se asustaron tanto por aquel mal presagio, que se apresuraron a concluir la paz y a regresar a sus respectivos países sin luchar. Los astrónomos modernos han efectuado cálculos retrospectivos a fin de determinar la fecha exacta del eclipse, que resulta ser el 28 de mayo de 585 a. C. De este modo, la abortada batalla es el primer acontecimiento de la historia humana cuya fecha exacta conocemos.

En ocasiones, la luna se eclipsa. Esto sólo sucede durante el plenilunio, cuando el sol se halla al otro lado de la Tierra, y la luna, en oposición a él. Si hemos entendido el mecanismo del eclipse de sol, no hallaremos dificultad alguna en captar el del eclipse lunar: sucede porque la luna atraviesa la sombra de la Tierra.

La Tierra es considerablemente mayor que la luna, con lo que su sombra también lo es. En efecto, puede cubrir toda la luna, dando lugar a un eclipse observable desde la parte de la Tierra que en ese momento mira a la luna. Los eclipses lunares duran más que los solares.

Tampoco un eclipse lunar puede producirse en cada plenilunio, porque luna y sol recorren trayectorias ligeramente distintas. Por lo general, en el momento de la luna llena la sombra de la Tierra pasa sobre la luna o por debajo de ella. Sólo cuando el sol se sitúa en un nodo y la luna en el otro se da realmente un eclipse. También los eclipses de luna pueden predecirse, y algunos creen que las antiguas piedras de Stonehenge se dispusieron con el fin de llevar a cabo tales predicciones.

36. ¿Gira la luna?

Ya me he referido a las desdibujadas marcas que se advierten en la superficie de la luna, las cuales se perciben con más nitidez durante el plenilunio. Las marcas en cuestión despertaron perplejidad en los observadores, y como la imaginación es lo que es, algunas personas dieron en interpretarlas como si configuraran un ser humano, el «hombre de la luna», en tanto otros vieron conejos, cangrejos u otras formas.

Para los eruditos antiguos, convencidos de que los cuerpos celestes eran inmutables y perfectos, las marcas de la luna constituían un enigma. No tenían por qué estar allí; la superficie debía ser perfecta y luminosa como la del sol. Una explicación ingeniosa fue que la luna, siendo el cuerpo celeste más próximo a la Tierra, era capaz de absorber algunas de las manchas e imperfecciones de ella.

Cualesquiera que fuesen sus causas, las marcas permanecían siempre visibles y jamás cambiaban de posición. Lo que parecía significar que la luna ofrecía siempre la misma cara a la Tierra, y que por consiguiente no giraba sobre su eje. Y esto, desde luego, es falso. Lo cierto es que la luna presenta siempre la misma cara a la Tierra, pero aun así gira.

Supongamos, sin embargo, que no girase, sino que se trasladara alrededor de la Tierra de tal manera que una de sus caras mirase siempre hacia determinada estrella lejana. Esto significa que en un punto de la órbita terrestre la estrella debería hallarse en la misma dirección de la Tierra, aunque, claro está, mucho más lejos. Entonces la luna miraría a ambas a la vez. Si la luna continuara

girando en torno a la Tierra hasta encontrarse frente a la otra cara del planeta, la misma cara de la luna seguiría dirigida hacia la estrella y ya no miraría hacia nosotros. O sea que, por así decirlo, nos habría vuelto la espalda, con lo que podríamos ver su otra cara. En resumidas cuentas: si la luna no tuviera realmente un movimiento de rotación, conforme se trasladara alrededor de la Tierra nos permitiría contemplar paulatinamente todas y cada una de sus partes. Es decir, que tiene que girar en torno a su propio eje para que pueda mostrarnos sólo una cara.

Y además debe efectuar ese movimiento de cierta manera: ha de completar una vuelta exactamente en el tiempo que tarda en dar un giro completo a la Tierra. Mientras la luna recorre su trayectoria, sólo podemos ver una de sus caras, pero en cambio muestra distintas caras al sol. Si usted se encontrara en la luna, vería la Tierra siempre en el mismo punto del cielo (si permaneciera en la cara que mira siempre a la Tierra) y vería el sol recorrer el cielo y efectuar una vuelta completa en veintinueve días y medio. El día lunar tendría más de dos semanas de duración, y la noche, el mismo tiempo. La primera persona que dio a conocer con toda claridad este fenómeno al público en general fue Kepler, en su relato de ciencia-ficción *Somnium*, publicado póstumamente en 1634.

37. ¿A qué distancia está la luna?

Los antiguos griegos decidieron que la luna era el cuerpo celeste más próximo a nosotros, pero ¿cómo de próximo exactamente?

Hay dos datos relativos a la luna que eran desconocidos en la Antigüedad: su tamaño y la distancia a que se halla. Ambos están relacionados. Si el tamaño de la luna se hubiese conocido, hubiera sido fácil calcular mediante trigonometría a qué distancia debe estar para que presente el tamaño que podemos apreciar. Si no se conoce ninguna de las cifras, resulta imposible efectuar el cálculo.

¿Qué hacer entonces? En principio, uno puede guiarse por las apariencias. ¿Qué tamaño parece tener la luna? Muchas de las personas a las que se pidiera una estimación al respecto podrían atribuirle 30 cm de diámetro, lo que, naturalmente, resulta imposible. Si la luna tuviese de veras ese tamaño, se hallaría a sólo 17 m del suelo, y no conseguiría superar siquiera a un edificio de cierta altura, y no digamos a una montaña. Si la luna ha de iluminar las montañas, al menos debe estar a 9 km por encima del suelo, y en este caso debería medir como mínimo 90 m de diámetro.

Todo parece apuntar a que está más lejos y es mayor. Hacia 460 a. C., el filósofo griego Anaxágoras (h. 500-428 a. C.) sugirió que el sol podría ser una roca brillante de unos 160 km de diámetro (y, en tal caso, la luna debería tener idénticas dimensiones). Esta idea le acarreó la enemistad de los atenienses, que le acusaron de impiedad y ateísmo, por lo que Anaxágoras hubo de abandonar la ciudad a toda prisa a fin de salvar su vida.

¿Qué puede hacerse, pues? ¿Hay alguna manera de calcular la distancia de algo inalcanzable? Sí, la hay. Colóquese un dedo ante

su ojo derecho y cierre el izquierdo. Usted verá su dedo con el ojo derecho, y le parecerá situado contra la pared que tiene enfrente. Sin mover el dedo, abra ahora el ojo izquierdo y cierre el derecho. Ahora verá el dedo con el ojo izquierdo, y le parecerá que se ha desplazado a lo largo de la pared. O sea, que ha visto su dedo desde dos ángulos distintos: con el ojo izquierdo y luego con el derecho.

Ese desplazamiento de un objeto visto desde dos posiciones diferentes se acentúa conforme el objeto se acerca a usted, y decrece a medida que se aleja. También se acentúa cuando el objeto se observa desde dos posiciones alejadas, y decrece a medida que ambas posiciones se acercan. Este desplazamiento se llama paralaje. Si observa un objeto distante desde dos posiciones distintas y sabe qué distancia media entre una y otra, y si puede medir la magnitud del paralaje, en ese caso, y recurriendo a la trigonometría, puede calcular la distancia del objeto aunque no pueda llegar a él. Los topógrafos pueden usar el paralaje, por ejemplo, para determinar la distancia de un objeto situado en la otra orilla de un río.

¿Puede aplicarse el método del paralaje a la luna? Desde luego que sí: todo se desliza y muestra paralaje cuando usted cambia de posición; pero los objetos muy distantes tienen un paralaje tan reducido, que diría usted que no se desplazan en absoluto. Pero si se observa la luna desde dos posiciones separadas entre sí por unos cientos de kilómetros, su posición se habrá desplazado ligeramente en comparación con las distantes estrellas.

Esto significa que un astrónomo podría medir a qué distancia de una estrella determinada se encontraría la luna en un momento dado de una noche en concreto. (La distancia se mide en ángulos. Una línea que describa un gran círculo en torno al cielo puede dividirse en 360 grados de arco iguales. Cada uno de tales grados puede dividirse a su vez en 60 minutos de arco iguales, y cada minuto, en 60 segundos). Lejos de allí, otro astrónomo mide la distancia entre la luna y la misma estrella en el mismo momento de

la misma noche. Comparadas ambas distancias, la diferencia que pueda haber es el paralaje, con lo que puede determinarse la distancia de la luna.

Esta operación la efectuó por vez primera hacia 150 a. C. el astrónomo griego Hiparco (h. 190-h. 120 a. C.), quien llegó a la conclusión de que la distancia de la luna equivalía a treinta veces el diámetro de la Tierra. Eso significaría que la luna se halla a unos 385 000 km, cifra muy cercana a la correcta.

Ésta debió de haber sido una cifra asombrosa para la época, y por eso dudo de que alguien pudiera dar por buena la medición de Hiparco. Después de todo, si la luna está a 385 000 km, ha de tener casi 3500 km de diámetro, y eso representa poco más de la cuarta parte del diámetro terrestre. Con ello, había que aceptar la luna no como una bandeja de plata dispuesta en el firmamento, sino como un mundo.

La distancia de la luna fue todo lo más que pudieron calcular los antiguos griegos. Los paralajes de los demás objetos celestes eran demasiado pequeños para ser medidos. De todas formas, la distancia de la luna bastó para comunicar a la humanidad su primera idea de que el universo era muy vasto y que contenía otros mundos además de la Tierra.

Si subsistía alguna duda sobre lo anterior, se disipó en 1609, cuando Galileo dirigió su telescopio hacia la luna. Vio cordilleras, llanuras y lo que parecían cráteres volcánicos. Estos accidentes daban cuenta de las marcas en la superficie lunar visibles desde la Tierra incluso sin telescopio. Así la luna fue definitivamente considerada como un mundo.

38. ¿Cuál es la masa de la luna?

Aun en el caso de que un astrónomo antiguo hubiera aceptado de buen grado el punto de vista de Hiparco acerca de la luna, y la concibiese como un vasto mundo, hubiese podido objetar que los cuerpos celestes estaban compuestos de pura luz y que carecían de sustancia. Su tamaño podía no tener mayor relevancia que el de una nube o una sombra, por ejemplo. Pero sí sería importante determinar la masa de la luna: por así decirlo, averiguar cuánta materia contiene. ¿Y cómo puede hacerse? Resulta imposible pesarla o ejercer una fuerza sobre ella para modificar su movimiento, como tampoco es posible hacerlo con la Tierra. Tampoco se podía ir a la luna (hasta 1969) a fin de medir la fuerza de la gravedad y calcular de este modo la masa.

Sin embargo, es posible medir la fuerza de la gravedad (suponiendo que la haya) desde la propia Tierra. Para ello, pensemos en un columpio, algo que todos podemos imaginar: un tablón de madera, largo, en equilibrio sobre un eje, con un niño sentado en cada extremo. Uno de ellos está abajo, con los pies tocando el suelo. Se da impulso, con lo que el extremo del columpio que ocupa asciende y el otro desciende. Cuando el otro niño toca el suelo, toma a su vez impulso con los pies y el movimiento que provoca invierte la situación, la cual puede mantenerse tanto tiempo como los interesados deseen.

Pero supongamos que uno de los niños es mucho más pesado que el otro: puede darse el caso de que se impulse hacia arriba y el columpio ascienda un poco, en efecto, pero volverá a caer debido a que el peso del niño más delgado no basta para hacer descender

completamente su extremo, y mantener así en el aire a su compañero más corpulento. En tal caso, el columpio no funcionaría.

La solución consistiría entonces en equilibrar el tablón en un punto más próximo a donde se halla el niño gordo. Cuanto más cerca de éste se sitúe el punto de apoyo, más difícil le resultará mantener su extremo abajo, y más fácil será para el niño delgado, ahora lejos de dicho punto, hacer otro tanto. Finalmente, se encuentra el lugar donde hay que situar el punto de apoyo para que los dos niños tengan la misma facilidad para columpiarse arriba y abajo.

Si pesa usted a ambos y mide la distancia que separa a cada uno de ellos del punto de apoyo cuando el columpio está en equilibrio, advertirá que si el niño gordo pesa el doble que su compañero, este último necesitará doble longitud de tablón que el otro. En efecto, si conoce usted el peso de uno de los niños pero ignora el del otro, si mide las respectivas longitudes del columpio a cada lado del punto de apoyo cuando se halla en equilibrio, puede calcular el peso del otro niño sin necesidad de pesarlo. Éste es el principio de la palanca establecido por vez primera con rigor matemático hacia 250 a. C. por el matemático griego Arquímedes (287-212 a. C.).

La situación de la Tierra respecto a la luna es algo parecida a la de los dos niños del columpio. La gravedad terrestre atrae a la luna, de tal manera que la luna gira en torno a la Tierra. Pero la gravedad de la luna atrae a su vez a la Tierra, lo que determina también una tendencia de la Tierra a girar alrededor de la luna.

Si la Tierra y la luna tuvieran idéntica masa, ambas tendencias también se igualarían, y Tierra y luna girarían alrededor de un punto situado a medio camino entre el centro de cada una de ellas, las cuales se situarían una en el lado opuesto de la órbita de la otra.

Pero si la Tierra tiene una masa superior a la de la luna, el punto de equilibrio entre ambas o centro de gravedad ha de estar más cerca del «niño gordo». La Tierra tiene una masa considerablemente superior a la de la luna, con lo que el centro de

gravidad está muy próximo al centro de la Tierra, tanto que podemos considerar sin más que la luna gira en torno a la Tierra y que ésta permanece inmóvil.

Sin embargo, no está inmóvil en absoluto: describe un reducido círculo alrededor del centro de gravedad cada mes, y el centro de la Tierra siempre está en el lado del centro de gravedad alejado de la luna. Cabe determinar el tamaño del pequeño círculo descrito por la Tierra cada mes estudiando el movimiento de las estrellas en el transcurso de dicho período. Conforme la Tierra describe su pequeño círculo mensual, las estrellas parecen describir a su vez otro en la dirección opuesta.

El centro de gravedad del sistema Tierra/luna está 81,3 veces más cerca del centro de la Tierra que del centro de la luna. El centro del sistema se halla a 4700 km del centro de nuestro planeta, es decir, a 1600 km bajo la superficie, con lo que a nuestros ojos parece como si fuera la luna la que realiza todo el giro.

Esto significa también que la luna tiene una masa equivalente a $1/81,3$ la masa de la Tierra. Puede parecer mucho, pero significa que la masa de la luna es de $7,35 \times 10^{22}$ kg.

Como la luna tiene una masa inferior, también ejerce una menor fuerza gravitatoria. Si estuviéramos en la luna sólo pesaríamos $1/81,3$ de lo que pesamos en la Tierra, pero debemos recordar que como la luna es un cuerpo más pequeño, nos encontraríamos más cerca de su centro que del terrestre cuando estamos en nuestro planeta.

Una vez conocidos la masa y el tamaño de la luna, podemos calcular su densidad, que resulta ser de $3,34$ g por cm^3 : sólo tres quintas partes de la terrestre. De ahí podemos deducir de inmediato que la luna carece de un núcleo de hierro como el de la Tierra, y que debe ser rocosa en todo su espesor. Además, como la luna es menor que la Tierra, su temperatura central es inferior a la del centro de la Tierra, y dado que la roca no se funde con tanta facilidad como el hierro, podemos afirmar con seguridad que la luna no tiene un centro líquido de ninguna clase.

En 1998 la sonda de la NASA Lunar Prospector descubrió que la luna tiene un núcleo de hierro de unos 300 km de diámetro. Asimismo, percibió lo que podía ser agua congelada, hallazgo que hasta la fecha no ha podido ser confirmado.

Sin centro líquido, nada hay en el centro de la luna que pueda entrar en turbulencia, y aunque lo hubiera, la luna gira demasiado despacio como para provocar turbulencia alguna. De lo que podemos concluir que la luna carece de campo magnético. Cuando se enviaron sondas a fin de medir sus propiedades magnéticas, se descubrió que aquella conclusión era correcta: a diferencia de la Tierra, la luna no es un imán.

En cuanto a los demás planetas, Marte gira muy aprisa, pero tampoco posee un núcleo de hierro. Mercurio y Venus sí lo tienen, pero su rotación es muy lenta. Como resultado de ello, esos cuerpos tampoco son imanes. (Mercurio manifiesta un levísimo magnetismo, lo cual constituye un enigma).

En diciembre de 2006 el científico alemán Ulrich Christensen (1954), del Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar, publicó en la revista Nature un artículo en que dice resolver el misterio. Su teoría es que la capa superficial del núcleo de Mercurio está estratificada, cosa que aísla el calor del núcleo, que es el único que rota efectivamente para generar el campo magnético. Ello sumado a la lenta rotación del planeta da como resultado un magnetismo leve. Según Christensen, su teoría podrá ser contrastada por la sonda de la NASA Messenger, que llegará a Mercurio en el 2008 y por la sonda de la Agencia Espacial Europea (ESA) Bepi-Colombo, que se lanzará hacia Mercurio en el 2013.

39. ¿Qué son las mareas?

En un momento dado, la cara de la Tierra que mira a la luna se halla alrededor de un 7% más cerca de ésta que la cara opuesta. Esto significa que la cara que mira a la luna experimenta en alguna medida una mayor atracción gravitatoria hacia nuestro satélite que la otra cara. La Tierra se alarga por ello ligeramente sobre una línea que une el centro de la Tierra y el centro de la luna, lo que determina la aparición de una protuberancia en cada lado.

La superficie sólida de la Tierra apenas se da, pero el agua del océano es, en su conjunto, menos compacta, y contribuye a formar aquella protuberancia en medida considerablemente mayor que la tierra firme. Hay, pues, dos protuberancias de agua de mar: una en la cara terrestre que mira a la luna y otra en la cara opuesta. A medida que la Tierra gira, cada parte de su superficie de tierra firme pasa a ocupar el lugar donde se hallaba la protuberancia acuática, y la desplaza más allá.

Visto el fenómeno desde tierra, parece como si el océano aumentase su nivel, incrementándose hasta el máximo la «marea alta» y retrocediendo luego hasta la «marea baja», lo que sucede dos veces al día. Realmente, puesto que la luna se traslada en su órbita entre una marea alta y la siguiente, un punto dado de nuestro planeta es probable que registre una marea alta cada doce horas y media.

Si el proceso se desarrollara así, sin más, los seres humanos hubieran relacionado la marea y la luna desde los tiempos prehistóricos. Sin embargo, se presentan complicaciones. También el sol provoca mareas, aunque éstas son inferiores en alrededor de

un tercio a las debidas a la luna. Cuando sol y luna están alineados, durante el plenilunio y la luna nueva, las mareas se incrementan y descienden en relación con lo que es habitual. Cuando el sol y la luna ejercen su atracción formando ángulos rectos, como sucede en mitad de los cuartos creciente y menguante, las mareas son más moderadas. También el trazado del litoral influye en gran medida en cuándo se produce la marea y en cómo se desarrolla.

Las primeras civilizaciones occidentales surgieron a orillas del Mediterráneo, que es un mar casi cerrado. Con la marea alta, penetra agua en él procedente del Atlántico, a través del estrecho de Gibraltar; pero mucho antes de que el proceso se complete, se ha iniciado la marea baja, y el agua comienza a retroceder. Con ello, en definitiva, la modificación del nivel del mar en el Mediterráneo es mínima.

Hacia 300 a. C., el explorador griego Piteas (h. 330-¿? a. C.) navegó por vez primera fuera del Mediterráneo. Por el Atlántico llegó a las Islas británicas y a Escandinavia, y durante su periplo presencié el fenómeno de las mareas. Lo recogió en sus escritos y llegó a sugerir que guardaba alguna relación con la luna. Pero se prestó escasa atención a sus observaciones. Cuando Julio César llevó a cabo una incursión a Gran Bretaña, varó sus naves sin adentrarlas apenas en la playa, y a punto estuvo de perderlas al producirse una inesperada marea alta. Siendo César quien era, se apresuró a subsanar su error.

La relación con la luna resultaba difícil de aceptar porque se ignoraba la fuerza de la gravedad. Galileo, por ejemplo, que fue un pensador certero en la mayoría de los casos, se reía de la posibilidad de que la luna pudiera ejercer alguna influencia sobre la Tierra, y creyó que las mareas eran producto de la turbulencia ocasionada en el océano por efecto de la rotación terrestre. Las mareas sólo pudieron ser cabalmente comprendidas después de que, en 1687, Newton formulara su teoría de la gravitación universal.

40. ¿Cómo afectan las mareas a la Tierra?

Las mareas revisten una importancia extrema para la navegación. Cuando sube la marea, aumenta el calado de un puerto, con lo que un barco muy cargado tiene menos probabilidades de embarrancar o de tener problemas con bajíos, escollos y rocas. Por tanto, los barcos tienden a zarpar con la marea. Si por alguna razón ello no es posible, hay que esperar la marea siguiente, sin tener en cuenta la premura de tiempo.

Pero existe otro efecto más importante aunque menos inmediato de las mareas. A medida que la Tierra gira, el océano «se hincha» por cada lado, y hay lugares donde el nivel del agua es lo bastante somero como para producir una considerable fricción entre el agua y la tierra cuando la una se mueve en relación con la otra. Así, el agua «rasca» el fondo oceánico en vastas extensiones cuando sube y baja la marea.

La fricción actúa exactamente igual que cuando frena un automóvil. Una parte del movimiento de rotación terrestre se ve contrarrestado por la fricción causada por las mareas, con lo que el planeta experimenta un efecto de frenado. Pero la rotación es tan poderosa que ese efecto resulta minúsculo: las mareas hacen que el día se alargue sólo un segundo cada 62 500 años.

Pese a que el efecto de frenado es en conjunto muy escaso, se acumula. Incluso unas pocas milésimas de segundo adicionales significan que la sombra causada por un eclipse total de sol, que siempre se proyectaría en el mismo lugar si el día tuviese exactamente la misma duración al segundo, se proyecta un centenar de kilómetros más allá que en el eclipse anterior.

Basándonos en la incidencia de los eclipses anteriores, podemos calcular el lento alargamiento del día.

Pero la rotación terrestre no se puede frenar sin que se produzca algún efecto en algún lugar. Nuestro planeta tiene un momento angular debido a su giro, el cual no puede ser destruido por completo. Si el giro disminuye, el giro de la luna puede aumentar, con lo que el día se alarga, la luna se aleja ligeramente de la Tierra y efectúa un movimiento de traslación más amplio en torno a ella.

Naturalmente, la Tierra ejerce también un efecto de marea sobre la luna. Dado que la Tierra tiene una masa 81,3 veces superior a la de la luna, produce un efecto de marea considerablemente mayor (si bien el menor tamaño de la luna disminuye algo dicho efecto). La luna tiene un momento angular inferior al de la Tierra, y su rotación se ve más fácilmente frenada cuando el efecto de las mareas provoca la fricción de las capas superficiales de roca contra las capas situadas debajo. Como resultado de ello, la rotación lunar se ha vuelto más lenta hasta el punto de que completa sólo un giro en el curso de su traslación en torno a la Tierra. Lo cual significa que muestra siempre la misma cara a nuestro planeta, de tal manera que el abultamiento determinado por la marea situado en esa cara y el que se registra en la opuesta quedan detenidos, y no van más allá en el efecto de frenado debido a la acción de la marea terrestre. Por eso no es una coincidencia que la rotación de la luna sobre su eje y su traslación en torno a la Tierra empleen el mismo tiempo: se trata de una consecuencia del fenómeno de las mareas.

41. ¿Hay vida en la luna?

Ante todo, al tomar en consideración esta pregunta, debemos plantearnos qué entendemos por vida. En la Tierra, todas las formas de vida, por distintas que puedan parecer, están constituidas por los mismos elementos químicos y se sujetan a las mismas condiciones fundamentales de existencia. Forman «nuestra modalidad de vida» o «la vida tal como la conocemos».

Puede darse el caso de que haya otras formas de vida, radicalmente distintas, con un origen químico diverso, con un conjunto de requerimientos fundamentales asimismo diferentes, y con una naturaleza tan alejada en todos los sentidos de la vida sobre la Tierra, que si llegáramos a encontrarnos con alguna de esas formas, acaso no la reconoceríamos siquiera como vida.

No sabemos nada acerca de esas otras clases de vida; ignoramos incluso si es posible su existencia, de manera que no podemos ocuparnos propiamente de ellas. Así pues, no se trata tanto de interrogarse acerca de si hay vida en la luna cuanto de formularse esta pregunta: «¿Existe en la luna vida tal como nosotros la conocemos?».

En cuanto se descubrió que la luna era un mundo, se dio más o menos por supuesto que albergaría vida, e incluso vida inteligente. Y lo mismo cabe decir de los demás cuerpos celestes conforme quedó de manifiesto que se trataba de otros tantos mundos. En tiempos pasados, la creencia generalizada era que la finalidad de los mundos era albergar vida, que un mundo sin vida era un mundo malogrado y que tales mundos malogrados no existían. Se trata de un argumento que tendemos a creer que debería ser cierto.

¿Podemos decir si hay o no vida en la luna sin proyectar en ello nuestras creencias acerca de lo que debería ser o no ser? Recordemos que hasta la década de 1960 no fue posible viajar a la luna y ver lo que realmente hay en ella.

Pero no precisábamos efectuar el viaje, pues podíamos pronunciarnos sobre el asunto a distancia. Consideremos las marcas de la luna, las que Galileo descubrió a través de su telescopio, que eran montañas, cráteres y llanuras. Esas marcas nunca cambiaban. La luna quedaba en ocasiones oculta por las nubes terrestres, pero en una noche clara aquellas manchas nunca se desdibujaban por causa de unas nubes lunares. La luna podía ser un mundo igual que la Tierra, pero nunca presentaba nubes, lo cual parecía implicar que no había aire a partir del cual pudieran formarse tales nubes.

Eso parecía cierto sin la menor duda. De vez en cuando, a medida que la luna se desplazaba por el cielo, pasaba frente a una estrella. Si la luna tenía atmósfera, a medida que se aproximara a la estrella en cuestión, esta última empezaría a brillar a través de la atmósfera lunar, y su luz disminuiría lentamente hasta que por fin desaparecería al pasar por detrás del propio cuerpo sólido de la luna. Y esto no sucedía. Antes bien, la estrella seguía brillando con todo su esplendor hasta el momento mismo de ser ocultada por el paso de la luna: no había, por tanto, atmósfera que apagara ese brillo.

Cuando vemos parte de la cara de la luna iluminada por el sol, distinguimos el límite entre las partes iluminada y oscura. Si hubiese una atmósfera, ese límite sería impreciso, como durante el crepúsculo terrestre. En la luna, en cambio, el límite es nítido; no hay crepúsculo y por tanto no hay atmósfera.

¿Y por qué no la hay? La masa de la luna es inferior a la de la Tierra, lo que implica una menor fuerza de la gravedad. La gravedad superficial de la luna es sólo la sexta parte de la terrestre, y la fuerza gravitatoria no basta para retener una atmósfera. Si la luna tuvo

alguna vez atmósfera, se desplazó por el espacio hace muchísimo tiempo.

Tampoco tiene la luna aguas superficiales: océanos, lagos, lagunas o ríos. Si los tuviera, esas aguas se evaporarían por efecto del calor solar, y la luna no tendría gravedad suficiente para retener el vapor, de modo que si alguna vez hubo agua en la luna, ahora ya habría desaparecido. Cuando Galileo observó por vez primera la luna, pensó que las zonas oscuras eran mares, como en ocasiones seguimos llamándolos. Observaciones más próximas demostraron sin embargo que había cráteres y otros accidentes en esos «mares», que no existirían si se tratara de mares de verdad. Parecen más bien coladas de lava, fruto de una acción volcánica primigenia. Puesto que podemos concluir fácilmente que la luna carece de aire y de agua, la vida tal como la conocemos no es probable que exista allí. Ya desde el siglo XVII la luna se sabe que es un mundo muerto.

Pero realmente eso sólo significa que no existen formas de vida voluminosas y complejas; es posible que haya mínimos restos de aire y agua acá y allá, en el suelo lunar, que permitan la existencia de formas de vida simplicísimas, como las bacterias, pero con seguridad nada superior a eso.

Las personas, sin embargo, se resistían a renunciar a la idea de que los mundos deben albergar vida, y que un mundo muerto constituye un anómalo despilfarro. En 1835, el periodista británico Richard Adams Locke (1800-1871) escribió una serie de artículos en el *Sun* de Nueva York acerca del descubrimiento de formas de vida avanzada en la luna. Se trataba de pura ficción, pero el público le creyó, y por un breve período el *Sun* se convirtió en el periódico más vendido del mundo. Cuando la gente se empeña en creerse algo, persiste en su creencia a pesar de las pruebas más irrefutables. Al margen del éxito de ese engaño, los primeros estudios de la luna a través del telescopio dejaron bien claro que los mundos muertos podían existir y, de hecho, existían.

42. ¿Qué produjo los cráteres lunares?

Las señales más características de la luna son sus cráteres, depresiones circulares de su superficie, rodeados por una cordillera; algunos miden 150 km de ancho e incluso más. Si pensamos en ellos, podremos fácilmente imaginar dos posibles mecanismos para su formación. El mero hecho de que se les llame cráteres (de una palabra latina que significa copa, porque presentan la misma forma interior cóncava) nos recuerda los cráteres volcánicos, y pudo haber sucedido que en un estadio muy primitivo de su historia la luna registrara una gran actividad volcánica, y que todos los cráteres sean restos de volcanes extinguidos. La otra posibilidad es que los cráteres fueran excavados como consecuencia del impacto de grandes meteoritos sobre la luna.

En los tiempos de Galileo (y un par de siglos después), los hombres carecían de experiencia en materia de bombardeo de meteoritos, pero sí lo sabían todo acerca de los volcanes. De ahí que se diera por supuesto que los cráteres lunares eran de origen volcánico. Desde luego que esos cráteres eran mucho mayores que los terrestres, pero la gravedad superficial de la luna era muy inferior a la terrestre, por lo que una erupción en nuestro satélite sin duda hubiera arrojado muchos más materiales que una erupción de idéntica intensidad en la Tierra. Aun después de que los astrónomos se percataran de la existencia de impactos de meteoritos, seguía sin parecer que los cráteres pudieran tener origen meteorítico. Si esos cuerpos caían, procederían de todas las direcciones, y si incidían oblicuamente, como casi todos lo harían sin duda, abrirían un cráter

elíptico. En cambio, los cráteres volcánicos serían siempre circulares, y ése es justamente el caso de los lunares.

La primera persona que se planteó en serio el origen volcánico de los cráteres de la luna fue el geólogo norteamericano Grove Karl Gilbert (1843-1918), quien en la década de 1890 observó que los cráteres eran de forma muy distinta a los terrestres. Estos últimos, además, se sitúan casi siempre en lo alto de montañas, mientras que los cráteres lunares se hallan al nivel del suelo. Pero lo que no pudo explicar fue por qué son redondos y no elípticos.

El astrónomo norteamericano Forest Ray Moulton (1872-1952) acabó por desvelar el enigma en 1929. Señaló que los meteoritos impactarían la luna a una velocidad de 30 km por segundo, y que la fuerza del choque daría lugar a algo parecido a una explosión en la superficie lunar. Esta explosión y no el impacto en sí formaría el cráter, y la explosión, igual que una erupción volcánica, crearía siempre un cráter circular. El impacto meteorítico se aceptó generalmente desde entonces como la causa de la formación de los cráteres lunares, y en la actualidad los científicos creen que los cuerpos planetarios del sistema solar se formaron por agregación de fragmentos menores, y los últimos de esos fragmentos, al incidir en el conjunto, ocasionaron los cráteres que hoy vemos en la luna.

No hay razón alguna para que sólo la luna muestre esas cicatrices del bombardeo de meteoritos, y las sondas enviadas desde la década de 1960 han demostrado que las tienen todos los objetos celestes que carecen de atmósfera. Los que la poseen pueden borrar mediante la erosión los efectos de los cráteres, debido a que actúan las aguas corrientes, los seres vivos, el avance de los glaciares, el flujo de la lava, etc. Por esta razón, la Tierra parece no tener cráteres, aunque, como explicaré más adelante, existen en nuestro mundo abundantes signos de bombardeo de meteoritos.

43. ¿Cómo se formó la luna?

Ya he descrito cómo se cree que se formó el sistema solar. Pero esa descripción no resuelve todos los problemas, uno de los cuales afecta a la luna. ¿Cómo se formó ésta?

En general, los satélites son mucho menores que los planetas en torno a los cuales giran, de tal manera que los planetas pequeños carecen de satélites o éstos son de tamaño reducidísimo. Mercurio y Venus no los tienen, y Marte cuenta con dos, de unos pocos kilómetros de diámetro.

En 1978, el astrónomo norteamericano James Christy descubrió que Plutón, el planeta más lejano conocido, posee un satélite, Caronte, cuya masa equivale al 10% de la de Plutón. Este último, a su vez, es un cuerpo pequeño, menor que la luna, de modo que Caronte aún es más pequeño.

En agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional (UAI) decidió en asamblea celebrada en Praga rebajar la clasificación de Plutón a «planeta enano» (dwarf planet), categoría que comparte con Ceres y Eris.

Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno cuentan cada uno con numerosos satélites, pero esos planetas son mayores que la Tierra. Algunos satélites de los planetas exteriores alcanzan diámetros de 3000 a 5000 km, y van desde algunos de tamaño inferior a la luna hasta otros considerablemente mayores. Júpiter tiene cuatro de esos grandes satélites, mientras que Saturno y Neptuno cuentan con uno cada uno. Con todo, esos grandes satélites son de tamaño

y masa reducidos si se comparan con los gigantes planetas en torno a los que se trasladan.

En cambio la Tierra, pese a ser un planeta pequeño, tiene un satélite grande: en proporción, mucho mayor que cualquiera de los satélites de los planetas gigantes. La luna tiene el 1,2% de la masa de la Tierra, de tal manera que el sistema Tierra/luna podría considerarse casi un planeta doble.

La primera persona que consideró con criterio científico la formación de la luna fue el astrónomo inglés George Howard Darwin (1845-1912), que se ocupó del tema de las mareas.

Ya he mencionado que, como resultado de la fricción, la luna se va alejando cada vez más de la Tierra, aunque muy despacio. Esto significa que ayer la luna estaba un poco más cerca de la Tierra que hoy, y que estaba más cerca el año pasado y aún más cerca hace un siglo. En efecto, si retrocedemos en el tiempo, hubo de hallarse muy cerca de la Tierra. En ese caso, teorizó Darwin, tal vez la Tierra y la luna formaron alguna vez un cuerpo único.

Esta unidad Tierra/luna tendría el mismo momento angular que ambos objetos tienen ahora por separado. Así pues, su rotación hubiera sido rapidísima, y cabe la posibilidad de que ese cuerpo sometido a un giro tan veloz se hubiera desprendido de sus materiales más superficiales, que acabarían constituyendo la luna. La fricción generada por las mareas la impulsaría hasta situarla en su actual posición.

Durante un tiempo, esta propuesta pareció muy aceptable. En primer lugar, la densidad de la luna es de sólo 3,34 g por cm³, por lo que ha de estar constituida por roca sólida, sin núcleo alguno de denso hierro líquido como el que posee la Tierra. Lo cual tiene sentido, porque la luna se habría formado sólo a partir de la región superficial de la Tierra, compuesta de rocas, y no del núcleo interno.

Darwin señaló también en este punto que la luna es casi tan grande como para caber en el océano Pacífico, de modo que muy bien podría proceder de esa parte. La existencia de volcanes y los terremotos que se dan en derredor del Pacífico podrían representar

las «cicatrices» que han quedado tras la forzada proyección de la luna.

Por desgracia, y pese a lo sugestiva que resulta, la teoría de Darwin no es útil. Hoy día sabemos que la peculiar forma del océano Pacífico cambia con el tiempo, y que ni ésta ni los volcanes y terremotos que lo bordean guardan relación alguna con la luna. Además, si calculamos el momento angular total del supuesto cuerpo único Tierra/luna, resulta que sólo suma una cuarta parte, aproximadamente, de lo que se precisaría para que equivaliese a un fragmento de corteza terrestre desprendido. Por ésta y por otras razones, los astrónomos están ahora seguros de que es del todo errónea la sugerencia de Darwin de que la luna fue arrancada a la Tierra.

Esto parecería significar que la Tierra y la luna se formaron separadamente desde el principio, una idea que da pie a dos posibilidades. La primera es que tanto la Tierra como la luna deben proceder de la misma turbulencia de polvo y gas cuando se estaban formando los planetas, pero por alguna razón constituyeron un planeta doble en lugar de uno solo. La segunda posibilidad es que al principio fueron dos planetas independientes, formados por dos turbulencias separadas. La luna recorría una órbita que de vez en cuando se aproximaba mucho a la Tierra, y en uno de esos momentos, la gravedad terrestre pudo haberla capturado.

La idea de que Tierra y luna se formaron a partir de la misma turbulencia de polvo y gas no parece prometedora, pues ambos mundos hubieran estado compuestos en ese caso por roca y metal, y la luna, al igual que la Tierra, poseería un núcleo metálico, lo que no es el caso. Por otra parte, si los dos mundos se formaron a partir de sendas turbulencias, una de éstas hubiera podido ser mayor y más rica en hierro, dando lugar a la Tierra con su núcleo metálico; la otra turbulencia hubiera podido ser menor y pobre en metal, originándose de ella la luna, más pequeña y formada enteramente por rocas. Pero los astrónomos no han sido capaces de reconstruir

de manera razonable cómo la Tierra pudo haber capturado un cuerpo de gran tamaño como la luna.

Ninguna de las tres alternativas sugeridas brinda una explicación satisfactoria a la existencia de la luna: ni la rotación rápida de Darwin, ni los dos mundos surgidos de una sola turbulencia, ni los dos mundos procedentes de sendas turbulencias, con la subsiguiente captura. Cierta astrónomo hizo gala de su humor corrosivo manifestando que, en vista de que todas las explicaciones habían fallado, la única conclusión a la que cabía llegar era que la luna no existía.

Pero la luna está ahí, y los astrónomos tuvieron que seguir pensando. En 1974, el astrónomo norteamericano William K. Hartmann (n. en 1939) sugirió una cuarta alternativa. Regresó a la idea de Darwin de un único cuerpo Tierra/luna, pero no se apoyó en la posibilidad de que la rotación de dicho cuerpo determinara la expulsión de la luna. En lugar de eso, sugirió algo mucho más violento: en los primeros cien millones de años de formación planetaria hubo de reinar un considerable caos. Los planetas iban formándose a partir de fragmentos menores, y por un momento hubo muchísimos más subplanetas de los que hoy existen, y las colisiones entre ellos no eran infrecuentes. Como resultado de ellas, los cuerpos de mayor tamaño crecieron a expensas de los menores, hasta que con el tiempo se formaron los planetas que conocemos actualmente, dejando el resto del espacio muy despejado. En esos primeros días, un segundo cuerpo muy semejante a la Tierra, pero de sólo el 10% de su masa aproximadamente, pudo haber chocado con la Tierra. (Esto debió de haber sucedido hace más de 4000 millones de años, antes de que se desarrollase la vida en la Tierra, pues la vida hubiera resultado destruida por causa de la colisión. Y tal como la conocemos ahora hubiera tenido que desarrollarse de nuevo). Los dos objetos, cada uno con un núcleo metálico, es probable que se hubieran unido, pero partes de sus capas superficiales rocosas pudieron haber sido proyectadas al espacio y formado la luna. Esta cuarta alternativa soslaya todas las

dificultades de las tres anteriores, sin aportar a su vez ninguna dificultad seria. Al principio, la sugerencia de Hartmann fue ignorada, pero en 1984 la simulación por ordenador del choque de dos cuerpos de considerable tamaño puso de manifiesto que la idea era verosímil, y por ello fue ganando aceptación.

En 2006 se confirmó la teoría de Hartmann de creación de la luna gracias a las investigaciones de la sonda SMART 1, de la Agencia Espacial Europea (ESA), enviada a la luna en septiembre de 2003, y que llegó a su órbita en noviembre de 2004.

44. ¿Podemos alcanzar la luna?

Puesto que ya lo hemos logrado, la respuesta es sí, pero mucho antes de que existiera un método para trasladarse allí, gentes imaginativas ya habían escrito acerca de viajes a la luna. Se trataba al principio de simples fantasías, destinadas a entretener al lector, y a menudo no se hacía esfuerzo alguno para describir la luna de forma realista. Al fin y al cabo, en tiempos pasados no se conocía prácticamente nada sobre la luna real y se le daba el tratamiento de un país distante, como la India o Etiopía.

El primer relato que conocemos de un viaje a la luna se debe a un autor griego, Luciano (h. 120-h. 180). Escrita hacia 165, su historia incluía un vuelo a la luna realizado por su héroe, valiéndose de unas alas de ave. Algún tiempo después, escribió otro relato en el que el héroe era conducido a la luna por una turbulencia de aire. En 1532, el poeta italiano Ludovico Ariosto (1474-1533) escribió un poema épico, *Orlando furioso*, cuyo protagonista alcanzaba la luna montado en el mismo carro que arrebató al profeta Elías según la Biblia. Johannes Kepler hizo que su héroe llegara a la luna en un sueño. Esta narración fue la primera que trató de atribuir a la luna sus propiedades reales, pues en ella se describía su día de dos semanas de duración y su noche, que se prolongaba otro tanto.

Los viajes a la luna ganaron popularidad una vez Galileo hubo demostrado, merced al telescopio, que se trataba de un mundo real. En 1638 se publicó póstumamente el libro titulado *El hombre en la luna*, debido al escritor inglés Francis Godwin (1562-1633). En esta obra, el héroe llegaba a la luna viajando en un vehículo tirado por unas grandes aves. Todos estos viajes daban por sentado que el

espacio entre la Tierra y la luna estaba ocupado por aire, idea que parecía natural en su tiempo. El aire lo llenaba todo en la Tierra; se hallaba incluso en la cumbre de las montañas. ¿Por qué no había de prolongarse indefinidamente hacia arriba? Que no era así se descubrió en 1643 de la manera que se relata a continuación.

El agua puede ser bombeada a lo alto desde la profundidad, pero sólo unos 10 m, no más. A Galileo le intrigó esta particularidad, y en 1643 pidió a uno de sus alumnos, el físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), que investigara el asunto.

Torricelli consideró que cuando se bombeaba, escapaba algo de aire del cilindro de la bomba. Este aire se extendía bajo la superficie del agua del manantial. Por su parte, el aire que presionaba sobre esa misma agua parecía forzarla a penetrar en el cilindro una vez se había desalojado parte del aire de su interior, con lo que la bomba funcionaba, desalojando más y más aire y elevando más y más agua a través del cilindro. Cuando el agua alcanzaba su límite de 10 m, parecía como si la columna de agua hubiera alcanzado toda la presión inferior de aire que le era posible. Las dos presiones —la de la columna de aire presionando sobre la superficie del manantial y la de la columna de agua en el interior del cilindro de la bomba— parecían igualarse e impedir que el agua ascendiera más.

A fin de comprobar esta teoría, Torricelli recurrió al mercurio, un líquido de una densidad próxima a 13,5 veces el agua, con lo que una columna de mercurio debía ejercer 13,5 veces más presión que una columna de agua de la misma longitud. Si la presión del aire podía elevar el agua a 10 m, debería elevar sólo 0,76 m el mercurio. Torricelli llenó de mercurio un tubo de cristal de 1,2 m de longitud. Tapó una de las aberturas y puso el tubo en posición vertical, introduciendo la parte inferior, asimismo tapada, en un amplio recipiente de mercurio. Cuando el tubo fue destapado por la parte inferior, el mercurio empezó a vaciarse, pero se detuvo cuando la columna medía 0,76 m. Estaba claro que el mercurio ejercía hacia abajo una presión igual a la del aire (que equivalía al peso de una

columna de aire de la misma anchura que la de mercurio, y que se prolongaba hasta el límite superior de la atmósfera).

Esto demostró, en primer lugar, que el aire tenía peso y, por tanto, masa. No era, pues, vapor desprovisto de masa, sino un objeto material, y pese a estar su materia ampliamente repartida, seguía siendo materia. En segundo lugar, el hecho de que una columna de aire elevara tan sólo 0,76 m de mercurio, demostraba que la presión era finita y que por consiguiente también era limitada su altura, lo cual significaba que el peso de un volumen de aire podía ser cuidadosamente medido y su densidad, determinada. El aire tiene una densidad de 0,0013 g por cm^3 , de tal manera que es 77 veces menos denso que el agua. Así pues, si la densidad de la atmósfera permanece constante en toda circunstancia, debe tener sólo 8 km de altura.

Pero lo cierto es que la densidad de la atmósfera no es uniforme. Las capas superiores pesan y comprimen las capas inferiores, y dado que el aire es comprimido con mucha más facilidad que la roca, las capas inferiores son mucho más densas que las superiores. Este hecho lo probó el físico francés Blaise Pascal (1623-1662), quien en 1648 envió a su cuñado a que ascendiera por la ladera de una montaña llevando tubos de mercurio. Si el aire mantenía la misma densidad a lo largo de todo el recorrido, cuando hubiera alcanzado la altitud de 1600 m, la altura de la columna de mercurio sólo llegaría a las cuatro quintas partes de la que tendría en el nivel del mar. La columna de mercurio descendería, pero no rápidamente. A medida que uno ascendía, el aire se enrarecía y se extendía más, con lo que la atmósfera llegaba más arriba de lo esperado.

Por la misma razón, admitiendo que la atmósfera fuera más amplia, cuando uno hubiera ascendido 1600 km quedaría tan poco aire encima que resultaría inapreciable. Esto puso de manifiesto que si se viajaba de la Tierra a la luna se atravesaría el vacío en más de un 99,95% de la distancia. En efecto, excepto en las regiones de la

inmediata vecindad de un gran cuerpo, en el espacio reina el vacío, excepto minúsculas trazas de materia.

Aun prescindiendo de este razonamiento, podemos advertir que es cierto. Si el aire llenara el universo, como se daba por seguro en los tiempos anteriores a Torricelli, la luna y otros cuerpos se trasladarían a través del aire e irían perdiendo su energía de manera uniforme a medida que fueran desplazando el aire. El movimiento de la luna se iría frenando hasta caer encima de la Tierra, mientras que el movimiento de esta última decrecería a su vez y acabaría cayendo en el sol. De hecho, la única razón de que los objetos puedan mantener sus órbitas en el espacio indefinidamente es que viajan a través de un vacío y en la práctica no pierden con ello energía alguna.

En lo que se refiere al viaje a la luna, el hecho de que en el espacio exterior reine el vacío plantea ciertas dificultades. La luna no puede alcanzarse auxiliándose con el vuelo de las aves ni mediante surtidores de agua, y realmente no podemos confiar en carros mágicos ni en sueños. La única manera práctica conocida para viajar a través del vacío es hacer uso del principio del cohete. En 1687, Newton señaló, como una de las leyes del movimiento, que si parte de la masa de un objeto es impulsada en una dirección, el resto de la masa debe trasladarse en la dirección opuesta (ley de la acción y reacción). Así pues, si una nave contiene una cantidad de materia susceptible de convertirse en gases calientes, y si se fuerza a estos gases a escapar hacia abajo a velocidad lo bastante elevada, se hallará en condiciones de abandonar la Tierra definitivamente.

En 1650, un libro titulado *Viaje a la Luna*, del escritor francés Cyrano de Bergerac (1619-1655), mencionaba siete maneras diferentes de alcanzar la luna. Seis de ellas eran meras fantasías y resultaban inaplicables, pero la séptima se refería a los cohetes, y ello 37 años antes de que Newton formulara su principio. En 1926, el físico norteamericano Robert Hutchings Goddard (1882-1945) construyó y lanzó el primer cohete de combustible líquido, de tipo

moderno. Era un objeto pequeño, pero abrió camino, y el 16 de julio de 1969 el astronauta norteamericano Neil Alden Armstrong (n. en 1930) fue el primer ser humano que puso pie en la luna.

Los viajes a la luna demostraron de inmediato que ésta, como cabía esperar, estaba desprovista de aire, de agua y de vida. No había signo de que ni ahora ni antes nuestro satélite hubiera albergado siquiera la vida microscópica más simple.

Fueron transportadas a la Tierra rocas lunares para ser analizadas. Puesto que la luna es menor que la Tierra y tiene menos calor en su centro, es menos turbulenta y presenta menos acción volcánica. Por consiguiente, sus rocas deben haber permanecido en la superficie lunar, incambiadas, más tiempo que cualesquiera de la Tierra. En efecto, algunas rocas lunares han resultado tener 4200 millones de años, o sea 500 millones de años más que las más antiguas de cuantas parecen quedar en la Tierra.

45. ¿Qué son los meteoritos?

Cualquiera que haya contemplado el cielo en una noche oscura, habrá tenido ocasión de observar algo parecido a una estrella caer a través del firmamento y desaparecer. Da exactamente la impresión de que una estrella se desliza de su lugar en la bóveda describiendo una curva. De hecho, el fenómeno es conocido popularmente como «estrella fugaz».

Pero ya los antiguos griegos observaron que con independencia del número de estrellas fugaces que resultaran visibles, ninguna de las familiares estrellas fijas desaparecía nunca del cielo. Así pues, fueran lo que fuesen las estrellas fugaces no eran en realidad estrellas. Los griegos eludieron la necesidad de explicar de qué se trataban, llamándolas sencillamente meteoros (de las palabras que significan «objetos en el aire», lo que más o menos equivalía a llamarlas objetos voladores no identificados, esto es, ovnis).

Sabemos ahora que los meteoros son fragmentos de materia del tamaño de cabezas de alfiler o incluso menos. El espacio en las proximidades de la Tierra está repleto de estas partículas (cabría afirmar que el espacio es «polvoriento»), y cuando una de esas partículas se aproxima a nuestro planeta, comprime el aire ante ella. Esta compresión eleva la temperatura de la partícula hasta que arde, se evapora y se descompone en partículas de polvo aún menores. Ese polvo no nos perjudica, e incluso resulta muy útil porque actúa como núcleos alrededor de los cuales se forman las gotas de lluvia. De manera que el polvo contribuye a la precipitación acuosa, esencial para la vida en el suelo. (La cuestión de la procedencia de ese polvo se tratará más adelante en este libro).

No faltan, empero, fragmentos considerablemente mayores que una cabeza de alfiler y que caen sobre la Tierra. Algunos alcanzan un tamaño tal, que sobreviven a su paso a través de la atmósfera y chocan contra la superficie terrestre como objetos relativamente voluminosos. Estos fragmentos mayores que viajan a través del espacio se llaman meteoroides, y aquellos que alcanzan nuestro suelo, meteoritos. Alrededor del 10% de estos últimos están compuestos de níquel y hierro, dato que, como ya expliqué, sugirió a los científicos la idea de que el núcleo de la Tierra podía tener idéntica composición.

Los pueblos antiguos hallaron ocasionalmente meteoritos de níquel y hierro en una época en que aún no habían aprendido a obtener hierro de su mena. A este regalo de una forma particularmente dura de hierro (con la adición de níquel) se le atribuía un enorme valor, pues con él se fabricaban las herramientas mejores, más fuertes, resistentes y cortantes de cuantas había disponibles. Así, la *Ilíada* describe la entrega del premio de los juegos fúnebres organizados en memoria de Patroclo: se trata de un fragmento de hierro que, sin duda, era un meteorito. Ya no se encuentran meteoritos en las regiones desarrolladas de la Tierra, pues todos han sido recogidos.

A veces un meteorito se ve caer. El astrónomo griego Hiparco, que vivió en el siglo II, se cree fue informado por un testigo presencial de la caída de uno de esos cuerpos, acontecimiento que pudo haberse considerado como un signo de los cielos. En la Antigüedad, un meteorito era objeto de culto en el templo de Artemisa, en Éfeso. Probablemente también es un meteorito la piedra negra del santuario de la Kaaba, en la Meca.

A comienzos de la Edad Moderna, los astrónomos no creían en los relatos de piedras caídas del cielo. Un profesor norteamericano, Benjamin Silliman (1779-1864), informó de que él y un colega suyo habían sido testigos de una de esas caídas en 1807. Pero Thomas Jefferson (1743-1826), por entonces presidente de Estados Unidos y consumado erudito, comentó que era más fácil creer que dos

profesores yanquis mentían, que aceptar la caída de piedras del cielo.

(Resulta fácil mofarse de los científicos por su irreductible escepticismo, pero resulta mucho más seguro mostrarse escéptico y dejar que el tiempo y la acumulación de pruebas demuestren la verdad de un concepto impopular, antes que aceptar con facilidad nuevas ideas y gastar esfuerzo científico en búsquedas atolondradas en todas direcciones).

Hubo científicos que adoptaron un punto de vista minoritario. El físico alemán Ernst F. F. Chladni (1756-1827) publicó un libro en 1794 en el que sostenía que, en efecto, caían piedras del cielo, e incluso recogió algunos objetos a los que se atribuía esa procedencia. Un nuevo informe de caídas registradas en Francia en 1803 animó al joven físico de ese país Jean-Baptiste Biot (1774-1862) a emprender una cuidadosa investigación, cuyo resultado convenció por fin al mundo científico de que los meteoritos existían.

Desde entonces han sido minuciosamente estudiados, pues hasta 1969 eran las únicas muestras disponibles de materia no terrestre. Por otra parte eran muy pequeños, y habían permanecido indefinidamente en el vacío del espacio exterior, de modo que resultaba muy probable que no hubiesen cambiado ni hubieran sido afectados desde su misma formación. Algunos meteoritos resultaron tener 4600 millones de años de antigüedad, o sea más tiempo que cualquier objeto que pudiéramos hallar incambiado en la Tierra o en la luna, y esa edad de 4600 millones de años sirvió para establecer el nacimiento del sistema solar, en el que se incluyen el sol, la luna y la Tierra.

46. ¿Pueden ser peligrosos los meteoritos para la vida y las propiedades?

Desde luego que sí. No hace falta pensar mucho para llegar a la conclusión de que si la Tierra es bombardeada de vez en cuando por fragmentos de roca y metal, tarde o temprano uno de esos proyectiles acabará golpeando a alguien. Si bien se sabe que los meteoritos han caído sobre casas e incluso coches, no hay constancia de que hayan ocasionado alguna muerte. Pero parece lógico pensar que sólo es cuestión de tiempo que ocurra.

La Tierra constituye un blanco muy amplio, y es mucho más probable que un meteorito caiga en el océano, en un desierto o en una zona forestal o agrícola de población dispersa, que encima de un ser humano o incluso en una ciudad. Pero el número de personas aumenta regularmente y también el de ciudades, y la Tierra cada vez se va llenando más y más de estructuras debidas a la mano del hombre, con lo que la diana se va ampliando y, con el tiempo, un meteorito puede llegar a ocasionar algún tipo de tragedia.

Por supuesto que cuanto mayor sea el meteorito mayores daños puede causar, pero los grandes meteoritos son muchísimo más raros que los pequeños. El peor impacto que conocemos en tiempos históricos se produjo en 1908, cuando un enorme objeto cayó en Siberia central y derribó todos los árboles de un bosque a lo largo de unos 32 km. Aniquiló una manada de ciervos, pero la zona estaba deshabitada y no se perdieron vidas humanas. Hace quizá 25 000 años un meteorito aún mayor cayó en lo que hoy es Arizona, y abrió un cráter de 800 m de diámetro. Gracias a que se halla en un área desértica, no ha tenido que sufrir los efectos del agua ni de la

actividad humana en grado apreciable, por lo que el cráter sigue visible. Si ese meteorito hubiera caído en nuestros días sobre una ciudad, la hubiera destruido en un instante.

Hay señales de impactos aún mayores registrados hace unos pocos millones de años, que dejaron cráteres aún más amplios, pero éstos han sido borrados por la acción del viento, el agua y el desarrollo de la vida vegetal, si bien su existencia aún puede ser determinada. Antes, sin embargo, de ocuparnos de los mayores impactos, vamos a tratar de otro tema.

47. ¿Qué son los asteroides?

Una de las razones por las que los científicos del siglo XVIII encontraban tan difícil aceptar la existencia de meteoritos se debe a que no se tenía conocimiento de unos cuerpos tan pequeños en el sistema solar. Parecía haber tan sólo planetas y sus correspondientes satélites (y también los misteriosos cometas, de los que me ocuparé más adelante).

El cambio de criterio se inició con un astrónomo alemán, Johann Daniel Titius (1729-1796). En 1766 elaboró una fórmula para demostrar la relación de las distancias respectivas de los planetas al sol. Dio los siguientes números: 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100, 196, 388, etc. Supongamos que representamos la distancia de la Tierra al sol por el número 10. En este caso, la distancia de Mercurio al sol es alrededor de 3,88; la de Venus, de 7,23; la de Marte, de 15,23; la de Júpiter, de 52,0, y la de Saturno, de 95,5. En 1772, otro astrónomo alemán, mejor conocido, Johann Elert Bode (1747-1826), publicó esa serie numérica que, injustamente, fue llamada ley de Bode.

Con el tiempo, los astrónomos empezaron a darse cuenta de que no había planeta alguno en la posición 28 según la ley de Bode. ¿Debía haber un planeta allí? En caso afirmativo, ¿por qué nunca se había visto? Se hallaría a sólo el doble de la distancia de Marte desde la Tierra, y a sólo dos quintas partes de la distancia de Júpiter desde la Tierra. Aun en el caso de que este planeta de la posición 28 no fuese mayor que Marte (que únicamente posee un poco más de la mitad del diámetro de la Tierra), debía resultar fácilmente visible. La única posibilidad de que tal planeta existiese y no pudiera observarse era que su tamaño fuese muy inferior al de Marte.

El astrónomo alemán Heinrich W. M. Olbers (1758-1840) empezó a organizar un proyecto astronómico en la década de 1790, en el cual cada uno de un grupo de astrónomos se encargaría de una parte concreta del cielo, y buscaría en ella cuidadosamente la posible existencia de un planeta, cuya órbita se hallaría entre las de Marte y Júpiter. Antes de que pudieran comenzar sus tareas, el astrónomo italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826) hizo el descubrimiento el 1 de enero de 1801. No lo andaba buscando, pero se encontró con una «estrella» que cambiaba de posición de una noche a otra, de modo que no podía ser una estrella ordinaria. Por la velocidad de su desplazamiento, parecía tratarse del planeta perdido entre Marte y Júpiter. Como Piazzi era siciliano, llamó al nuevo planeta Ceres, la diosa de la agricultura que, en otro tiempo, fue venerada en Sicilia.

Ceres es, en efecto, un pequeño planeta de sólo 1000 km de diámetro, menos de la mitad del de la luna.

Pero Olbers encontró difícil que eso era todo cuanto había en el espacio entre Marte y Júpiter, y prosiguió su investigación tal como la había planeado. En el transcurso de los años inmediatamente posteriores, se descubrieron en aquel espacio otros tres cuerpos similares, aún más pequeños que Ceres, y fueron bautizados con los nombres de Pallas, Vesta y Juno.

El astrónomo germanobritánico William Herschel (1738-1822) señaló que los nuevos cuerpos eran tan pequeños que aparecían como simples puntos de luz en el telescopio, al igual que las estrellas, y que no presentaban una forma esférica visible como los grandes planetas. Por ello sugirió que se les llamara asteroides (esto es, semejantes a estrellas), y esa denominación prosperó.

Desde el hallazgo de Piazzi, se han descubierto asteroides en elevadísimo número: se conocen más de 3000 y, sin duda, hay muchos millares más por identificar. Ceres sigue siendo el mayor, y por sí solo representa casi el 10% de la masa total de los asteroides. El espacio entre las órbitas de Marte y Júpiter se conoce ahora como «cinturón de asteroides», y es una región que sin duda

recuerda vagamente lo que debió de ser el sistema solar antes de que los planetas estuvieran plenamente formados.

¿Por qué están allí los asteroides? Olbers fue el primero en sugerir que eran los restos de un planeta que estalló. Ésta es una idea atractiva, pero ignoramos cómo o por qué habría de estallar un planeta. Hoy día los astrónomos creen que el material del cinturón de asteroides sencillamente no pudo llegar a condensarse para formar un planeta. Júpiter, un planeta gigante, pudo haber absorbido tantos materiales del cinturón de asteroides, que lo que restó no logró constituir un planeta de un mínimo tamaño. Además, la fuerza gravitatoria de Júpiter pudo muy bien haber evitado que los asteroides se unieran.

48. ¿Sólo hay asteroides entre Marte y Júpiter?

Hay miles y miles de asteroides, la mayor parte de ellos muy pequeños, incluso insignificantes. En primer lugar, aun en el caso de que todos estuvieran en el cinturón, no tendrían por qué permanecer necesariamente allí. A medida que los asteroides orbitan en torno al sol, se ven afectados por la fuerza gravitatoria de otros planetas, en particular por el gigante Júpiter. Algunos podrían ser desviados fuera del sistema solar después de atravesar la órbita de Júpiter, mientras que otros, al traspasar la de Marte, podrían sufrir el fenómeno inverso y ser atraídos hacia el interior del sistema. Cuanto más lejana sea la trayectoria de los asteroides, más difícil resulta su observación y estudio, y por esta razón no es mucho lo que sabemos acerca de los más distantes. Por otra parte, los que se nos aproximan más acá de Marte se ven y se investigan mejor, pero, como resulta fácil de comprender, son también más peligrosos.

En 1898, el astrónomo alemán Gustav Witt descubrió un asteroide cuya órbita se cruzaba con la de Marte, y le puso el nombre de Eros. (A los asteroides suelen dárselos nombres femeninos, pero los que describen órbitas peculiares los reciben masculinos). Cuando Eros y la Tierra se hallan en los lugares adecuados en sus respectivas órbitas, están separados por sólo 22,5 millones de kilómetros, sólo un poco más de la mitad de la distancia de la mayor aproximación al planeta Venus. Así pues, Eros era el objeto astronómico de los entonces conocidos que más se acercaba a la Tierra, aparte de la luna. En 1931 pasó a 26 millones de kilómetros.

Esa distancia nos mantiene a salvo. En efecto, resulta extremadamente improbable que su órbita llegue a cambiar hasta el punto de que colisione con nosotros, lo cual es una ventaja dado que su diámetro medio es de unos 16 km. Una colisión con Eros no significaría grandes daños para la Tierra en sí, pero resultaría catastrófica para la vida en nuestro planeta.

Sin embargo, Eros no es el único asteroide de su clase. Desde 1898 se han descubierto muchos de ellos (en su mayor parte de 1 o 2 km de diámetro) que pueden acercarse a la Tierra aún más que Eros: por lo menos se conocen cincuenta, y cada año se descubren algunos más.

Los meteoritos, de los que me he ocupado con anterioridad, constituyen ejemplos de minúsculos asteroides errantes. No causan muchos daños, pero tarde o temprano uno de los de gran tamaño está destinado a caer sobre la Tierra. En realidad, de acuerdo con algunas estimaciones, se registra una de esas colisiones catastróficas cada cien millones de años como promedio. De ser así, desde que existe vida en la Tierra ha tenido que haber treinta de esas colisiones. Cinco o seis de ellas se habrán producido cuando ya existían formas complejas de vida en la tierra y en el mar. ¿Queda algún rastro de esas colisiones?

Hace unos 65 millones de años, se produjo algún tipo de cambio en la Tierra que causó la súbita desaparición de su faz de los dinosaurios, así como de otras clases de plantas y animales grandes y pequeños. Hasta 1980 nadie estuvo completamente seguro de lo que había sucedido. Se formularon numerosas teorías, pero ninguna resultaba convincente. Pero en dicho año, el científico norteamericano Walter Alvarez se dedicaba a analizar con gran cuidado estratos de rocas de 65 millones de años de antigüedad. Encontró que eran veinticinco veces más ricas en iridio, un metal raro, que los estratos un poco más antiguos o más modernos. Algo había aportado iridio a la roca coincidiendo con la desaparición de los dinosaurios. Y el fenómeno no se daba solamente en el lugar donde trabajaba Alvarez, sino que un enriquecimiento similar en

iridio se halló en rocas de la misma edad repartidas por todo el mundo.

¿Qué había sucedido? Alvarez argumentó que el iridio es mucho más común en los meteoritos que en la corteza terrestre. (En la Tierra, la mayor parte del iridio se concentra en el núcleo de hierro). Parecía, pues, que se había producido una colisión particularmente fuerte hace 65 millones de años, que evaporó el meteorito junto con kilómetros cúbicos de corteza terrestre, debido al enorme calor generado por el impacto. Grandes cantidades de polvo se elevaron a la alta atmósfera, impidiendo el paso de la luz solar durante un prolongado período, y dando lugar a un invierno artificialmente largo que acabó con muchas formas de vida. También pudo haber causado terremotos, erupciones volcánicas, lluvias torrenciales, incendios forestales de gran extensión, etc. La mayor parte de las formas de vida, en especial los animales grandes, desaparecieron. En cambio, las formas menores o, en todo caso, las más afortunadas, lograron sobrevivir e iniciar una nueva etapa de su existencia.

Hay signos de que eso ha venido sucediendo periódicamente a lo largo de la historia de la Tierra. De vez en cuando acaece una gran extinción que aniquila buena parte de la vida del planeta. Es posible que este fenómeno desempeñe un importante papel en la evolución, pues da a nuevas formas de vida una oportunidad de desarrollarse y expandirse. Por ejemplo, los mamíferos existían desde hacía decenas de millones de años antes de la última «gran extinción», pero no podían competir con los gigantescos dinosaurios; mantenían, en efecto, su tamaño reducido y carecían de importancia. Sólo después de que el impacto del meteoro eliminara a los dinosaurios, los pequeños mamíferos tuvieron la oportunidad de protagonizar una evolución explosiva y desarrollar las numerosas formas avanzadas que existen en nuestros días, incluyéndonos a nosotros.

Si en el futuro se produce otra colisión como la reseñada, y si antes no hemos conseguido borrarlos nosotros mismos de la faz de

la Tierra, toda vida humana podría ser destruida, dejando tal vez el planeta a disposición de alguna otra forma de vida que iniciara una nueva etapa. Hasta el momento, ninguna colisión ha sido tan catastrófica como para dejar la Tierra por completo yerma, pero no podemos descartar del todo esa terrible posibilidad.

49. ¿Qué son los cometas?

Además de los asteroides y los meteoritos, existen otros objetos que pueden aproximarse a la Tierra: los cometas. Podría darse el caso de que la gran extinción de los dinosaurios hace 65 millones de años se debiera a una colisión con un cometa y no con un asteroide. Pudo haberse tratado también de un fragmento de cometa, y no de un meteorito, lo que produjo la explosión en Siberia central en 1908. ¿Qué es, pues, un cometa?

Los cometas resultan mucho más visibles que los meteoritos. No son luces fugaces que duran cuestión de segundos, sino objetos de forma incierta, en ocasiones de gran tamaño, que permanecen en el cielo durante semanas. En el pasado se les temía. Mientras estrellas y planetas eran predecibles, los cometas parecían objetos temporales que provenían de la nada, cruzaban el firmamento durante varias noches y finalmente desaparecían. Si los hombres creían que los planetas marcaban unas pautas conforme se desplazaban a través del cielo, pautas que permitían predecir el futuro, necesariamente debían aceptar que un cometa era una especie de mensaje repentino, como la advertencia de una divinidad airada.

Se creía, en efecto, que un cometa era un mensajero de malas nuevas, más que de buenas, y eso parecía confirmarlo la propia apariencia del cometa. Consistía en una neblinosa bola de luz provista de una larga y también luminosa cola que le nacía de uno de sus lados. Las gentes de fértil imaginación creían que esa forma representaba una mujer afligida gritando sus lamentos a través del cielo, con su cabellera suelta flotando tras ella (en efecto, la palabra

cometa proviene de la griega que significa cabellera). Otros veían en aquel cuerpo celeste una espada. Pero tanto en uno como en otro caso se interpretaba como muerte y desastre, y parecía confirmarlo el hecho de que cada vez que aparecía un cometa, se producía una catástrofe. Naturalmente, la catástrofe sobrevinía también cada vez que no aparecían cometas, pero la gente no se daba cuenta de eso.

Algunos hombres antiguos trataron de considerar racionalmente esos objetos. Dado que Aristóteles creía que los cielos eran perfectos e inmutables, no había lugar en ellos para objetos cambiantes y temporales como los cometas. Esto le llevó a creer que eran simples gases llameantes en la alta atmósfera terrestre, algo parecido a los fuegos fatuos que en ocasiones se producen en las zonas pantanosas. Esta teoría era incorrecta, pero al menos se trataba de una interpretación sensata. Con ella, sin embargo, no convenció al público en general para que abandonara sus alocados temores. (Todavía en el siglo xx hay personas a las que asustan los cometas, de la misma manera que aún hay quien sigue creyendo que la Tierra es plana. Pero como en nuestro siglo no se ha visto un cometa realmente espectacular desde 1910, aquellos temores no han tenido oportunidad de manifestarse).

El primer científico que estudió desapasionadamente un cometa fue el astrónomo alemán Regiomontano (1436-1476), quien observó un cometa que apareció en el cielo en 1473, y fue anotando su posición noche tras noche. En 1540 otro astrónomo alemán, Petrus Apianus (1495-1552), publicó un libro en el que describía cinco cometas distintos. En el texto señalaba que en cada caso la cola apuntaba en dirección contraria al sol. Ésta fue la primera observación científica realizada sobre un cometa, aparte de su posición en el cielo.

En 1577, Tycho Brahe trató de determinar el paralaje de un cometa brillante que apareció ese año, pero se mostró incapaz de lograrlo. Su paralaje no era lo bastante pronunciado como para ser medido, a diferencia de lo que sucedía con la luna, lo cual significaba que el cometa se hallaba más lejos que la luna.

Aristóteles estaba, pues, equivocado: los cometas no había que situarlos en la atmósfera terrestre, sino en la lejanía del espacio.

Una vez Newton hubo formulado su ley de la gravitación, parecía natural suponer que era aplicable a los cometas lo mismo que a cualquier otro objeto en el espacio. Los cometas debían experimentar la atracción gravitatoria del sol, y habían de girar en torno a él. El único problema radicaba en que mientras los planetas ordinarios describían elipses que eran casi círculos, los cometas parecían recorrer órbitas muy alargadas. Tal vez penetraban en el sistema solar una sola vez, rodeaban el sol y se alejaban para nunca más regresar.

El científico inglés Edmund Halley (1656-1742), amigo de Newton, zanjó el problema. Estudió las observaciones anteriores de cometas, y descubrió que los de 1456, 1531 y 1607 seguían idéntico recorrido a través del firmamento que el cometa de 1682 que él mismo observó. Se le ocurrió entonces que se trataba del mismo cometa que recorría una y otra vez aquella parte de su muy alargada órbita, que lo aproximaba al sol y a la Tierra cada 75-76 años.

Halley predijo que ese mismo cometa regresaría en 1758. Él ya no vivió para verlo, pero en efecto su predicción se cumplió casi con toda exactitud: el retorno se produjo a comienzos de 1759. Desde entonces a ese cometa se le ha dado el nombre de Halley. Su más reciente aparición en el firmamento terrestre tuvo efecto en 1986, pero no pasó particularmente cerca de nuestro planeta y ofreció por ello un pobre espectáculo. El descubrimiento de Halley despojó a los cometas de buena parte del misterio que los envolvía, y durante varias décadas los astrónomos compitieron por descubrir nuevos cometas y determinar sus órbitas.

50. ¿Por qué los cometas se ven borrosos?

Aun después de que los cometas se revelaran como objetos ordinarios del sistema solar, sujetos a la ley de la gravitación, siguieron conservando su misterio. Otros objetos del sistema solar eran cuerpos sólidos con perfiles definidos y desprovistos de cola, en tanto los cometas presentaban unos contornos imprecisos y tenían cola. La mayor parte de los cuerpos pequeños del sistema solar, como Mercurio, la luna, los asteroides y casi todos los satélites, son masas de materia sólida y sin atmósfera, y naturalmente tienen un perfil nítido, como lo tendría una roca o un pedazo de metal en la Tierra. Los planetas gigantes poseen atmósfera, como la Tierra, Venus, Marte e incluso un par de grandes satélites. Estas envolturas gaseosas están firmemente adheridas al objeto por la fuerza de la gravedad, y por tanto no interfieren la observación del bien definido reborde del cuerpo sólido del planeta, o bien forman capas de nubes que a su vez presentan rebordes definidos.

Los cometas son distintos de cualquiera de esos cuerpos porque poseen una estructura química diferente. (En este punto podría usted preguntar cómo pueden precisar los astrónomos la estructura química de un objeto lejano, pero de este tema nos ocuparemos más adelante). Aunque los cometas son objetos pequeños, como los asteroides, no están compuestos de roca y metal, sino de sustancias volátiles (es decir, que se funden con facilidad), que en la Tierra serían ordinariamente líquidos o gases, pero que se enfrían hasta solidificarse a baja temperatura. El más común de esos cuerpos volátiles es la propia agua, tanto en la Tierra como en los

cometas. En estos últimos existe como hielo sólido. Otros volátiles, como el amoníaco y el cianógeno, pueden solidificarse y presentar un aspecto semejante al del hielo. De ahí que se les clasifique conjuntamente como hielos.

Los cometas están formados de hielos mezclados con fragmentos de roca y metal, y posiblemente tienen un núcleo de roca. Esta estructura fue establecida en 1949 por el astrónomo norteamericano Fred Whipple (n. en 1911), quien definió los cometas como «bolas de nieve sucia». En tanto esos objetos permanecen lejos del sol, son sólidos y presentan un contorno definido como los asteroides, si bien se hallan tan lejos de nosotros que no podemos observarlos ni estudiarlos. A medida que se aproximan al sol, el calor de este último evapora una parte del hielo y libera algo del polvo de roca que contienen. El núcleo sólido queda entonces rodeado por una nube de gas y polvo. Las partículas de polvo reflejan la luz del sol, y envuelven el cometa con un halo luminoso, la coma, que le confiere una apariencia borrosa.

Del sol emergen siempre en todas direcciones partículas cargadas eléctricamente, un fenómeno que se conoce como viento solar. Desde luego que se trata de un viento muy débil, pero tiene la fuerza suficiente como para apartar la nube de polvo y gas del cometa, de manera que se forma una larga y luminosa cola que siempre se orienta en dirección contraria al sol.

51. ¿Qué ocurre con los cometas?

Un cometa no es un objeto permanente en el sentido en que lo es la Tierra o un asteroide. Cuando un cometa viaja en torno al sol, y se evapora parcialmente, esa parte evaporada jamás se recupera. La pregunta que se suscita acaso sea por qué el cometa no se evapora del todo y desaparece en el ígneo abrazo solar. Lo cierto es que ocurriría precisamente eso si el cometa permaneciera demasiado tiempo en la vecindad del sol, pero pasa a gran velocidad y se aleja antes de que la evaporación le afecte de manera significativa.

A medida que el hielo se evapora, deja atrás algo del polvo de roca que forma la corteza de la superficie del cometa. Las sondas enviadas a las proximidades del cometa Halley en 1986 demostraron que su superficie estaba ennegrecida por el polvo de roca. Esta corteza rocosa actúa en cierto modo como aislante, restringiendo la evaporación.

Sin embargo, algo de materia del cometa se pierde cada vez que pasa por las inmediaciones del sol, por lo que estos cuerpos tienen una existencia temporal. Incluso los de mayor tamaño desaparecen al cabo de unos cientos o acaso miles de pasos cerca del sol. Los astrónomos han observado algunos cometas pequeños caer en el sol y desvanecerse para siempre, y otros, disgregarse y acabar también desapareciendo. Algunos cometas dejan tras ellos un núcleo de roca que no se diferencia en absoluto de un asteroide. Otros dejan fantasmas de sí mismos. Mientras los gases se evaporan y se dispersan por el espacio, el polvo liberado por la evaporación continúa recorriendo la órbita cometaria, extendiéndose

y disminuyendo, pero presentando mayor densidad en el punto donde solía estar el cometa.

El 13 de noviembre de 1833 colisionaron la Tierra y la nube principal de polvo de un cometa muerto. Por supuesto que no produjo el menor daño, pero brindó un espectáculo maravilloso, pues en los cielos de Nueva Inglaterra parecía que se estaba quemando un castillo de fuegos artificiales. Un número incontable de partículas de polvo penetró en la atmósfera, adquiriendo el aspecto de copos de nieve luminosa que, sin embargo, nunca alcanzaban el suelo. A los consternados observadores les pareció que todas las estrellas del cielo estaban cayendo, y como según el Apocalipsis ésa era una señal del Día del Juicio, muchos debieron creer en la inminencia del fin del mundo. Pero al día siguiente el sol salió como siempre, y llegada la noche, todas las estrellas continuaban en el cielo.

Varias veces al año el número de meteoritos es superior al usual, pero el despliegue de 1833 nunca se ha repetido, aunque contribuyó a estimular el estudio de esos cuerpos.

52. ¿De dónde provienen los cometas?

Si los cometas tienen una vida corta, si tienden a fragmentarse y a desaparecer dejando tras de sí solamente un núcleo de roca o algo de polvo, ¿por qué siguen describiendo sus órbitas? ¿Por qué no han desaparecido todos en el transcurso de los 4600 millones de años de antigüedad del sistema solar?

Si pensamos en ello, parece haber tan sólo dos respuestas posibles: o se forman nuevos cometas con la misma rapidez que desaparecen los antiguos, o hay tantos cometas que ni siquiera en el transcurso de 4600 millones de años se han desgastado todos. La primera posibilidad no parece muy verosímil, pues a los astrónomos no se les ocurre ninguna manera de que aún se sigan formando nuevos cometas.

Eso nos conduce a la otra alternativa. En 1950, el astrónomo holandés Jan Hendrik Oort (1900-1992) sugirió que cuando se formó el sistema solar, las partes más externas de la extensa nube de polvo y gas que se condensó para constituir aquél no estaban lo bastante sujetas por la fuerza de la gravedad del interior, tan alejado ya, como para condensarse a su vez. Así pues, mientras las regiones interiores se condensaban, las periféricas permanecían en su lugar y experimentaron condensaciones menores, al menos en 100 000 millones de fragmentos de materia helada. Esta nube, localizada mucho más allá de los planetas pero sometida aún a la atracción gravitatoria del distante sol, se llama nube de Oort en honor de aquel astrónomo. Nadie ha visto jamás esa nube ni se ha detectado de ninguna manera su presencia, pero hoy por hoy es la única explicación posible de la existencia de los cometas.

Al parecer, los cometas en esta amplia nube se mueven constante aunque lentamente, describiendo amplias órbitas alrededor del sol que tardan en completar muchos millones de años. Pero de vez en cuando, debido a la colisión de dos cometas o a causa de la fuerza gravitatoria de las estrellas más cercanas, el movimiento de un cometa cambia. Puede acelerarse, en cuyo caso su órbita se expande alejándose aún más del sol, o bien abandona para siempre el sistema solar. También puede frenar su velocidad, y caer hacia los planetas interiores del sistema solar y pasar cerca del sol, y entonces podría aparecer en el firmamento terrestre como un magnífico espectáculo, y puesto que se atiene a su nueva órbita (excepto cuando ésta la modifica la atracción planetaria), con el tiempo se evapora y muere.

Oort estima que desde que existe el sistema solar, una quinta parte de todos los cometas han sido desviados del sistema solar o han caído en el interior del sistema y se han evaporado. Lo cual significa que aún quedan las cuatro quintas partes del número original de cometas, y por tanto hay una notable reserva de ellos.

53. ¿A qué distancia está el sol?

He mencionado las distancias de los planetas en relación con el descubrimiento de los asteroides. En la época de ese descubrimiento, tales distancias eran conocidas. Pero durante más de dieciocho siglos después de que Hiparco determinara la distancia de la luna, ésta seguía siendo la única distancia conocida, porque sencillamente no había manera de medir el paralaje de ningún otro objeto situado más lejos.

El astrónomo griego Aristarco (h. 310-h. 230 a. C.), según ya he explicado anteriormente, hizo una tentativa para determinar la distancia del sol sin recurrir al paralaje. Su método, desarrollado en 270 a. C., era perfectamente correcto en teoría, pero su autor no tenía forma de determinar con exactitud los ángulos del cielo, y por ello no pudo corroborar sus suposiciones. Zanjó el asunto situando el sol a unos ocho millones de kilómetros de la Tierra y atribuyéndole un diámetro siete veces superior al de nuestro planeta.

Fue una subestimación grave, pero bastó para inducir a Aristarco a creer que la Tierra giraba alrededor del sol, y no viceversa. Pero nadie tomó en serio ni sus cifras ni su conclusión.

En el siglo XVII, tras el descubrimiento del telescopio, fue posible determinar la posición de un objeto celeste con mucha más exactitud (en especial después de que se colocaran unas coordenadas junto a la lente). Esto significó que un leve desplazamiento en la posición de un objeto, un mínimo paralaje, imposible de medir a simple vista, podía medirse con el telescopio. Desde luego que ésta sería una tarea pesada, pues resultaría casi

imposible determinar la posición del borde luminoso. En especial porque no hay estrellas visibles en el cielo cuando luce el sol, cuya posición pudiera fijarse en relación con aquéllas.

En cambio podía establecerse el paralaje de cualquier planeta. Gracias al modelo de sistema solar elaborado por Kepler, que en nuestros días sigue considerándose correcto, la distancia de cualquier planeta en cualquier posición a lo largo de su trayectoria alrededor del sol puede utilizarse para calcular las distancias de los planetas entre sí y de cada uno de ellos con respecto al sol y a la Tierra. Y esta información podría emplearse para calcular la distancia de la Tierra al sol.

En 1672, el astrónomo francoitaliano Gian Domenico Cassini observó la posición exacta de Marte en el cielo de París. Al mismo tiempo, en la lejana Guayana francesa, otro astrónomo francés, Jean Richer (1630-1696), midió la posición de Marte en aquellos cielos. Ambas posiciones eran ligeramente distintas en relación con las estrellas vecinas. Sabiendo la distancia entre París y la Guayana francesa (en línea recta, sin contar el ensanchamiento de la Tierra) y el valor del paralaje, los astrónomos calcularon la distancia de Marte desde la Tierra, así como las distancias de los demás cuerpos del sistema solar. Las distancias que Cassini determinó de esta manera pecaban por defecto en un 7%, pero obtuvo unos excelentes resultados para tratarse de un primer intento, y con el tiempo serían perfeccionados. Sabemos ahora que el sol no está a menos de 150 millones de km de la Tierra, distancia que equivale a unas 400 veces la que nos separa de la luna.

Para que el sol presente el tamaño que apreciamos en el cielo, pese a la gran distancia a que se halla, ha de tener 1 400 000 km de diámetro, o sea que ha de ser 109 veces más ancho que la Tierra. Un gran tamaño, sin duda. Ello significaba que lo más sensato era imaginar que la Tierra giraba en torno al enorme sol y no viceversa.

Además, la medición de Cassini (con perfeccionamientos modernos) demostró que Saturno, el planeta más lejano conocido en su tiempo, se encontraba a 1427 millones de km del sol, esto es,

9,5 veces la distancia de la Tierra al sol. El diámetro máximo de la órbita de Saturno superaba los 2800 millones de km. De este modo, en 1672 los astrónomos se hicieron una idea, por vez primera en la historia, de la magnitud del sistema solar. Su tamaño excedía los más disparatados sueños de Aristarco e Hiparco, y en los tres siglos siguientes, como ya explicaremos, el universo ha resultado ser cada vez mayor, reduciendo el imaginado por Cassini a un punto casi invisible.

54. ¿Es grande la Tierra?

Hasta el siglo XVII a nadie se le hubiera ocurrido formular esta pregunta, pues la respuesta parecía obvia. Desde luego que la Tierra es grande. Para los antiguos, en efecto, la Tierra era lo más vasto que existía en el universo material, pues todos los demás cuerpos se consideraban pequeños objetos adheridos al cielo o a la «cáscara» interior del mismo. Incluso cuando se estableció por vez primera el tamaño de la luna, resultó ser significativamente inferior a la Tierra, y la creencia generalizada en la época fue que todos los objetos celestes eran menores que la Tierra.

Una vez Cassini hubo calculado el tamaño del sistema solar, el orgullo humano se vio sacudido, pues al menos en términos de tamaño la Tierra era bien poca cosa. Estaba claro que comparada con el sol era realmente un cuerpo muy pequeño. Pero el sol podía considerarse una excepción. Después de todo, es el cuerpo central alrededor del cual giran todos los planetas, de modo que ha de ser de un tamaño impresionante. La pregunta se refería ahora al tamaño de la Tierra comparado con el de los demás planetas del sistema solar.

A partir de las distancias de cada cuerpo y de sus diámetros aparentes en el cielo, pudieron estimarse los diámetros reales. De los planetas interiores, la Tierra es el mayor: Venus es ligeramente inferior a ella, mientras que Marte, Mercurio y la luna son, cada uno, considerablemente más pequeños. Todos los satélites de los diversos planetas son mucho menores que la Tierra, y lo mismo puede predicarse de asteroides y cometas.

De hecho, si queremos encontrar en el sistema planetario cuerpos que sean mayores que la Tierra, hemos de volvernos hacia Júpiter y Saturno. Y ahí es donde la diferencia resulta espectacular. Una vez conocidas las distancias de los planetas, el diámetro aparente de Júpiter permitió calcular el real, que resultó ser de 143 200 km, o sea, 11,2 veces el de la Tierra. Saturno era casi tan grande, con un diámetro de 120 000 km. Se trataba de planetas gigantes, que hacían aparecer la Tierra insignificante por comparación.

Eso significó otro rudo golpe a la autoestima humana. La Tierra no sólo no era el centro del universo, y no sólo el sol era enormemente mayor que ella, sino que incluso dos planetas la hacían aparecer como una enana. Naturalmente no tenemos por qué juzgar la importancia de un mundo sólo por su tamaño, pero lo cierto es que esa pequeñez no fue fácil de asumir.

Tampoco podía argumentarse que Júpiter y Saturno eran grandes pero irrelevantes. Cada uno de ellos poseía satélites que orbitaban a su alrededor a distancias y en períodos conocidos. Cuanto más aprisa gira un satélite en torno a un planeta a una distancia dada, más fuerte es la gravedad que éste deja sentir, y en consecuencia mayor es su masa. Comparando el movimiento de los satélites en torno a Júpiter y Saturno con el de la luna alrededor de la Tierra, resulta que Júpiter tiene una masa 317 veces superior a la de la Tierra, y Saturno, 95,2 veces.

Aun así, las masas de Júpiter y Saturno no son tan elevadas como cabría esperar por su tamaño. Si dividimos la masa de cada uno por su volumen, resulta que la densidad media de Júpiter es de 1,33 g por cm³, lo que equivale a menos de la cuarta parte de la densidad de la Tierra. Saturno aún es menos denso: 0,71 g por cm³, alrededor de una octava parte de la densidad de nuestro planeta y, por tanto, inferior a la del agua, lo cual significa que la composición de Júpiter y Saturno debe ser muy diferente de la terrestre, punto éste al cual volveremos.

55. ¿Existen planetas que los antiguos desconocían?

Los asteroides, a los que ya me he referido, pueden ser pequeños, pero se trata de planetas que giran en torno al sol, y nadie conocía su existencia antes de 1801. Podemos, pues, replantear la pregunta en los siguientes términos: ¿existe algún planeta de gran tamaño que los antiguos desconocían?

Hasta avanzado el siglo XVIII había otra pregunta que, al parecer, ninguna persona sensata formularía. Las siete «estrellas errantes» —el sol, la luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno— eran conocidas desde tiempos de los sumerios, en 3000 a. C. Durante los 4700 años siguientes no se observaron más objetos que erraran entre las estrellas (con la excepción de los cometas). ¿Cómo podía haber aún planetas por descubrir? Puesto que todos los conocidos eran brillantes e inconfundibles, si hubiera otros presentarían sin duda idénticas características, y se hubiesen identificado con facilidad. De donde cabía concluir que no había ningún planeta más.

Los planetas no son objetos brillantes, con luz propia, como se creía desde tiempo de los sumerios. Los antiguos griegos, estudiando las fases de la luna, descubrieron en primer lugar que ésta era un cuerpo sin luz propia. Más adelante, el telescopio reveló que Mercurio y Venus presentaban fases, y que por tanto eran también cuerpos sin luz propia. De este modo se aceptó que todos los planetas carecían de ella y que sólo brillaban porque reflejaban la luz del sol.

En este caso, cuanto más lejos estuviera un planeta del sol y más pequeño fuese, menos luz solar recibiría, menos reflejaría y

más apagado aparecería en el cielo. Si hubiese otros planetas más allá de Saturno y fueran mucho menores que él, resplandecerían tan débilmente que es probable que los desecharan los astrónomos, quienes atribuían brillo a todos los planetas. Por otra parte, cuanto más lejos del sol está un planeta, más despacio recorre su órbita, de modo que su tránsito sobre el fondo estrellado podría pasar inadvertido.

Todo lo anterior resulta perfectamente claro si se considera de manera retrospectiva, pero los astrónomos, incluso cuando ya empleaban telescopios, estaban tan imbuidos de la idea de que todos los planetas brillaban, que nunca se les ocurrió buscar uno que fuera apagado, y desecharon esa posibilidad.

Cuando finalmente fue descubierto un planeta en 1781, el hallazgo se hizo por casualidad. William Herschel (quien acuñó el término asteroide) era músico profesional y se interesó por la astronomía como pasatiempo. Trató de adquirir un telescopio, pero consideró que los que estaban a su alcance no eran muy buenos, por lo que se construyó uno él mismo. Y resultó ser mejor que cualquier otro en existencia. Con este telescopio de fabricación casera dio con un objeto en el firmamento que semejaba un pequeño disco luminoso, lo mismo que los planetas. Al principio no se le ocurrió que pudiera ser un planeta y supuso que se trataba de un cometa. Pero los cometas se ven borrosos, tienen un contorno irregular, y el nuevo objeto se movía más despacio que Saturno contra el cielo estrellado, lo que indicaba que se hallaba más lejos que ese planeta. En efecto, se trataba también de un planeta, y se le llamó Urano. Se hallaba a doble distancia del sol que Saturno —a 2870 millones de km— y era tan apagado que apenas resultaba perceptible a simple vista.

Desde entonces se han descubierto dos planetas más alejados aún del sol que el propio Urano. Tan alejados, en efecto, que no brillan lo bastante como para ser vistos, y no hubieran podido descubrirse de ningún modo antes de la invención del telescopio. El planeta situado inmediatamente después de Urano fue descubierto

en 1846 y bautizado como Neptuno, y un planeta pequeño más allá de Neptuno, localizado en 1930, se llamó Plutón. El diámetro mayor de la órbita de este último mide casi 12 000 millones de km, de modo que en comparación con los tiempos anteriores a Herschel, cuando se consideraba que Saturno era el planeta más lejano, los nuevos planetas habían casi cuadruplicado el tamaño atribuido al sistema planetario.

Urano y Neptuno son planetas gigantes, aunque Júpiter y Saturno los aventajan en tamaño. Sus diámetros miden alrededor de 50 000 km, más de tres veces y media el de la Tierra. La masa de Urano es unas quince veces mayor que la terrestre, y la de Neptuno, unas diecisiete veces. Sus densidades equivalen poco más o menos a la de Júpiter. Así pues, queda de manifiesto que la Tierra es tan sólo el sexto objeto en tamaño del sistema solar tal como hoy se conoce. El sol y los cuatro planetas Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son considerablemente mayores. Los astrónomos siguen buscando otro planeta grande situado más allá de Neptuno (Plutón es tan pequeño que apenas cuenta), pero hasta el momento no lo han hallado.

En agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional (UAI) acordó una nueva clasificación de los planetas y sus cuerpos en el sistema solar:

- Planeta: *cuerpo celeste que está en órbita alrededor del Sol, que tiene suficiente masa para tener gravedad propia para superar las fuerzas rígidas de un cuerpo de manera que asuma una forma equilibrada hidrostática, es decir, redonda, y que ha despejado las inmediaciones de su órbita.*
- Planeta enano: *planeta que no ha despejado las inmediaciones de su órbita y que no es un satélite. Plutón fue clasificado en esta categoría.*
- Cuerpos pequeños del sistema solar: *todos los demás objetos que orbitan alrededor del Sol.*

Con ello, el sistema solar ha pasado a estar formado por ocho planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

56. ¿En qué sentido son diferentes los planetas gigantes?

Los cuatro grandes planetas exteriores son diferentes en muchos sentidos respecto de la Tierra y de los mundos más familiares de la parte interior del sistema solar. Por ejemplo, tienen una densidad baja, lo que significa que están constituidos por materiales enteramente distintos de los terrestres, como ya explicaremos más adelante. Todos poseen amplias y profundas atmósferas con capas de nubes permanentes, que nosotros vemos como si fueran la superficie de esos planetas (no distinguimos una superficie sólida).

Por ser el más cercano al sol, Júpiter dispone de la mayor cantidad de energía procedente de aquél, de manera que su atmósfera se agita con enormes tempestades. La más importante es lo que parece una turbulencia permanente, de un tamaño superior al de la Tierra, llamada Gran Mancha Roja debido a su color. Fue observada por vez primera en 1664 por el científico inglés Robert Hooke (1635-1703).

En 1989 la NASA lanzó a Júpiter la sonda Galileo, con el objetivo de estudiar el planeta y sus satélites. Llegó a Júpiter en 1995 y finalizó su misión en 2003. Galileo fue la primera sonda en navegar por la atmósfera de un planeta gigante y aportó valiosos datos sobre su composición.

Por otra parte, en 1997 se lanzó hacia Saturno y sus satélites la misión Cassini-Huygens, un proyecto conjunto de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA). En el año 2001, a su paso por Júpiter, obtuvo imágenes de las tormentas que se generan en el

planeta, y aportó datos que parecen concluir que la Gran Mancha Roja sería una enorme tormenta.

Saturno y Urano son más tranquilos que Júpiter, pero la sonda Voyager 2 reveló en 1989 que Neptuno, el más lejano de los cuatro gigantes, registraba vientos tan fuertes como los de Júpiter. Los científicos no están seguros de cuál sea la causa. También posee una Gran Mancha Roja, similar en forma y localización a la de Júpiter. (Este último planeta es en verdad el auténtico gigante, pues le corresponde el 70% de la masa total del sistema solar sin contar la del sol).

Todos los planetas gigantes cuentan con numerosos satélites. La mayoría de ellos son pequeñísimos, pero Júpiter tiene cuatro, que descubrió Galileo en 1610, cuyo tamaño equivale o supera el de la luna. Saturno tiene uno, Titán, descubierto en 1655 por Huygens. Neptuno también tiene uno, Tritón, descubierto en 1846 por el astrónomo británico William Lassell (1799-1880).

De los cuatro grandes planetas, Urano es el que presenta la rotación más extraña. Todos los planetas tienen ejes más o menos desplazados en relación con el plano de traslación en torno al sol. La Tierra, por ejemplo, está desviada aproximadamente una cuarta parte respecto a dicho plano, como también es el caso de Saturno y Neptuno. El eje de Júpiter apenas presenta desplazamiento. En cambio, Urano lo tiene tan desplazado, que este planeta parece girar ladeado. Completa una revolución alrededor del sol en 84 años: en un punto de su órbita, su Polo Norte se orienta casi directamente hacia el sol, y 42 años más tarde el que mira al sol es el Polo Sur. Cabe imaginar que a los planetas les imprimió esa posición ladeada una fuerza externa. Como se formaron a partir de planetésimos, y se daría el caso de que en la procedencia de éstos predominara una determinada dirección, sin duda los ejes de rotación se inclinaron por el impulso procedente de dicha dirección.

En el caso de Urano hubo de producirse una agregación insólitamente desequilibrada de los planetésimos finales, que

determinó su posición ladeada.

El mayor de los planetas gigantes es Saturno. Cuando Galileo enfocó hacia él por vez primera su pequeño telescopio, era el planeta más lejano conocido, por lo que no pudo observarlo muy bien. Aun así, le pareció que presentaba un abultamiento a cada lado. ¿Podía tratarse de un planeta triple? Esto no parecía tener mucho sentido, y en 1612 desistió de la observación. En 1614, el astrónomo alemán Christoph Scheiner (1575-1650), mirando Saturno a través de su telescopio, creyó que no había tal abultamiento a los lados, sino una media luna, como si el planeta tuviera un asa a cada lado, a la manera de una taza de consomé. El misterio no se disipó hasta 1665, cuando Huygens (el inventor del reloj de péndulo) dirigió la vista a Saturno y halló un anillo plano que lo rodeaba a la altura del ecuador, pero sin tocar la superficie. En 1675, Cassini (el primero que obtuvo el paralaje de Marte) se percató de la existencia de una marca oscura que parecía dividir el anillo en dos, uno dentro del otro. Esa marca se llama desde entonces división de Cassini.

Los anillos son brillantes, más que el globo de Saturno, y también son enormes. Lo rodean deparando la que, en opinión de muchos observadores, es la más sorprendente y bella imagen que puede obtenerse a través del telescopio. Desde el extremo exterior de los anillos en un lado de Saturno al extremo exterior del otro lado, la distancia es de 272 000 km. Se necesitarían 21,5 globos del tamaño de la Tierra para cubrir dicha distancia. Tienen una anchura doble que el planeta, aunque se trata de anillos delgados (a la manera de un disco gramofónico) y añaden poca masa a Saturno.

Pero ¿qué son esos anillos? ¿Son discos de materia sólida? En 1859, el matemático británico James Clerk Maxwell (1831-1879) demostró que si fueran sólidos, el efecto de marea de Saturno los atraería y repelería poderosamente y alternativamente, y acabaría rompiéndolos. Concluyó, pues, que consistían en partículas individuales, y que sólo parecían sólidas debido a la gran distancia, de la misma manera que la playa semeja una extensión de tierra

compacta, hasta que uno se acerca lo bastante como para comprobar que se compone de una acumulación de granos de arena.

Entonces, ¿por qué están allí los anillos?

En 1850, el astrónomo francés Édouard Roche (1820-1883) trató de determinar qué ocurriría si la luna girase por alguna razón más cerca de la Tierra. Llegó a la conclusión de que el efecto de marea de la Tierra se incrementaría en proporción inversa al cubo de la distancia de la luna, de tal manera que si ésta se hallara a sólo la mitad de su presente distancia, el efecto de marea terrestre sobre el satélite sería de 2^3 u ocho veces el actual. Si se encontrara a un tercio de su presente distancia, el efecto de marea terrestre sería 3^3 o 27 veces más fuerte que el actual.

Roche decidió que si la luna estuviera a una distancia de sólo 2,44 veces la longitud del radio de la Tierra, lo que hoy se llama límite de Roche, el efecto de marea sería lo bastante poderoso como para causar la fragmentación de la luna. Dado que el radio terrestre mide 6350 km, para que se hiciera pedazos la luna tendría que encontrarse a una distancia de 15 500 km del centro de la Tierra, lo que equivale aproximadamente a una veinticincoava parte de su distancia actual. (Desde luego que si estuviera tan cerca ejercería a su vez un fuerte efecto de marea sobre la Tierra; pero dado que esta última ejerce una atracción gravitatoria superior a la de la luna, ambos cuerpos difícilmente podrían permanecer próximos). Si en las inmediaciones de la Tierra existieran fragmentos de materia más acá del límite de Roche, el efecto de marea terrestre les impediría agregarse para formar un satélite grande como la luna.

El límite de Roche para Saturno equivale a 2,44 veces su radio, o sea 146 400 km. Los anillos de Saturno se encuentran enteramente dentro de ese límite, de modo que la materia que los constituye nunca podría reunirse para formar un satélite único y de tamaño apreciable. Cuanto menor es un objeto, menor es el efecto de marea a que está sujeto; de ahí que los satélites pequeños no se

hayan fragmentado y podamos hallar alguno dentro del límite de Roche de los planetas exteriores.

Durante años, los astrónomos se han preguntado por qué sólo Saturno tenía anillos. ¿Por qué no los tenían los otros planetas gigantes? En 1977 se descubrió que también Urano tenía anillos. Cuando Urano pasó frente a una estrella ese año, la luz de dicha estrella disminuyó en varias ocasiones antes de que el planeta se pusiera realmente a su altura, y resultó que había anillos de materia que la oscurecían. Pero son tan delgados, dispersos y oscuros, y reflejan tan poca luz, que no resultaban visibles con claridad desde la Tierra. En cambio, se percibieron con claridad cuando se enviaron sondas hacia los planetas gigantes y tomaron fotografías. También fue descubierto un anillo asimismo delgado en torno a Júpiter, y Neptuno resultó que poseía varios.

Según parece, todos los planetas gigantes tienen anillos, pero ¿son los de Saturno más anchos y brillantes que los demás? ¿Guarda esa particularidad alguna relación con la densidad de Saturno, extrañamente baja? Los astrónomos aún no lo saben.

La sonda Cassini llegó a Saturno en 2004, tras soltar la sonda Huygens en dirección a su objetivo, la luna Titán.

57. ¿Hay vida en Venus?

En las últimas décadas, hemos aprendido mucho acerca de los planetas, gracias en buena parte a las nuevas técnicas que emplean radioondas (a las que me referiré con mayor detalle más adelante) y sondas lanzadas mediante cohetes. Todo ello nos ha brindado unos conocimientos que antes no poseíamos y a los que no hubiéramos tenido acceso sin el auxilio de dichas técnicas.

En 1974 y 1975, por ejemplo, la sonda Mariner 10 viajó más allá de Mercurio en tres ocasiones, tomando fotografías en cada una de ellas. Al pasar por tercera vez, se aproximó a 327 km de la superficie de Mercurio. Las fotografías de este planeta revelaron un paisaje muy parecido al lunar, con cráteres por doquier. Sólo se fotografiaron las tres octavas partes de la superficie de Mercurio, y en esa región el cráter más ancho medía unos 200 km de diámetro.

Con anterioridad se había creído que Mercurio efectuaba una rotación cada 88 días, y que tardaba otro tanto en trasladarse alrededor del sol, con lo cual siempre presentaba a éste la misma cara. Pero resulta que el período de rotación es de 59 días, y que cumple tres rotaciones por cada dos revoluciones.

Parece estar muy claro por la ausencia total de aire y agua, así como por su elevada temperatura (pues sólo se halla a una distancia del sol equivalente a dos quintas partes de la que separa al sol de la Tierra), que no puede haber allí vida en el sentido que nosotros entendemos, y que lo más probable es que no haya forma alguna de vida.

En el año 2004 la NASA lanzó hacia Mercurio la sonda Messenger. Llegará al planeta en 2008 y finalizará su misión en 2011. Sus investigaciones se centrarán en la geología del primer planeta del sistema solar, sus campos magnéticos y en la posible presencia de hielo.

Pero ¿qué sucede con Venus? El caso parece presentarse distinto. Venus gira en torno al sol siguiendo una órbita situada entre la nuestra y la de Mercurio. Su distancia del sol no llega a las tres cuartas partes de la que media entre el sol y la Tierra, de modo que cabría esperar que fuese más caluroso que esta última, pero tal vez no en una proporción excesiva.

En 1761, el científico ruso Mijaíl Vasílievich Lomonósov (1711-1765) fue el primero en advertir que Venus posee atmósfera. Además, la atmósfera está ocupada por una densa y perpetua capa de nubes que refleja alrededor de las tres quintas partes de la luz solar que incide sobre ella: el doble de lo que refleja la Tierra. Al parecer, esta particularidad enfriaría en alguna medida el planeta, lo que lo convertiría en apto para la vida, en especial habida cuenta de que las nubes implicarían la presencia de agua y acaso de vastos océanos.

La hipótesis nebular de Laplace induciría a creer que Venus nació a partir de la condensación del sol más tarde que la Tierra, de modo que sería un mundo más joven. Los autores de cienciaficción han escrito a menudo sobre él, presentándolo como un lugar donde la vida se hallaba en un estadio anterior al de la Tierra; un paraíso tropical en el que bullía la vida y donde los dinosaurios eran todavía los animales dominantes.

A partir de 1860, los científicos aprendieron a analizar la luz recibida de los objetos brillantes, y a partir de ella a dilucidar la naturaleza de los elementos químicos que contenían (un procedimiento del que me ocuparé más adelante). Aplicando dichas técnicas, el astrónomo norteamericano Walter Sydney Adams (1876-1956) descubrió dióxido de carbono en la atmósfera de Venus. Se

da el caso de que el dióxido de carbono es más fácil de hallar que el oxígeno y el nitrógeno (los componentes principales de la atmósfera terrestre), por lo que no resultaría sorprendente que sólo fuera la primera sustancia descubierta en aquel planeta. Sin embargo, en nuestra atmósfera el dióxido de carbono sólo representa el 0,03% de la composición total de la misma, lo que no sería bastante para permitir su fácil descubrimiento; de ello era natural concluir que Venus podía tener dióxido de carbono en su atmósfera en una medida considerablemente superior a la de nuestro planeta.

La importancia de este descubrimiento radica en el hecho de que el dióxido de carbono absorbe la luz infrarroja mucho mejor que el oxígeno y el nitrógeno. (La luz infrarroja se sitúa más allá del extremo rojo del espectro, y no podemos percibirla a simple vista, sino que debemos descubrirla con ayuda de instrumentos). Un planeta como Venus o la Tierra toma calor de la luz visible del sol, que atraviesa con idéntica facilidad el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. El planeta pierde calor durante la noche en forma de luz infrarroja, la cual atraviesa el oxígeno y el nitrógeno, pero es absorbida por el dióxido de carbono. La luz infrarroja caldea ligeramente la atmósfera cuando es absorbida, y hace que el planeta esté más caliente que si careciera de dióxido de carbono. En la Tierra, este «efecto invernadero», como se le llama, es relativamente reducido debido a la escasa presencia de dióxido de carbono. El calentamiento es el suficiente como para impedir que en la Tierra reine la edad de los hielos y pueda prosperar la vida. En Venus, el dióxido de carbono adicional crearía un efecto de caldeoamiento superior, que determinaría una temperatura mucho más elevada de cuanto se sospechó al principio.

Todo objeto emite radioondas, las cuales provienen de mucho más allá de donde se sitúa la radiación infrarroja, en el límite rojo del espectro. Después de la segunda guerra mundial, los astrónomos desarrollaron técnicas para captar y analizar las radioondas emitidas por los objetos del espacio. En 1956, un equipo de astrónomos norteamericanos encabezado por Cornell H. Mayer logró recibir

radioondas procedentes de la cara oscura de Venus. Cuanto más caliente es un objeto, más radioondas emite y más energía contienen éstas, y Mayer quedó sorprendido tanto por la cantidad como por la energía de las radioondas que captaba. Éstas parecían indicar que la temperatura incluso de la cara oscura de Venus estaba por encima del punto de ebullición del agua.

En 1962, la sonda Mariner 2 pasó por la inmediata vecindad de Venus y midió su emisión de radioondas con gran exactitud. Desde entonces, otras sondas han repetido la operación, y algunas han llegado a aterrizar en Venus. La temperatura superficial en todas las partes del planeta es de unos 427 °C, lo que se debe principalmente a que la atmósfera venusiana es unas 90 veces más densa que la terrestre y contiene un 98,6% de dióxido de carbono. (Venus tiene 7600 veces más dióxido de carbono en su atmósfera que la Tierra). Semejantes condiciones han producido un acelerado efecto invernadero.

A tan elevada temperatura, Venus es extremadamente seco. Hay algo de vapor de agua en las nubes, pero éstas contienen también ácido sulfúrico. Venus es, pues, un mundo completamente inhóspito, y no existe la menor posibilidad de que albergue cualquier tipo de vida. Tampoco parece posible que los seres humanos lleguen a aterrizar allí alguna vez; toda la exploración deberán llevarla a cabo ingenios no tripulados.

Las radioondas, sin embargo, pueden penetrar la capa nubosa, y nos han permitido cartografiar la superficie sólida del planeta y medir su velocidad de rotación. Estos resultados condujeron a otro descubrimiento sorprendente: Venus giraba sobre su eje muy despacio —precisa 243 días para completar una vuelta— y lo hacía en la dirección «equivocada», o sea, de Este a Oeste y no viceversa como lo hacen los demás planetas. Ignoramos la causa.

En cualquier caso, podemos eliminar Venus como posible soporte para la vida.

En el año 2005 la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó hacia Venus la sonda Venus Express, que llegó a su destino en 2006, y finalizará su misión en 2009. La Venus Express realizará estudios geológicos y atmosféricos. El análisis de su atmósfera nos ha de ayudar a entender la evolución de la atmósfera y el clima terrestre.

58. ¿Hay vida en Marte?

Marte ha sido siempre el planeta en el que se esperaba hallar vida. Está aproximadamente un 50% más alejado del sol que la Tierra, por lo que es probable que resulte más frío, pero tal vez no mucho más.

Marte tiene atmósfera, pero no una capa permanente de nubes, como Venus, y ni siquiera tantas nubes como la Tierra, de modo que podemos distinguir las marcas de la superficie marciana. En 1659, Huygens estudió los desplazamientos de dichas marcas y demostró que Marte, aunque considerablemente menor que la Tierra, giraba sobre su eje veinticuatro horas y media, esto es, una cifra muy próxima a la del período de rotación terrestre.

En 1784, Herschel demostró que el eje de Marte presenta una inclinación hacia el sol casi idéntica a la de la Tierra, de modo que sus estaciones probablemente son similares a las nuestras, con la particularidad de que cada una de ellas ha de ser más fría que la correspondiente de la Tierra y casi el doble de larga, pues Marte está más alejado del sol y precisa 687 días terrestres para completar su órbita. Herschel también descubrió casquetes de hielo en los polos norte y sur de Marte, lo que parecía indicar la presencia de agua.

Los primeros astrónomos trataron de cartografiar la superficie de Marte, pero no tuvieron mucho éxito en su empresa, pues no había dos mapas que coincidieran. Marte varía en su acercamiento o lejanía de la Tierra, y cada treinta años más o menos alcanza la mayor aproximación: apenas más de 56 millones de km. Tan sólo Venus se nos acerca más: hasta 42 millones de km. Durante las

mayores aproximaciones de Marte, puede observársele con especial claridad, y por supuesto en cada nueva aproximación los astrónomos cuentan con instrumentos más perfeccionados.

En 1877 se registró una de esas aproximaciones, y el astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910) dibujó el mejor mapa de la superficie marciana con que se contaba hasta entonces, y el primero con el que los demás astrónomos pudieron mostrarse de acuerdo. Schiaparelli advirtió que muchas de las manchas oscuras de Marte eran alargadas y estrechas. Los astrónomos que le precedieron también habían observado esas marcas, pero Schiaparelli las llamó «canales». Utilizó para designarlas la palabra italiana *canali*, que fue traducida por los astrónomos británicos y norteamericanos mediante la palabra inglesa *canals*. Lo cual constituyó un grave error, porque en inglés *channel* significa un canal natural, mientras que *canal* es el construido por la mano del hombre. Así que en cuanto los astrónomos que empleaban esa lengua empezaron a referirse a los *Martian canals*, el público se imaginó que eran obra de unos marcianos inteligentes.

Lo cual parecía tener sentido. Marte, con su baja gravedad superficial (sólo dos quintas partes de la terrestre), no podía retener muy bien el vapor de agua, que se perdía en el espacio, con lo que el planeta se convertía en un desierto. Cabía argumentar que con objeto de preservar la vida de sus gentes y de posibilitar la agricultura, una civilización marciana habría construido una serie de canales a fin de conducir el agua desde los casquetes de hielo hasta las regiones ecuatoriales. Se pintaba con ello un cuadro muy dramático que seducía al común de la población, y de paso a algunos astrónomos.

El más influyente defensor de la idea de los canales y de la vida en Marte fue el astrónomo norteamericano Percival Lowell (1855-1916). Se trataba de un hombre rico que fundó un observatorio privado en Arizona, donde el aire seco del desierto, a 1500 m de altura, y la lejanía de las luces de los núcleos habitados brindaban una visibilidad excelente. Desde el observatorio tomó centenares de

fotografías de Marte y trazó mapas detallados que, con el tiempo, llegaron a incluir más de quinientos canales. En 1894 publicó un libro titulado *Mars*, que avanzó la falacia de que el planeta albergaba vida inteligente.

El escritor británico Herbert George Wells (1866-1946) utilizó el libro de Lowell para escribir una novela titulada *La guerra de los mundos*, que apareció en 1898. En ella describe una expedición bélica de los marcianos que vienen a la Tierra en busca de nuestra abundante agua, con el propósito de abandonar su planeta, que se está desecando, y colonizar el nuestro. Con la avanzada tecnología de los marcianos, la población terrestre no tenía la menor esperanza de detener la invasión, pero al final los marcianos eran derrotados porque sus cuerpos carecían de defensas contra las bacterias de nuestro mundo. La novela fue la primera descripción importante de una guerra interplanetaria, y estaba tan bien escrita y resultaba tan impresionante, que convenció a más personas aún que el libro de Lowell de la existencia de vida en Marte.

Pero no todo el mundo aceptó la idea de los canales de Marte. El astrónomo norteamericano Edward Emerson Barnard (1857-1923), que había alcanzado notoriedad por la precisión de sus observaciones, nunca vio canales en Marte, e insistía en que se trataban de una ilusión óptica. Al percibirse pequeñas e irregulares manchas oscuras, la vista las interpreta como líneas largas y rectas.

El astrónomo británico Edward Walter Maunder (1851-1928) puso a prueba esa idea. Trazó círculos en cuyo interior dispuso unas manchas borrosas e irregulares, y sometió estos dibujos a la apreciación de los niños de una escuela, colocando a éstos a una distancia tal que apenas podían distinguir lo que contenían los círculos. A continuación les pidió que dibujaran lo que veían, y el resultado fueron líneas rectas, como las que Schiaparelli y Lowell habían trazado en sus mapas de Marte.

Otros astrónomos también pusieron objeciones, pero Lowell siguió defendiendo sus ideas, y el público en general le apoyó, seducido por el drama que dichas ideas implicaban. Durante más de

cincuenta años después de la novela de Wells, los autores de ciencia-ficción parecieron obsesionados por los canales de Marte y por los marcianos inteligentes.

Pero de forma gradual, los hallazgos científicos pusieron de manifiesto la imposibilidad de la vida en Marte. En 1926, los astrónomos norteamericanos William Weber Coblentz (1873-1962) y Carl Otto Lampland (1873-1951) estuvieron en condiciones de medir las pequeñas cantidades de calor que emitía Marte, y descubrieron que mientras el ecuador de ese planeta podía presentar un clima suave durante la insolación, la noche resultaba tan fría como en la Antártida. Semejante caída de la temperatura en una noche de doce horas daba la impresión de que la atmósfera marciana debía de ser muy delgada.

En 1947, el astrónomo holandés-americano Gerard Peter Kuiper (1905-1973) descubrió dióxido de carbono en la atmósfera marciana, pero no pudo hallar oxígeno ni nitrógeno. No sólo la atmósfera tenía que ser demasiado delgada para que resultara respirable, sino que su composición la hacía igualmente irrespirable aunque hubiera sido más densa. De este modo, cada vez eran menores las esperanzas de vida inteligente en Marte.

Lo que se precisaba, claro está, era una visión más próxima, y eso lo hizo posible el advenimiento de la era del cohete. En 1965, la sonda Mariner 4 pasó a una distancia de 10 000 km de la superficie de Marte y tomó veinte fotografías, que fueron transmitidas a la Tierra. En ellas no eran visibles los canales; tan sólo cráteres como los de la luna. Además, el Mariner 4 envió radioondas a través de la atmósfera marciana, cuya densidad resultó ser algo más de la ducentésima parte de la terrestre, con el dióxido de carbono como componente principal.

Las posibilidades de vida inteligente en Marte aún disminuyeron más cuando otras sondas cohete tomaron mejores y más detalladas fotografías. A fines de 1971, se puso en órbita en torno a Marte el Mariner 9, que cartografió su entera superficie, revelando la existencia de volcanes elevados pero extintos, un gran cañón,

marcas en la superficie que hacían pensar en antiguos cauces fluviales, y casquetes de hielo que podrían contener dióxido de carbono helado, así como agua. En todas partes, la temperatura estaba muy por debajo de cero, y no había canales; lo que se tomó por tales eran ilusiones ópticas, como sostuvieron Barnard y Maunder. Lowell se había equivocado de plano.

En 1976, las sondas cohete Viking 1 y Viking 2 aterrizaron en la superficie de Marte y tomaron fotografías que mostraban un paisaje absolutamente desolado y desprovisto de vida. Se efectuaron análisis automáticos del suelo a fin de comprobar si podía haber vida microscópica, pero no se hizo ningún hallazgo definitivo. Pese a todo no podemos negar tajantemente que haya vida en Marte o que pudiera haberla en otro tiempo, pero sí parece cierto que no la hay hoy día, salvo la muy remota posibilidad de encontrar algo en cierto modo equivalente a una bacteria.

En los últimos años, diferentes sondas han explorado Marte y han hecho grandes descubrimientos. La sonda de la NASA Mars Global Surveyor (1996-2006) halló agua congelada en la superficie del planeta. La sonda de la Agencia Espacial Europea (ESA) Mars Express (2003-2009) reafirmó las evidencias sobre la presencia de agua. Otros hallazgos son evidencias de hielo subterráneo y de actividad volcánica, fluvial y glaciar desde épocas tempranas de la historia geológica de Marte. También se ha detectado metano en la atmósfera marciana, un importante indicador de actividad volcánica y de posibilidades de vida. La última sonda enviada a Marte es la Mars Reconnaissance Orbiter (2005), de la NASA, cuya misión tratará de determinar el volumen de agua que hay en el planeta.

59. ¿Hay vida en los planetas exteriores del sistema solar?

Si Marte es demasiado frío (entre otras particularidades) para albergar vida en la forma que nosotros la conocemos, los mundos situados más allá aún son más fríos e inhóspitos. Por lo que se refiere a los cuatro planetas gigantes, sus condiciones son tan radicalmente distintas de la Tierra, que no podemos esperar con fundamento encontrar en ellos lo que entendemos por formas de vida.

Si prescindimos de los gigantes, quedan varios satélites, casi todos los cuales carecen de aire, y si poseen agua, es sólo en forma de hielo. Así pues, pueden descartarse también, con dos posibles aunque improbables excepciones: Europa y Titán.

Los cuatro grandes satélites de Júpiter —Ío, Europa, Ganimedes y Calisto (en orden de distancia creciente al sol)— están todos sujetos a la amplia y enérgica influencia de las mareas del planeta gigante. Los satélites no describen círculos perfectos en torno a Júpiter porque se atraen entre sí, y como su distancia de Júpiter varía, tienden a ensancharse y contraerse ligeramente, un proceso que tiene efectos calóricos sobre ellos.

Puesto que el efecto de marea aumenta en proporción inversa al cubo de la distancia, como resultó de las investigaciones de Édouard Roche, el primero en dar una explicación para los anillos de Saturno, esa atracción no es muy fuerte en los satélites más externos, Ganimedes y Calisto. Estos dos han permanecido lo bastante fríos como para retener materia helada, de manera que son mayores que los otros dos satélites, y puesto que Ganimedes

presenta una densidad de 1,9 y Calisto, de 1,6, probablemente están constituidos sobre todo por hielo.

Ío, el satélite más próximo a Júpiter, está sujeto al efecto calórico más fuerte, tanto que no le ha quedado hielo, y es un mundo enteramente de roca, pues su densidad alcanza los 3,6 g por cm³. En realidad, Ío está tan caliente que su interior puede dar lugar a actividad volcánica. Cuando la sonda Voyager 1 pasó por sus inmediaciones en marzo de 1979, se identificaron ocho volcanes en plena erupción, y cuando pasó el Voyager 2 en julio de 1979, seis de ellos seguían en actividad.

En su mayor parte, lo que expulsan los volcanes de Ío parece azufre. Ello comunica a la superficie del satélite un color rojo y anaranjado, en el que las ráfagas de dióxido de azufre dejan placas blancas. Todos los cráteres que se formaron durante el bombardeo de Ío en los primeros tiempos del sistema solar están cubiertos de azufre, con lo que la superficie es muy suave, y faltan en ella los cráteres que tanto accidentan Ganimedes y Calisto.

Europa, el segundo de los grandes satélites de Júpiter, es el de menor tamaño: su diámetro mide 3138 km, algo menos que nuestra luna. Las sondas cohete demuestran que tiene una superficie lisa, más lisa que la de cualquier otro mundo del sistema solar. Es como si estuviera completamente cubierto por un glaciar.

Pero si el glaciar fuera sólido, la superficie estaría agujereada de cráteres, como es el caso de Ganimedes y de Calisto. En vez de eso, la cruza gran número de finas estrías, más bien parecidas a los mapas de los canales marcianos dibujados por Lowell. La explicación más verosímil de esas líneas parece ser el ocasional impacto de los meteoritos contra el glaciar, que no es más que una «cáscara» externa: la rompen y caen en el océano líquido subyacente. (Al líquido le impediría helarse el efecto calórico de las mareas de Júpiter). El agua en estado líquido mana entonces por las roturas causadas por los meteoritos y allí se hiela, soldando de este modo la superficie.

El líquido puede ser agua en su mayor parte o enteramente, pero aun así carece de oxígeno, y bajo la cubierta glacial no llega la luz del sol. Casi toda la vida sobre la Tierra depende de la luz solar y del oxígeno, pero insistamos en el caso. En efecto, hay algunas formas de bacterias primitivas que obtienen su energía llevando a cabo cambios químicos en compuestos de azufre y hierro en los que no intervienen ni la luz solar ni el oxígeno. En años recientes, se han localizado áreas del fondo oceánico en las que mana agua rica en minerales que pueden utilizar ciertas bacterias. Formas de vida más evolucionadas se alimentan de las bacterias y se devoran entre sí, y al parecer unas y otras prosperan. ¿Es posible, por tanto, que Europa disponga de un océano y que éste sustente alguna forma de vida? Algún día nuestros instrumentos nos permitirán introducirnos bajo la cubierta de hielo e investigar.

Algunos de los satélites de nuestro sistema solar son lo bastante fríos y grandes como para retener una atmósfera. (Los gases fríos son más lentos en sus movimientos moleculares y son retenidos con más facilidad por una gravedad débil que los gases calientes). Tritón, el gran satélite de Neptuno, fue visitado por el Voyager 2 en 1989, y resultó ser algo menor de lo que se había creído: sólo contaba 2730 km de diámetro, y era el más pequeño de los siete grandes satélites conocidos. Aun así, era tan frío ($-223\text{ }^{\circ}\text{C}$) que lograba retener una delgada atmósfera.

La atmósfera de Tritón se compone mayormente de nitrógeno y metano. Ambos se hielan a temperaturas muy bajas, y como resultado de ello la superficie está alisada por el hielo que forman esas sustancias. Pero aún queda bastante calor en Tritón como para convertir el nitrógeno sólido en gas, de manera que de vez en cuando el nitrógeno helado se evapora e impulsa hacia la superficie materia sólida y helada. Estos volcanes de hielo dan lugar a cráteres y a cordilleras. Tritón es el único mundo, aparte de la Tierra e Ío, que parece tener volcanes en actividad, pero no brinda una oportunidad razonable a la existencia de vida.

Plutón, que es considerablemente menor que Tritón, y Caronte, su satélite, aún más pequeño, también poseen atmósferas, pero no por ello ofrecen la menor posibilidad de vida.

El satélite con la atmósfera más densa es Titán, el mayor de los satélites de Saturno. Tiene casi el tamaño de Ganimedes, con un diámetro de 5150 km, y su atmósfera parece superar en densidad a la terrestre.

Como en el caso de Tritón, la atmósfera de Titán está constituida por nitrógeno y metano. El metano está presente en bastante cantidad y está lo suficientemente cerca del sol como para verse afectado por la luz de este último. La superior radiación solar une las moléculas de metano (cada una de las cuales está constituida por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno) para formar moléculas más complicadas con varios átomos de carbono cada una.

Mientras que el metano es un gas a la temperatura de Tritón, los compuestos de carbono, más complejos, que derivan de él son líquidos. Podría ser, pues, que Tritón tuviera líquido (no hielo) en su superficie; en realidad, sería algo parecido a la gasolina. Por desgracia, la atmósfera de Tritón es tan espesa que su superficie no puede verse, pero recientemente se han hecho rebotar radioondas en dicha superficie, y parecían señalar la existencia de océanos líquidos y continentes secos emergiendo de aquéllos. Se asemeja mucho a la Tierra, pero esos océanos son de gasolina y mucho más fríos que los nuestros.

¿Puede haber vida en la gasolina? Una vez más, algún día deberemos enviar instrumentos a la superficie de Titán para salir de dudas.

La conclusión es, pues, que excepto en los casos de Europa y Titán, y aun en éstos la posibilidad es remotísima, no hay vida en el sistema solar fuera de la Tierra. Una razón más para que nos esforcemos en salvar nuestro hermoso y único mundo.

Recientemente hemos conocido datos interesantes sobre los satélites de Júpiter gracias a la sonda de la NASA Galileo. En el año

2000 halló indicios que debajo de la superficie de Europa hay un enorme océano de agua líquida, posiblemente salada. También ha confirmado la intensa actividad volcánica de Ío, a partir de las imágenes que captó de la superficie del satélite cubierta por volcanes humeantes y ríos de lava. Las observaciones en Ío pueden servir para conocer lo que pudo pasar en nuestro planeta en las etapas más tempranas de su formación.

En el año 2007 también se han obtenido imágenes de gran resolución de Europa e Ío gracias a la sonda New Horizons (que la NASA lanzó en 2006 hacia Plutón) a su paso por Júpiter. New Horizons llegará al planeta enano en 2015.

Por lo que respecta al mayor satélite de Saturno, Titán, ha sido estudiado por la sonda Cassini-Huygens, proyecto conjunto de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) (1997-2007). La sonda Huygens aterrizó en Titán y halló un entorno gélido con mares y lluvia de metano, y detectó un ruido que podría ser viento.

60. ¿Cómo es el sol?

Es tiempo de que regresemos al sol, el centro y dador de vida del sistema solar. Pero preguntar cómo es podría parecer demasiado obvio. Al fin y al cabo, ¿hay alguien que no sepa cómo es el sol? Es un círculo brillante de luz.

Realmente es mucho más que un círculo brillante de luz, tan reluciente que las personas no pueden mirarlo directamente más de un segundo sin que sus ojos resulten dañados. Así pues, es muy difícil decir con exactitud cómo es.

El brillo del sol y su manifiesta importancia como fuente de luz y de calor le han conferido categoría divina en casi todas las mitologías. En todas partes hay dioses sol. Uno de los mejor conocidos es el griego Helios, aunque en los mitos posteriores es Apolo quien conduce el brillante carro a través del cielo todos los días.

El primer monoteísta cuyo nombre conocemos fue el faraón egipcio Amenhotep IV, que accedió al trono en 1379 a. C. y fundó una nueva religión en la que el sol (llamado Atón) era el dios único. Cambió su propio nombre por el de Akhenatón en honor del sol, pero la religión apenas le sobrevivió.

El cristianismo, por supuesto, no reconoció honores divinos al sol, pero éste fue identificado como un símbolo de la perfección de Dios, pues era considerado más perfecto que ningún otro cuerpo celeste.

En determinadas ocasiones es posible mirar directamente al sol. A veces luce a través de la neblina, y a menudo durante su puesta aparece lo bastante apagado, a causa de las espesas capas de

polvo en suspensión que su luz debe atravesar, como para permitir una observación directa.

Entonces pueden percibirse unas manchas oscuras que a veces aparecen en su brillante superficie. Los astrónomos chinos llamaron la atención sobre ellas en numerosas ocasiones y tomaron nota cuidadosamente. Sin duda, los europeos también las observaron, pero nunca informaron de su existencia. El pensamiento de que la faz del sol podía estar manchada constituía un auténtico insulto al Dios que simbolizaba, y resultaba más fácil creer que las manchas se debían a algún defecto de visión.

A fines de 1610, Galileo, sirviéndose de su telescopio, concluyó que no podía haber error al respecto. Había unas manchas bien definidas sobre el sol. Además se desplazaban lenta y regularmente a través de su superficie, y demostraban que el sol experimentaba un movimiento de rotación sobre su eje cada veintiséis días aproximadamente. Por supuesto, este descubrimiento despertó gran indignación, y los dirigentes religiosos se sintieron horrorizados por la posibilidad de que el sol se viera desacralizado a causa de las manchas. Pero los hechos resultaban evidentes, y Galileo acabó venciendo (y ganándose enemigos con ello).

En realidad, las manchas solares no son negras; sólo parecen oscuras en comparación con el brillo que las rodea. De vez en cuando, Venus o Mercurio se interponen directamente entre la Tierra y el sol, y se desplazan despacio ante este último (en lo que se llama un tránsito). Cuando se produce este fenómeno, los planetas se presentan como objetos muy oscuros, incluso negros, y si se mueven por las proximidades de una mancha solar, queda de manifiesto que ésta es más apagada que el propio sol, pero que aun así brilla.

En 1825, el astrónomo aficionado alemán Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) empezó a estudiar el sol y sus manchas. Pasó diecisiete años observándolos (con las debidas precauciones para evitar la ceguera) y descubrió que el número de manchas aumentaba y disminuía en lo que parecía un ciclo de diez años (más

bien once, según otros que prosiguieron los estudios de Schwabe). Éste fue el comienzo de la ciencia llamada astrofísica, esto es, el estudio de los fenómenos físicos que acontecen en las estrellas y demás objetos del universo. La razón de este ciclo de manchas solares sigue desconocido en nuestros días.

Este extraño aumento y disminución de la intensidad de las manchas parecía tener repercusiones en la Tierra, pues en 1852 el físico británico Edward Sabine (1788-1883) señaló que las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre coincidían con el ciclo de las manchas solares. Esta observación parecía atribuir a las manchas alguna relación con el magnetismo, y en 1908 el astrónomo norteamericano George Ellery Hale (1868-1938) descubrió que existía un fuerte campo magnético asociado con las manchas solares. En efecto, el ciclo de las manchas era de veintidós años, y durante cada sucesivo período de once años el campo magnético se invertía.

En 1893, Edward Maunder (uno de los que dudaban de los relatos acerca de los canales marcianos) estudió las informaciones antiguas acerca de las manchas solares y halló, para su sorpresa, que entre 1645 y 1715 no había apenas noticias de ellas. Aunque dio a conocer su hallazgo, nadie lo tomó en consideración, pues los registros antiguos no se tenían por fiables.

En la década de 1970, sin embargo, el astrónomo norteamericano Johan A. Eddy procedió a comprobar la información suministrada por Maunder. No sólo se basó en las observaciones de los primeros tiempos del telescopio, sino que estudió las efectuadas a simple vista por los chinos y por otros pueblos. Llegó a la conclusión de que hay periódicos «mínimos de Maunder», y que el establecido por el propio Maunder no era más que el último. Las causas de estos mínimos continúan siendo desconocidas.

61. ¿Qué es la luz del sol?

La mayor parte de nuestros conocimientos acerca del sol se refieren a la luz que de él recibimos, de modo que deberíamos ocuparnos de lo que esa luz puede revelarnos. En primer lugar, parece tratarse simplemente de luz blanca, la más pura que conocemos, y se acepta que así nos llega del sol. Pero por muy aceptable que podamos considerar esta explicación, presenta el inconveniente de que no se puede obtener información de algo tan puro y tan simple como la luz blanca.

La luz producida por el hombre no es necesariamente blanca. Las llamas que resultan de la combustión de la madera o de otros combustibles tienden a ser rojas, anaranjadas y amarillas, y carecen por tanto de la cualidad divinamente pura de la celestial luz solar. A esta última, por otra parte, se le puede conferir color si se la hace pasar a través de fragmentos de vidrio coloreado, como en el caso de las vidrieras emplomadas. Los resultados son muy hermosos, pero estaba claro que se debían a la adición de las impurezas introducidas en la luz pura por el material hecho por el hombre. Incluso la luz rosada del alba o del ocaso parecía ser el resultado del paso de la luz solar a través del polvo en suspensión en el aire. De hecho, el único caso de luz coloreada visible, al parecer sin intervención humana o terrestre, era el arco iris, que se consideraba de origen divino: un puente utilizado por los dioses o una señal enviada por Dios para recordar la promesa de que nunca volvería a repetirse el diluvio universal.

En 1665, Isaac Newton investigó la naturaleza de la luz solar dejando penetrar un rayo luminoso en una estancia oscura a través

de un orificio practicado en una cortina; a continuación, el rayo atravesaba una pieza de cristal de forma triangular llamada prisma. La trayectoria del rayo luminoso se desviaba al pasar por el prisma, pero esa desviación no era uniforme. En efecto, algunas partes del rayo experimentaban una desviación más acusada que otras, y la luz que incidía en la pared blanca situada frente al prisma formaba un arco iris. Se apreciaba una banda de colores que empezaba con el rojo (la parte menos desviada de la luz), al que seguían el naranja, amarillo, verde, azul y, finalmente, el violeta (la parte más desviada de la luz). Todos los colores cambiaban de manera gradual y se mezclaban. El aspecto y la secuencia de los colores eran exactamente los mismos que en el arco iris.

Puesto que la banda de colores era un fenómeno insustancial, carente de masa, Newton la llamó espectro ligero. El arco iris, al parecer, es un espectro natural que se forma cuando la luz solar pasa a través de las gotitas de agua que permanecen en suspensión en la atmósfera después de la lluvia.

Algunos, claro está, podían argumentar que los colores los producía el prisma, aunque éste careciera de color, pero Newton rebatió esta objeción haciendo que el rayo de luz que había atravesado el prisma y formado un espectro incidiera en otro prisma colocado en sentido opuesto al anterior. Ahora, la luz, en vez de desviarse y separarse como antes, invertía el proceso y convergía, con lo que del segundo prisma salía luz blanca. Eso dejaba en claro, por tanto, que la luz solar no era pura, sino que constituía una compleja mezcla de luz de varios colores. Cuando esos colores diversos actúan en nuestra retina, el efecto es lo que llamamos luz blanca.

62. ¿Qué son las líneas espectrales?

Cuando Newton estudió por vez primera el espectro luminoso le pareció que era continuo. Todas las variedades de color del espectro cambiaban a otra sin ruptura. Pero en realidad, el espectro no es completamente continuo, y existen unas leves rupturas desprovistas de color. Los historiadores de la ciencia se extrañan a veces de que Newton no se percatara de ello, pero lo cierto es que utilizaba instrumentos muy rudimentarios que no le permitieron apreciar esas discontinuidades de color. En 1802, el químico británico William Hyde Wollaston (1776-1828) descubrió unas pocas rupturas en el espectro y dio cuenta de ellas, pero no las consideró importantes y dejó de ocuparse del asunto.

Naturalmente, se perfeccionó el equipo para producir y estudiar un espectro (estos aparatos se llaman espectroscopios). Con el tiempo, se hizo pasar luz a través de una estrecha ranura, y el espectro se convirtió en una serie de ranuras de diferentes colores que, por así decirlo, se mezclaban para formar una banda casi continua. Faltaban algunos colores, sin embargo, y en el lugar donde el color ausente hubiera debido estar, quedaba una ranura oscura o línea oscura que cruzaba el espectro brillante.

En 1814, el físico alemán Joseph von Fraunhofer (1787-1826) trabajaba con espectros producidos mediante el mejor equipo que se había usado hasta entonces, y halló casi seiscientas de esas líneas. (Los físicos modernos han localizado unas 10 000). Se denominaron al principio líneas de Fraunhofer, pero ahora suelen llamarse sencillamente líneas espectrales. Con el tiempo, estas líneas resultaron tener la mayor importancia.

Las distintas sustancias químicas emiten luz de otros tantos colores cuando se calientan. Los compuestos de sodio dan luz amarilla; los de potasio, violeta; los de estroncio, roja; los de bario, verde, etc. Esos compuestos se utilizan para producir los espectaculares fuegos artificiales con que se alegran ciertos festejos.

En 1857, el químico alemán Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) creó un mechero de gas tan bien alimentado por el aire, que producía una llama prácticamente incolora. Si se empleaba para calentar determinado producto químico, la luz emitida produciría un color que no podría confundirse con el del mechero.

El físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1877), colaborador de Bunsen, utilizó el mechero ideado por éste para producir luz a partir de diversas sustancias químicas. Estudió los espectros de dicha luz y halló que no eran continuos, sino que cada uno estaba constituido por unas pocas líneas separadas e individualizadas. Además, cada elemento distinto (cada diferente tipo de átomo) producía su propia pauta de líneas coloreadas. De este modo, los espectros suministraban la «huella dactilar» de cada elemento, con lo que los espectros podían emplearse como un método de análisis de los elementos presentes en un determinado mineral.

Cuando se calienta fuertemente una muestra de mineral, y produce una serie de líneas coloreadas que no se dan en ningún elemento conocido, eso significa que el mineral en cuestión contiene una sustancia inidentificada. Si el mineral fuera objeto de diversos tratamientos, podrían obtenerse fracciones del mismo en las que las líneas desconocidas fueran más acusadas, con lo que el elemento desconocido podría ser aislado y, llegado el caso, estudiado. De esta manera Kirchhoff descubrió los elementos cesio en 1860 y rubidio en 1861. Recibieron sus nombres de los colores de las líneas espectrales que los identificaban: *cesium* significa en latín cielo azul, y *rubidium*, rojo.

Kirchhoff fue más allá en su estudio. Cuando dejaba pasar la luz del sol a través de vapor de sodio, este vapor absorbía ciertas partes de la luz y oscurecía algunas líneas que ya estaban presentes. Descubrió de este modo que todo vapor, si estaba más frío que la fuente luminosa, absorbía exactamente aquellas partes del espectro que hubiera emitido en caso de haber sido calentado. En otras palabras: era posible identificar los elementos (o compuestos simples de esos elementos) como líneas brillantes sobre un fondo oscuro si los elementos se calentaban y con ello se les hacía emitir luz, o como líneas oscuras sobre un fondo brillante si los elementos estaban relativamente fríos y absorbían la luz. Por ejemplo, mediante las líneas espectrales se identificó por vez primera el dióxido de carbono en las atmósferas de Venus y Marte.

63. ¿Cuál es la masa del sol?

Ahora es el momento de considerar de qué está hecho el sol; pero, ante todo, ¿el sol es materia? Los antiguos creían que era sencillamente una bola de luz desprovista de sustancia. Tampoco se trataba de luz terrestre. Aristóteles pensaba que la Tierra estaba constituida por cuatro «elementos» (de clases de materia fundamentalmente distinta): tierra, agua, aire y fuego, en tanto el sol y los demás cuerpos celestes estaban hechos de éter, una sustancia no terrestre caracterizada por su capacidad para brillar perpetuamente. La misma palabra éter proviene de un término griego que significa brillar.

Aun después de adquirir la certeza de que el sol era mayor que la Tierra, podía argumentarse que carecía de sustancia, que no estaba constituido como la Tierra y que no tenía masa, con lo que el tamaño por sí mismo no importaba. Es el mismo punto de vista que sustentaban los primitivos astrónomos respecto a la luna. Pero esta incertidumbre cambió cuando Newton formuló en 1687 la ley de la gravitación universal: entonces quedó claro que la Tierra era atraída hacia el sol por una poderosa fuerza gravitatoria, y que si el sol era la fuente de esa fuerza, debía tener masa.

Pero ¿cuánta? No resulta difícil determinarla. Sabemos cuánto tiempo tarda la luna en girar en torno a la Tierra a una distancia de 385 000 km. También sabemos cuánto tarda la Tierra en completar un giro alrededor del sol, a una distancia de 150 millones de km. A partir de esos datos podemos calcular en cuánto supera la masa del sol a la terrestre. Y resulta que la supera en 330 000 veces. No se trata, pues, de una bola luminosa desprovista de sustancia, sino de

una gran esfera constituida por materia, con una masa alrededor de 1038 veces la de Júpiter, el mayor de los planetas. De hecho, casi el 99,9% de la masa total del sistema solar corresponde al sol.

Sin embargo, el sol tiene una masa inferior a la terrestre en proporción a su tamaño: su densidad, en efecto, sólo alcanza alrededor de 1,4 g por cm³, lo que equivale a la cuarta parte de la densidad terrestre. Lo cual pone claramente de manifiesto que la composición química de ambos cuerpos ha de ser muy distinta.

64. ¿De qué está hecho el sol?

Entonces, ¿cuál es exactamente la composición química del sol? Ésta podría parecer una pregunta imposible de contestar. ¿Acaso se puede tomar una muestra del sol y someterla a análisis?

En 1835, el filósofo francés Auguste Comte (1798-1857), al proponer un ejemplo de conocimiento inaccesible a los seres humanos, señaló que éstos jamás podrían conocer la composición química de las estrellas. Murió a los cincuenta y nueve años, pero si hubiera vivido cuatro más hubiera visto cómo se determinaba con toda exactitud aquello que él calificó de imposible. O al menos hubiera asistido al comienzo de los oportunos cálculos.

La respuesta vino dada por el descubrimiento de Kirchhoff de que los elementos emitían un espectro de líneas brillantes características cuando eran sometidos a la acción del calor, o a un espectro correspondiente al anterior, pero de líneas oscuras, cuando absorbían luz. En virtud de este fenómeno, la superficie caliente del sol emite toda clase de luz, y daría lugar a un espectro continuo si su luz llegara incólume a la Tierra. Pero lo cierto es que la luz solar atraviesa la atmósfera baja del propio sol, que registra una elevada temperatura, pero no tanto como su superficie. La atmósfera absorbe algo de luz y produce las líneas oscuras que descubrió Fraunhofer. A partir de la posición de esas líneas oscuras puede determinarse la naturaleza de los elementos presentes en la atmósfera solar.

El físico sueco Anders Jóns Ångström (1814-1874) fue el primero en investigar esta cuestión. En 1862 señaló que la posición de algunas de las líneas oscuras en el espectro solar coincidía

exactamente con las líneas oscuras que hubiera producido la luz si hubiera pasado a través de hidrógeno. La conclusión era que el hidrógeno se hallaba presente en el sol.

Conocido este dato, otros astrónomos empezaron a estudiar el espectro del sol a fin de averiguar más detalles de su composición. Hoy se sabe que alrededor de las tres cuartas partes de la masa del sol consisten en hidrógeno, el más simple de los elementos, y que casi todo el resto es helio, el segundo en cuanto a simplicidad. Hidrógeno y helio juntos representan aproximadamente el 98% de la masa del sol.

Aparte del hidrógeno y el helio, por cada 10 000 átomos el sol cuenta con 4300 de oxígeno, 3000 de carbono, 950 de neón, 630 de nitrógeno, 230 de magnesio, 52 de hierro y 35 de silicio. Los demás elementos, alrededor de 80, se hallan presentes en proporciones aún menores. Estos hallazgos despojaron de todo fundamento a la idea aristotélica de que la composición de los cuerpos celestes es fundamentalmente distinta de la terrestre. Ahora resulta obvio que todo en el universo conocido está formado por los mismos átomos (y partículas subatómicas) que la Tierra.

65. ¿De qué están hechos los planetas?

Ahora que conocemos la composición química general del sol, y nos consta que la gran mayoría de las estrellas (y del polvo y el gas que se encuentran entre las mismas) presentan idéntica composición, ya conocemos la naturaleza química del universo. Eso si aceptamos que las estrellas y las nubes de gas forman la mayor parte del universo. (Esta suposición puede no ser exacta, como ya explicaremos más adelante).

Podemos dividir los tipos de materia del universo en cuatro clases generales:

Gases. Los dos elementos más simples, hidrógeno y helio, componen alrededor del 98% del universo. Son gases constituidos por átomos ligerísimos que giran con gran rapidez. Cuanta menos masa tiene un átomo, más elevada es su temperatura y se mueve con más rapidez. Y cuanto más aprisa se mueven los átomos, más difícil resulta que las fuerzas gravitatorias los retengan.

Lo cual significa que un cuerpo no puede retener el hidrógeno ni el helio a menos que tenga una masa muy elevada y ejerza una enorme atracción gravitatoria. El sol posee suficiente masa como para retener el hidrógeno, el helio y los demás elementos contenidos en la nube de polvo y gas originaria a partir de la cual se formó.

Si un objeto está frío, al menos en su superficie, puede seguir reteniendo el hidrógeno y el helio con más facilidad que si estuviera caliente. Para lograrlo no necesita, por tanto, ser tan grande ni gravitatoriamente tan poderoso como el sol. Los cuatro planetas

gigantes —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— están formados en gran medida por hidrógeno y helio, y por ello se les denomina en ocasiones gigantes gaseosos.

Estos datos son aplicables a las densidades bajas, en torno a $1,4 \text{ g por cm}^3$, que es la del sol y de los gigantes gaseosos. La densidad aún sería inferior si las partes internas de estos grandes objetos no estuvieran comprimidas por la presión. La densidad insólitamente baja de Saturno sigue resultando un tanto sorprendente.

Hielos. Un segundo tipo de materia lo constituyen los hielos, presentes en el universo en cantidades muy inferiores al hidrógeno y el helio. Constan de moléculas que contienen los elementos secundarios oxígeno, nitrógeno y carbono, combinados con el átomo del omnipresente hidrógeno. El oxígeno, combinado con el hidrógeno, produce las moléculas de agua; el nitrógeno con el hidrógeno, amoníaco, y el carbono con el hidrógeno, metano. El agua se hiela y, por tanto, se solidifica a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. El amoníaco, a temperatura inferior, y el metano, a temperatura aún más baja. Hay también combinaciones de carbono con oxígeno (dióxido y monóxido de carbono), de carbono con nitrógeno (cianógeno) y de azufre tanto con hidrógeno (sulfuro de hidrógeno) como con oxígeno (dióxido de azufre). Todas estas combinaciones pueden incluirse entre los hielos.

Las moléculas de hielo se agregan entre sí más estrechamente que las de gas. Los cuerpos pequeños pueden retener hielos, pese a que sus gravedades no sean lo bastante fuertes como para retener mucho hidrógeno y helio. (El helio suele perderse, ya que no puede combinarse con nada más. Algo del hidrógeno permanece, porque es capaz de combinarse con los otros elementos para formar hielos).

Los gigantes gaseosos pueden muy bien ser mezclas de hielos, menores en cantidad si se comparan con el hidrógeno y el helio, pero los cuerpos más pequeños, si son fríos, están constituidos principalmente por hielos. Dichos cuerpos menores incluyen por

ejemplo los cometas y algunos satélites. Así Ganimedes, Calisto, Titán y Tritón, cuatro de los siete satélites mayores, parecen consistir en su mayor parte en hielos.

Rocas. Las sustancias rocosas, un tercer tipo de materia, están formadas por la combinación de silicio y oxígeno, magnesio y otros elementos. Son menos abundantes que los hielos, pero se mantienen compactas mucho más firmemente y no dependen para ello de la gravedad. Los fragmentos más pequeños de materia rocosa pueden mantenerse cohesionados por fuerzas químicas aun en el caso de que la gravedad del objeto sea inapreciable. Las rocas tienen también elevados puntos de fusión, y pueden por ello persistir aun hallándose muy cerca del sol.

Algunos de los cuerpos helados pueden tener núcleos rocosos que contribuyen en menor medida a sus estructuras. Esto puede ser cierto para los grandes satélites, por ejemplo, e incluso para algunos cometas. Los cuerpos pequeños y calientes, como Mercurio y la luna, carecen de gases y de hielos y presentan superficies desnudas de roca. Cuerpos como la luna, Marte e Ío son casi enteramente de roca, si bien Marte es lo bastante frío como para retener algo de dióxido de carbono, e Ío también lo es como para retener algunos hielos que contienen azufre. Europa constituye un caso intermedio, pues posee una considerable cantidad de hielos superficiales que rodean un núcleo de roca igualmente considerable.

Metales. Finalmente, el hierro se mezcla con otros metales para formar una clase de sustancias que es la menos común de las cuatro enumeradas. Puesto que los metales son más densos que las otras clases de compuestos, se hunden hacia el centro del planeta. Muchos de los objetos de roca del sistema solar podrían tener núcleos metálicos relativamente pequeños, pero los únicos mundos que los tienen grandes son la Tierra, Venus y Mercurio.

Como puede verse, todos los objetos del sistema solar, por distintos que parezcan químicamente, podrían muy bien haberse originado a partir de la misma nube de polvo y gas. Las diferencias

que ahora apreciamos constituyen los resultados de diferencias de temperatura y de masa.

66. ¿Cuál es el calor del sol?

Por sorprendente que pueda parecer, los antiguos no insistieron mucho en el calor del sol. Eran tan conscientes de su condición de fuente de luz, que tendían a ignorarlo como posible fuente de calor. Leemos descripciones del dios sol conduciendo su resplandeciente carro, tirado por luminosos caballos, pero no se halla referencia alguna al calor. Los primeros relatos de viajes interplanetarios, por su parte, recogían visitas al sol y a la luna, y mientras que el fulgor del primero se mencionaba, su calor se omitía.

Y, sin embargo, todos sabemos que el día es más caluroso, si luce el sol, que la noche, en la que no hay sol. Que hace más calor en verano, cuando el sol está alto en el cielo, que en invierno, cuando está bajo. Y que hace más calor al sol, en cualquier tiempo, que a la sombra. El problema, pues, no radica en si el sol calienta o no, sino en cómo es ese calor. El mero hecho de que podamos sentir su calor a una distancia de 150 millones de km prueba que se trata de una fuente de calor grande e intensa. Por suerte, no tenemos que introducir un termómetro en el sol para determinar su temperatura. Resulta que tanto la cantidad como la calidad de la luz producida por el sol dependen de su temperatura.

En 1879, el físico austríaco Josef Stefan (1835-1893) demostró que la radiación total de cualquier objeto se incrementa en proporción a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. (La temperatura absoluta es la temperatura por encima del cero absoluto —la temperatura más baja posible—, que es $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Si la temperatura absoluta se duplica, la radiación total se incrementa 2^4 , o sea, 16 veces; si la temperatura absoluta se triplica, la

radiación total se incrementa 3^4 , esto es, 81 veces, y así sucesivamente.

En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien (1864-1928) demostró que la luz emitida por cualquier objeto caliente alcanzaba un máximo de radiación en algún lugar del espectro, y que ese máximo se desplazaba alejándose del límite del rojo en dirección al violeta conforme aumentaba la temperatura. La intensidad máxima de la luz solar se situaba en la región amarilla del espectro, y su localización precisa da la temperatura de la superficie del sol. De este modo, sabemos que dicha temperatura es de unos 6000 °C.

Pero ese dato se refiere sólo a la superficie. En el caso de la Tierra y, como tenemos todas las razones para sospechar, también de otros planetas, la temperatura aumenta con la profundidad. Podría parecer que sucede lo mismo con el sol, sobre todo si imaginamos que nos hundimos bajo su superficie. Puesto que la superficie solar está tan caliente como el centro de la Tierra, y dado que el sol posee una masa mucho mayor y que su centro está sujeto a presiones muchísimo más elevadas que las registradas en la Tierra, cabría esperar que ese centro solar rebasara ampliamente los 50 000 °C que, según se cree, se alcanzan en el centro de Júpiter. Pero ¿en cuánto los rebasaría?

Este problema fue investigado a comienzos de la década de 1920 por el astrónomo británico Arthur Stanley Eddington (1882-1944). Partió de la base de que el sol era una bola de gas, grande y extremadamente caliente, que actuaría más o menos como los gases que podemos estudiar en la Tierra. Bajo la acción de la gravedad, la materia del sol habría de ser atraída hacia dentro. En efecto, si el sol consistiera tan sólo en gas, se colapsaría con rapidez hasta quedar reducido a un tamaño relativamente pequeño debido a la gravedad. (Como ya explicaremos, se dan ciertas condiciones bajo las cuales el sol podría experimentar ese fenómeno). Como por el momento el sol no se colapsa, sino que conserva un tamaño muy superior a lo que la gravedad le impondría,

debe haber alguna fuerza que actúa para expandir la sustancia del sol y para resistir su tendencia a contraerse.

El único fenómeno que Eddington (o cualquier otra persona) podría atribuirle la generación de esa fuerza era el calor. Cuando la temperatura aumenta, los gases expanden su volumen, un hecho conocido a raíz de los experimentos llevados a cabo en la Tierra. Entonces Eddington supuso que el sol permanecía en estado de equilibrio, con un calor interno que actúa expandiéndolo, y una fuerza gravitatoria que actúa contrayéndolo. Gracias a este equilibrio, el sol conserva el mismo tamaño indefinidamente.

Eddington conocía cuál era la fuerza de la gravedad, que se dirige hacia dentro, de modo que solamente precisaba calcular la temperatura necesaria para provocar un empuje hacia fuera equivalente al anterior. Más bien para su sorpresa, descubrió que el centro del sol debía registrar una temperatura de millones de grados; la cifra que suele darse en la actualidad es de 15 000 000 °C.

67. ¿Qué es la corona solar?

Durante un eclipse total de sol, el disco negro de la luna aparece rodeado por una luminosidad perlina llamada corona, que en ocasiones viene marcada por hermosos rayos de luz. Al principio, los astrónomos no estaban seguros de si la luz provenía del sol o de la luna, pero no tardó en quedar definitivamente en claro que procedía del sol.

La corona es en realidad la atmósfera superior del sol, un millón de veces menos brillante que el cuerpo solar propiamente dicho y, por tanto, no visible excepto cuando ese cuerpo queda oscurecido por la luna. Entonces la corona emite una luz que equivale a la mitad del brillo de la luna llena y evita que el mundo quede en oscuridad completa durante el eclipse.

En 1931, el astrónomo francés Bernard-Ferdinand Lyot (1897-1952) inventó el coronógrafo, un instrumento óptico que permitía observar al menos las partes internas y más brillantes de la corona incluso mientras el sol lucía. Ésta fue la prueba final (ya por entonces innecesaria) de que la corona formaba parte del sol.

El espectro de la corona muestra líneas que no se hallaban en ninguna sustancia estudiada en la Tierra. Durante un eclipse solar en 1868, que fue visible en la India, el astrónomo francés Pierre J. C. Janssen (1824-1907) observó esas extrañas líneas y las sometió a su colega el inglés Joseph Norman Lockyer (1836-1920), que era experto en espectros. Lockyer decidió que representaban un elemento desconocido hasta entonces al que llamó helio, palabra derivada de la griega que designa el sol. Su sugerencia no fue tomada en serio hasta que en 1895 el químico escocés William

Ramsay (1852-1916) descubrió helio en la Tierra. El helio es el único elemento descubierto en un cuerpo celeste antes que en nuestro planeta.

Se apreciaban otras extrañas líneas espectrales en la corona, pero no representaban elementos desconocidos. Antes bien, se puso de manifiesto que los átomos contenían cantidades variables de las pequeñas partículas llamadas electrones. Bajo la acción de un elevado calor, algunos de esos electrones se perdían. Los átomos que habían perdido uno o más electrones producían líneas espectrales algo diferentes que las producidas por los átomos intactos, y en 1942 el físico sueco Bengt Edlén (1906-1993) identificó algunas de las líneas espectrales de la corona como átomos de calcio, hierro y níquel que habían perdido algunos electrones. Para que esto se produjera, la temperatura de la corona debía ser elevada, del orden del millón de grados. Este fenómeno lo atestigua la emisión por la corona de la radiación de alta energía llamada rayos X. Sin embargo, la elevada temperatura significa meramente que los átomos individuales o los fragmentos atómicos de la corona son energía muy alta. Pero hay tan pocos, esparcidos por un espacio tan vasto, que el calor total de la corona no es elevado.

La corona solar carece de un reborde externo bien definido, y continúa prolongándose a través de todo el sistema solar, cada vez más delgada, hasta el punto de que es inapreciable su efecto sobre el movimiento de los planetas. No obstante, el calor y la energía del sol conducen hacia fuera y en todas direcciones partículas cargadas. El físico norteamericano Eugene Newman Parker (n. en 1927) predijo ese fenómeno en 1959, y fue realmente detectado más tarde por las sondas cohete, en especial por el Mariner 2, que alcanzó Venus en 1962.

Esta propulsión al exterior de partículas cargadas se conoce como viento solar, que alcanza de 400 a 700 km por segundo. Contribuye a que las colas de los cometas apunten en la dirección opuesta al sol. Sus partículas cargadas también inciden sobre los

planetas donde se acumulan los átomos, y si el planeta tiene campo magnético, como es el caso de la Tierra, las partículas cargadas quedan atrapadas a lo largo de líneas que van del polo norte magnético hasta el polo sur magnético.

Estas partículas cargadas, y que se hallan en la proximidad de la Tierra, fueron detectadas gracias a los cohetes lanzados en 1958 por un equipo bajo la dirección del físico norteamericano James Alfred Van Allen (1914-2006). Al principio se llamaron cinturones de Van Allen, pero ahora reciben el nombre de magnetosfera. Por un momento se creyó que esos cinturones interferirían los vuelos espaciales, pero evidentemente no ha sido así.

Las partículas cargadas penetran en la atmósfera terrestre en las inmediaciones de los polos magnéticos e interactúan con las moléculas que allí encuentran para producir haces de luces de colores, las auroras boreales en el Ártico y las auroras australes en el Antártico.

68. ¿Qué son las protuberancias solares?

En 1859, el astrónomo británico Richard Christopher Carrington (1826-1875) observó cómo surgía un punto de luz, semejante a una estrella, en la superficie del sol. Al principio creyó que podía tratarse de un meteoro incidiendo en dicha superficie, pero en realidad estaba efectuando la primera observación de lo que hoy llamamos una protuberancia solar.

En 1889, el astrónomo norteamericano George Ellery Halle (1868-1938) ideó un instrumento que permitía fotografiar la luz solar mediante una sola línea espectral. Este aparato captaba fácilmente las explosiones de la superficie del sol, y demostró que las protuberancias no eran colisiones de meteoros, sino explosiones asociadas a las manchas solares. Ignoramos cuáles son las causas exactas de las manchas solares y tampoco podemos predecir su aparición, pero generan más energía que el resto del disco solar, relativamente libre de perturbaciones. Las manchas son más frías que el resto (y por eso se ven más oscuras), pero su relación con las protuberancias significa que cuando las manchas alcanzan su máximo, el sol se muestra más activo y energético que cuando están al mínimo.

Las protuberancias solares producen vientos solares particularmente energéticos. Si la protuberancia tiene lugar cerca del centro del disco, en la cara que mira hacia nosotros, las partículas cargadas de energía alcanzarán la Tierra más o menos en un día, y una cantidad inusualmente elevada de ellas penetrará en la atmósfera terrestre en las proximidades de los polos magnéticos. Este fenómeno produce una tempestad magnética, y da lugar a

auroras particularmente brillantes y extensas, interfiriendo la actividad de las brújulas y de las radioondas.

Si esta ráfaga de viento solar toma de improviso a los astronautas, puede matarlos, pues las radiaciones provocan enfermedades. Hasta el momento no se ha dado ningún caso, pero la amenaza de las protuberancias persiste.

69. ¿Por qué no se enfría el sol?

Considerando que ahora conocemos la temperatura del sol, y habida cuenta de su poderoso campo magnético, no habría de sorprendernos la existencia de fenómenos energéticos como una corona excepcionalmente caliente, el viento solar y las protuberancias. Pero ¿por qué el sol no acaba por enfriarse?

Es una pregunta justificada y enigmática. Al fin y al cabo, el sol derrama enormes cantidades de luz y calor sobre la Tierra, pero nuestro pequeño planeta sólo intercepta una mínima parte de toda esa producción de luz y calor: aproximadamente una cienmillonésima. Proporciones asimismo pequeñas son interceptadas por los demás planetas, pero en su práctica totalidad escapa al espacio exterior, más allá de los planetas.

Durante 4600 millones de años, el sol ha estado emitiendo sin cesar esas elevadísimas cantidades de energía, y continúa haciéndolo. En realidad, manifiesta todos los signos de proseguir lo mismo durante miles de millones de años más, sin enfriarse. ¿Cómo es posible?

Esta pregunta no preocupaba a nadie antes del siglo XIX, pues hasta entonces la ley de la conservación de la energía no se comprendía del todo. La creencia más generalizada entre los antiguos era que el sol consistía en un simple globo de luz que lucía eternamente o hasta que los dioses decidieran apagarlo. De la misma manera que había en la Tierra fuentes de luz que continuarían alumbrando mientras se les suministrara combustible. Pero en este caso se trataba de mera luz terrestre; la luz divina se consideraba algo distinto.

En 1854, el físico alemán Helmholtz, habiendo formulado la ley de la conservación de la energía siete años antes, consideró que debía aplicarse al sol lo mismo que a los fenómenos terrestres. Fue, por tanto, el primero en plantear la procedencia de la energía del sol.

Resultaba obvio que no podía provenir de fuentes ordinarias, pues al ritmo que el sol enviaba energía al espacio, si fuera una simple aunque enorme mezcla de carbón y oxígeno se habría consumido por completo 1500 años antes. Todo el mundo sabe que el sol se halla en combustión desde hace mucho más de 1500 años: incluso de acuerdo con la Biblia, llevaría luciendo unos 6000 años. Así que Helmholtz enfocó el problema de otra manera: de dónde la Tierra y otros planetas obtenían su calor.

El sol también se formó probablemente por adición de fragmentos menores. Como es natural, se requirieron muchos más de éstos que para formar cualquiera de los planetas, y durante el proceso mucha más energía cinética hubo de transformarse en calor. Esto último explicaría por qué el sol estaba mucho más caliente que los otros cuerpos de su sistema. Se limitaba a desprender la energía que había ganado en los primeros estadios de su formación.

Helmholtz ignoraba la edad exacta del sol, pero la estimaba en muchos millones de años, y consideraba que el suministro original de energía cinética no hubiera bastado para mantenerlo durante tanto tiempo. Tenía que seguir ganando energía cinética a la vez que perdía energía calórica.

Pensó entonces en la posibilidad de que los meteoritos incidieran continuamente en el sol como lo hacían sobre la Tierra. El sol, en efecto, constituía un blanco mucho mayor y poseía una muy superior fuerza gravitatoria que atraería una abundante cantidad de meteoritos.

Parecía una buena idea, pero no encajaba. Al precipitarse sobre el sol, le añadían masa, que hubiera incrementado su gravedad. No en mucha proporción, pero esta masa adicional habría bastado para

aumentar ligeramente la velocidad de traslación de la Tierra alrededor de su órbita, y acortar la duración del año en una leve aunque mensurable proporción. Pero este acortamiento gradual del año no se producía; por tanto, la teoría de los meteoritos debía desecharse.

Entonces Helmholtz pensó algo mejor. Si el sol se contrajo al formarse a partir de una vasta nube de polvo y gas, ¿por qué no habría de seguir contrayéndose? Calculó que incluso una contracción levísima, lo bastante pequeña como para pasar inadvertida a los instrumentos de la época, aportaría suficiente energía cinética para que el sol se mantuviera. Y no cambiaría la masa del sol ni la duración del año terrestre.

Si así ocurriera, el sol sería ayer ligerísimamente mayor que hoy, y mayor todavía hace un año, etc. Calculando con criterio retrospectivo, Helmholtz pensó que el sol debía de ser lo bastante grande como para cubrir la órbita terrestre hace 25 millones de años, lo cual significaba que la Tierra no podía tener una antigüedad superior a esa cifra.

El dato inquietó a los geólogos, que tenían razones para creer que la edad de nuestro planeta era muy superior, pero ¿acaso podía discutirse la ley de la conservación de la energía?

Por supuesto que la contracción era una explicación insuficiente. Pero hasta el descubrimiento de la radiactividad, que se produjo dos años después de la muerte de Helmholtz (y que ya se ha mencionado antes), los científicos no pudieron comprender que la energía nuclear debía ser la fuente que mantenía el brillo del sol.

70. ¿Cómo la energía nuclear alimenta el sol?

Resulta fácil decidir que el sol es alimentado por la energía nuclear, pero ya no es tan fácil determinar cómo actúa el proceso. Ante todo, ¿de dónde proviene la energía nuclear?

En 1911, el físico inglés Ernest Rutherford (1871-1937), considerando el trabajo que había realizado, el cual incluía el bombardeo de delgados panes de oro con haces de radiaciones cargadas de energía radiactiva, concluyó que la mayor parte de esas radiaciones atravesaban los átomos de oro como si éstos no existieran, pero una pequeñísima proporción rebotaba. De ello dedujo que el átomo no era una pequeña bola desprovista de características propias, sino que tenía estructura. En su centro había un núcleo atómico, cuyo diámetro representaba la cienmilésima del átomo. En la práctica, toda la masa del átomo residía en el núcleo, y en torno a ese centro se disponía uno o más electrones, muy ligeros, a los que ya me he referido. Los electrones constituían la mayor parte del volumen del átomo, si bien eran empujados a la periferia por las radiaciones radiactivas, como si no estuvieran allí.

Las reacciones químicas ordinarias (como la combustión de carbón o petróleo o la explosión de TNT o nitroglicerina) son resultado de desplazamientos de los electrones externos de un átomo a otro. Estos desplazamientos tienden a producir moléculas con menos contenido de energía (de la misma forma que una pelota que rueda cuesta abajo: la pelota tiene menos energía en una posición baja que en una alta). Cuando se produce una reacción química, la energía extra liberada, cuando los reactantes de alta

energía se convierten en productos de baja energía, aparece como luz o calor o fuerza explosiva.

El núcleo atómico también está constituido por pequeñas partículas llamadas protones y neutrones, las cuales, a su vez, se reorganizan de tal manera que su energía también decrece. El exceso de energía se libera entonces como radiación, calor, etc.

Estas reacciones nucleares ocurren con mucha menos frecuencia en la Tierra que las reacciones químicas, y son mucho más difíciles de iniciar, detener o alterar de cualquier forma, de modo que hasta finales del siglo XIX no se tenían en cuenta. Esto era particularmente cierto porque las reacciones nucleares naturales que se producían en relación con la radiactividad eran tan lentas que el total de energía liberada en un tiempo dado era demasiado pequeño para resultar apreciable.

La energía total liberada en una reacción nuclear por una cantidad dada de materia es enormemente superior al total liberado por la misma cantidad en una reacción química. Así pues, aunque las reacciones químicas, e incluso la energía cinética causada por contracciones graduales, son insuficientes para mantener la actividad del sol con carácter indefinido, la energía nuclear sí podría lograrlo. Sólo que los científicos deberían dar con el tipo de reacciones que se operan.

Las reacciones nucleares que se producen espontáneamente en la Tierra afectan a los átomos grandes de uranio y torio. Fragmentos de estos átomos se desprenden en el transcurso de la descomposición radiactiva y se produce energía. Aún más energía se produce si se consigue que los átomos de uranio y torio se rompan más o menos por la mitad en virtud de un proceso conocido como fisión. Pero esta cantidad de energía no basta para alimentar el sol, particularmente habida cuenta de que el sol sólo contiene trazas de esos átomos pesados.

Los átomos de tamaño intermedio, sin embargo, son los que contienen menos energía. En radiactividad ordinaria o en fisión, los átomos «se deslizan cuesta abajo», o sea, que pierden energía,

mientras que los grandes átomos se descomponen en otros menores. Lo mismo ocurriría si átomos muy pequeños se combinaran para formar otros mayores. Supongamos que pudiera conseguirse que átomos de hidrógeno (los más pequeños) pudieran juntarse (mediante fusión) para formar átomos de helio, que son los segundos más pequeños. En este caso, la energía producida por un volumen dado de átomos de hidrógeno sometidos a fusión sería mayor que la producida por idéntica cantidad de átomos de uranio sometidos a fisión.

Puesto que ahora sabemos que el sol está compuesto por tres cuartas partes de su peso en hidrógeno y una cuarta parte de helio, resulta tentador suponer que la energía solar proviene de la fusión del hidrógeno, y que aún queda suficiente hidrógeno para miles de millones de años.

Pero eso es una falacia. Los núcleos de los átomos pesados son extremadamente inestables. Es como si se hallaran en el borde de un acantilado, de tal modo que sólo les falta un mínimo empuje, o acaso ninguno en absoluto, para deslizarse abajo. La fisión es, pues, fácil de iniciar en las condiciones adecuadas. Por otra parte, los átomos de hidrógeno carecen de tendencia natural a fundirse, a menos que sus núcleos estén muy juntos, y esto no ocurre en condiciones ordinarias, porque hay un electrón fuera de cada núcleo de hidrógeno que actúa en cierto modo como un parachoques. Cuando dos átomos de hidrógeno colisionan, sus electrones externos rebotan entre sí, y los dos núcleos situados en el centro de los átomos nunca llegan siquiera a aproximarse.

Esto, sin embargo, es sólo la tendencia natural en condiciones terrestres. En el centro del sol, las temperaturas son tan elevadas que los átomos de hidrógeno son apartados y los núcleos de hidrógeno «vuelan» en derredor por su cuenta. La presión atmosférica es tal, que los núcleos de hidrógeno son impulsados uno junto a otro, y dado que la alta temperatura significa que se mueven mucho más aprisa de lo que nunca se moverían en la

Tierra, se golpean violentamente entre sí con enorme fuerza, lo que determina el desencadenamiento de la fusión.

El físico germanoamericano Hans Albrecht Bethe (1906-2005) ha investigado la fusión del hidrógeno, y ha estudiado las reacciones nucleares que podrían provocarse en el laboratorio. A partir de sus experimentos ha calculado qué podría ocurrir a temperaturas y presiones como las que reinan en el interior del sol. En 1938 había elaborado un esquema de las reacciones nucleares que bastarían para alimentar el sol, y en esencia su teoría ha sido aceptada desde entonces. De este modo, se responde a la pregunta formulada por Helmholtz hace casi un siglo.

71. ¿Hay estrellas que los antiguos desconocían?

Después de habernos ocupado de los planetas y del sol, es tiempo de fijar nuestra atención en el mundo estelar. Empiezo planteando una pregunta que en época antigua y medieval hubiera parecido estúpida, pues entonces se creía que pensar en estrellas invisibles era una contradicción en los propios términos. Las estrellas brillaban y emitían luz, y por tanto debían verse. Además, los dirigentes religiosos del mundo occidental creían firmemente que el universo había sido creado para exclusivo beneficio de los seres humanos. Las estrellas eran útiles para los cálculos astrológicos relativos al futuro y, aparte de esto, resultaban hermosas y dignas de ser contempladas. Unas estrellas invisibles no hubieran sido ni útiles ni hermosas, o sea, que hubieran carecido de propósito; así pues, no podían existir.

Las estrellas, por otra parte, se presentaban con una amplia variedad de intensidades. Las más brillantes lo son tanto, que nadie que no esté ciego puede dejar de verlas. Las más apagadas, en cambio, lucen alrededor de cien veces menos que las de mayor brillo, y sólo pueden distinguirlas las personas dotadas de una vista aguda. ¿No es posible, entonces, que algunas estrellas sean tan apagadas que incluso quienes gozan de mejor vista no consigan divisarlas? Si pensamos un poco, no parece haber razón en contra de que así ocurra. ¿Y por qué la pérdida de brillo habría de detenerse en el punto en que ya no pudiera distinguir la estrella en cuestión la persona dotada de una excelente visión?

La mayor parte de las personas sencillamente no se llegaba a plantear la cuestión. Estaban tan imbuidas de la idea de que las estrellas debían estar al servicio de la humanidad, que la mera posibilidad de que hubiera estrellas invisibles no se tenía en cuenta o, mejor aún, ni se imaginaba.

La introducción del telescopio cambió las cosas. Una lente de telescopio (o un espejo curvo) alcanza mucho más lejos que la pupila humana, y puede captar luz de una superficie mucho más amplia y concentrarla toda en un foco. Ello significa que las estrellas se ven mucho más brillantes a través de un telescopio que a simple vista, y si hubiera una estrella tan apagada como para que el ojo no pudiera distinguirla, un telescopio podría reunir bastante de la luz que emite como para hacerla visible.

Cuando en 1609 Galileo dirigió su telescopio al cielo, descubrió que eso no era exactamente así. Dondequiera que mirase, halló muchas más estrellas de las que podía percibir a simple vista. El cielo parecía lleno de miríadas de estrellas demasiado apagadas como para que el ojo humano las percibiese sin ayuda alguna, pero allí estaban de todas formas, visibles a través del telescopio, lo cual significaba que el universo estaba repleto no con 6000, sino con millones de estrellas.

Este sencillo logro de Galileo tuvo una doble repercusión. Ante todo, se trataba de un descubrimiento más que subrayaba la complejidad del universo y demostraba que éste era mucho más que la simple estructura que se había creído hasta entonces. En segundo lugar, era el primer descubrimiento científico que demostraba sin lugar a dudas que el universo no existía necesariamente sólo para el uso y disfrute de la humanidad. Había miríadas de estrellas que, según parecía, no tenían el menor efecto sobre los seres humanos, y que pese a ello existían. Por vez primera, los hombres pudieron pensar en un universo como algo indiferente a su propia suerte, como algo que podía haber existido antes de que ellos aparecieran en escena, y que podría continuar mucho tiempo después de que se retiraran de esa escena. El

universo ganaba en magnificencia, pero algo en él se volvía más frío y menos amistoso.

72. Las estrellas fijas ¿están realmente fijas?

La respuesta podría ser afirmativa sin la menor duda. ¿Cómo no iban a estar realmente fijas en su sitio? Después de todo, desde que los antiguos sumerios se fijaron en las estrellas y en sus configuraciones, seguimos viendo exactamente las mismas. No se ha producido cambio alguno, así que las llamadas estrellas fijas en verdad están fijas.

Sin embargo, ¿podemos afirmar realmente que algo no está sometido a cambios tan sólo porque nosotros no los percibimos? Algunos cambios se operan con tanta lentitud, que podría parecer que no se producen en absoluto. Suponga usted, por ejemplo, que se pasa medio minuto, más o menos, contemplando la saeta horaria de un reloj. Fácilmente podría llegar a la conclusión de que no se mueve. Si deja de mirar y regresa al cabo de media hora, comprobará que la saeta se ha movido. Cuando usted dejó de mirar señalaba la una, y cuando volvió ya marcaba las dos.

¿Acaso avanzó rápidamente mientras no miraba, o bien se fue moviendo con regularidad, pero demasiado despacio como para percibirlo en tan breve período? Si decide usted armarse de paciencia y no perder de vista la saeta, no durante medio minuto, sino por espacio de quince, llegará a la conclusión de que avanza muy despacio. Si la mira con lupa, percibirá que incluso en el lapso de medio minuto se ha movido ligeramente.

¿Está usted seguro ahora de que las estrellas fijas están fijas de veras? ¿O acaso se mueven tan despacio (mucho más despacio que una saeta horaria) que su movimiento resulta imperceptible a menos que esperemos que transcurran siglos? Aun entonces,

podría no quedar bastante de manifiesto si observáramos el fenómeno a simple vista. Pero el telescopio (al igual que la lupa en el caso de la saeta) puede descubrir los mínimos desplazamientos en la posición.

En 1718, Halley (que había calculado la órbita del cometa que ahora lleva su nombre) comprobaba la posición de las diversas estrellas con ayuda de su telescopio. Encontró que tres de ellas, Sirio, Proción y Arturo, habían cambiado inequívocamente de posición respecto de las que les calcularon los antiguos griegos. Estos últimos, claro está, carecían de telescopio, pero eran unos observadores muy cuidadosos y resultaba inconcebible que hubieran errado hasta aquel punto.

De hecho, esas tres estrellas presentaban unas posiciones ligeramente distintas de las señaladas por Tycho Brahe siglo y medio antes, y las observaciones de este astrónomo eran las mejores disponibles desde antes de los tiempos del telescopio.

Halley sólo podía llegar a la conclusión de que esas tres estrellas se habían movido y habían cambiado de posición respecto de las estrellas de su vecindad, y de que continuaban moviéndose. Lo cual podía ser cierto para todas las estrellas, de manera que las «estrellas fijas» no eran tales: poseían su propio movimiento.

Sin embargo, las tres estrellas identificadas como móviles, aunque se movían muy despacio, necesariamente debían hacerlo más aprisa que otras. Además, esas tres estrellas se contaban entre las más brillantes del firmamento. ¿Existía alguna relación entre movimiento y brillo? En caso afirmativo, los astrónomos habrían de replantearse la naturaleza misma del cielo.

73. ¿Existe una esfera estelar?

Como ya he explicado, los antiguos daban por cierto que el cielo era una esfera delgada y sólida que incluía la Tierra, y en la que había pequeñas y rutilantes estrellas. Hasta 1700, todos los descubrimientos no sirvieron necesariamente para cambiar este punto de vista. Después de Copérnico ya no era posible suponer que la Tierra era el centro del universo, y en torno a la cual todo giraba, sino que estaba claro que el centro era el sol. El cielo seguía siendo una esfera que sostenía las estrellas, pero ahora giraba alrededor del sol y no de la Tierra.

Las órbitas elípticas descubiertas por Kepler acabaron con las esferas cristalinas de los planetas, pero la esfera celeste más externa, la estelar, continuaba aceptándose. Gracias a Cassini, se estableció la verdadera escala del sistema solar, y entonces quedó de manifiesto que era mucho mayor de lo que se había creído. Pero esto sólo sirvió para demostrar que la esfera celeste estaba también más lejos.

En 1718, cuando Halley descubrió que las estrellas fijas no eran tales, los astrónomos se vieron obligados a replantearse sus ideas sobre el firmamento. Podía darse el caso, naturalmente, de que la esfera celeste siguiera existiendo, y que las estrellas se limitaran a deslizarse por la superficie de la esfera muy, muy despacio. Pero ¿por qué sólo unas pocas estrellas se desplazan lo bastante aprisa como para que su movimiento resulte perceptible con el transcurso de los siglos, y por qué esas mismas estrellas resultan ser las más brillantes?

Tal vez unas estrellas sean mayores que otras, y por tanto más brillantes; y cabe que las mayores estrellas estén adheridas a la esfera más firmemente y que por ello se deslicen despacio por ella. Ésta, sin embargo, no es más que una explicación acomodaticia, inventada a propósito para despejar este enigma, aunque no se atenga a la común experiencia y no pueda utilizarse para explicar nada más.

Por otra parte, algunas estrellas podrían hallarse más cerca de la Tierra que otras. Si así fuera, las más próximas parecerían, en general, más brillantes que las situadas más lejos. Entonces, si todas las estrellas se movieran más o menos a la misma velocidad, las más próximas parecerían desplazarse con más rapidez; algo que, como ya he explicado anteriormente, sí se atiene a la experiencia común. Esta explicación pondría en claro por qué las estrellas más brillantes se desplazarían a una velocidad perceptible. Las estrellas más apagadas también se mueven, pero como están muy alejadas, se mueven despacio en relación con nosotros, y su cambio de posición puede pasar inadvertido durante siglos; quizá durante milenios.

Si las estrellas se encuentran a diferentes distancias del sistema solar, la esfera celeste no puede existir. Antes bien, el espacio ha de ser ilimitado, con las estrellas diseminadas por él como las abejas de un enjambre. A partir de 1718, la esfera celeste desapareció del pensamiento astronómico, y tomó su lugar el planteamiento, más grandioso, de un espacio sin límites.

74. ¿Qué son las estrellas?

Al principio se consideraba que las estrellas eran lo que parecen: puntitos de materia reluciente adheridos a un cielo sólido, lo cual era razonable puesto que el universo se creía que era relativamente pequeño, y que el cielo no estaba muy alto. Cada vez se hizo más difícil seguir creyendo que las estrellas eran puntitos a medida que el universo empezó a parecerles a los astrónomos más y más grande.

En la época en que Halley descubrió que las estrellas se movían, estaba claro que incluso las más próximas habían de estar a miles de millones de kilómetros, si es que debía haber sitio en la esfera estelar para el vasto sistema solar. Para que un puntito luminoso sea visible a una distancia de muchos miles de millones de kilómetros, ¿qué tamaño habría de tener? Si pensamos en ello, no podemos evitar llegar a la conclusión de que las estrellas han de ser objetos menores.

La primera persona que tuvo un atisbo de este hecho, en 1440, fue el erudito alemán Nicolás de Cusa (1401-1464). Le pareció que el espacio debía de ser infinito, y que las estrellas habían de estar dispersas por él. Además, cada estrella era un objeto equivalente a nuestro sol, y estaría asociada a planetas, en los que podría haber vida. Con ello se anticipaba a la concepción moderna, pero se trataba de pura especulación y carecía de pruebas convincentes.

Una vez Halley hubo comprobado que las estrellas se movían, parecía inevitable que se impusieran las ideas de Nicolás de Cusa. Halley se preguntó si Sirio, la estrella más brillante del firmamento y por consiguiente la más cercana o una de las más cercanas, no

podría ser en realidad tan luminosa como el sol. Acaso no brillaba más que un punto luminoso sólo porque estaba muy lejos.

¿Cuán lejos tendría que estar un sol como el nuestro para no brillar más que Sirio? Halley efectuó el cálculo y decidió que si Sirio fuese un sol que brillara tanto como el nuestro, su distancia de nosotros sería de 19 billones de km. Recuérdese que un billón es un millón de millones.

Según el cómputo de Halley, Sirio estaba 1350 veces más lejos del sol que Saturno. Las estrellas que brillaban menos que Sirio debían de estar muchísimo más lejos. Una vez más, el concepto de un universo expandido: ahora no se trataba de millones o de miles de millones de kilómetros de diámetro, sino de billones.

75. ¿A qué distancia están realmente las estrellas?

La estimación que hizo Halley de la distancia de Sirio dependía de que fuera tan brillante como el sol. Lo cual constituye una suposición aventurada. En realidad, podía ser menos brillante que nuestro sol o, por el contrario, más brillante. Necesitamos algún procedimiento más directo para determinar la distancia de una estrella, así que vamos a pensar en él.

La distancia de Marte se estimó en 1672 con notabilísima exactitud, observando el planeta desde París y desde la Guayana francesa, y calculando el paralaje. Incluso las estrellas más próximas, sin embargo, es seguro que como mínimo están varios cientos de miles de veces más lejos que Marte. Lo que significa que el paralaje de esas estrellas más próximas sería varios cientos de miles de veces menor. Marte presentaba un paralaje difícil de ser medido, incluso efectuando la observación desde hemisferios distintos, pero el paralaje de una estrella resultaba imposible de determinar.

Pero podía haber una solución a este dilema. La Tierra se traslada en torno al sol, y en seis meses pasa de un extremo al otro de su órbita, una distancia de alrededor de 300 millones de km, o sea unas 23 500 veces el diámetro de la Tierra. Si se observa una estrella desde el mismo lugar el 1 de enero y el 1 de julio, el paralaje sería 23 500 veces mayor que si se observara desde dos lugares opuestos de la misma Tierra.

Pero aun en esas condiciones, el paralaje de una estrella sería muy pequeño, considerablemente menor que el de Marte tal como lo

determinó Cassini. En efecto, cuando Copérnico avanzó por vez primera esta teoría, algunos astrónomos señalaron que las estrellas no mostraban paralaje alguno y que por consiguiente la Tierra no cambiaba de posición, o sea, que permanecía en el mismo sitio. Copérnico respondió a la objeción muy correctamente, aduciendo que desde luego había paralaje, pero que las estrellas se encontraban tan distantes que aquél era demasiado pequeño para ser medido. Y, ciertamente, sin telescopio lo era.

Si las estrellas se hallaran a distancias grandes y diferentes, en principio sus paralajes podrían determinarse, y en el siglo XIX los telescopios se habían perfeccionado al menos hasta el punto de hacer factible el proyecto.

En la década de 1830, el astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) enfocó su telescopio, el mejor construido hasta entonces, hacia una estrella más bien apagada llamada 61 del Cisne (61 Cygni). Pese a su escaso brillo, presentaba el más acusado movimiento propio conocido en aquel tiempo, lo que impulsó a Bessel a dar por seguro, y no se equivocaba en absoluto, que debía hallarse muy cerca, dentro de lo que cabe tratándose de una estrella. Finalmente, en 1838 obtuvo un reducido paralaje y anunció cuál era la distancia de 61 del Cisne. Su primera estimación resultó algo incorrecta, pero era excelente para su tiempo. La estrella 61 del Cisne se encuentra a 105 billones de km de la Tierra.

Muy poco después, otros dos astrónomos observaron también el paralaje de una estrella. Esto no fue una coincidencia, sin embargo, pues a medida que los instrumentos se perfeccionan y, a veces, conforme cambian las actitudes, a menudo es probable que numerosos científicos lleguen a idénticas conclusiones más o menos en el mismo tiempo.

Dos meses después del anuncio de Bessel, el astrónomo británico Thomas Henderson (1798-1844) anunció que la brillante estrella Alfa del Centauro se encontraba a unos 42 billones de km. En realidad había llevado a cabo su trabajo antes que Bessel, pero éste fue el primero en publicar su hallazgo —esto es, informó de él

por escrito—, y al que primero publica le corresponde la prioridad en la atribución del descubrimiento.

Poco después, el astrónomo germanorruso Friedrich G. W. von Struve (1793-1864) demostró que la brillante estrella Vega estaba, para emplear cifras actuales, a 255 billones de km.

Mientras tanto, quedó de manifiesto que Alfa del Centauro es la estrella más cercana a nosotros.

En cuanto a Sirio, resultó hallarse a unos 82 billones de km: poco más de cuatro veces más lejos de lo que estimara Halley. La razón de que este último se hubiera equivocado se debía a que partió de la base de que Sirio tenía el mismo brillo que el sol, cuando en realidad es 16 veces más luminoso.

Estas estrellas están muy próximas a la Tierra. La inmensa mayoría se halla mucho más lejos, de tal manera que sus paralajes no pueden medirse ni siquiera con los mejores instrumentos actuales.

76. ¿Cuál es la velocidad de la luz?

Resulta fastidioso emplear números altos, pues tantos ceros inducen a confusión. Es posible desenvolverse con millones de kilómetros, o incluso con unos pocos miles de millones, cuando se trata de magnitudes correspondientes al sistema solar. Pero cuando nos ocupamos de las estrellas y resulta que tenemos que manejar billones de kilómetros en los casos más simples, podemos preguntarnos si realmente esas cifras resultan útiles.

La cuestión es que los kilómetros fueron concebidos para medir distancias de la Tierra, para nuestro uso cotidiano, pero no resultan aplicables a las enormes distancias astronómicas. Éstas nos imponen, por razones de facilidad, otra unidad de medición; una que se base en la luz.

Para aplicarla habrá que determinar a qué velocidad viaja la luz. Si usted enciende la luz en un rincón de una habitación, ¿cuánto tiempo necesitará esa luz para alcanzar el otro extremo de la estancia e iluminarla a su vez?

A cualquiera que hubiese meditado la respuesta le parecería que la luz viaja de manera instantánea o a infinita velocidad. Al fin y al cabo, cuando usted enciende la luz, cada parte de la habitación se ilumina al instante, e incluso si enciende una potente luz en un gran estadio, todo el espacio queda al punto iluminado.

No obstante, instantáneo e infinito son palabras difíciles, y es posible que esa luz no se difunda de manera instantánea, sino sencillamente en un tiempo muy breve, en un período que en circunstancias ordinarias resulta demasiado corto para ser medido.

Tal vez la luz no viaje a una velocidad infinita, sino tan sólo a una velocidad tal que dé la impresión de ser infinita.

La mejor manera de comprobar esta posibilidad es tratar de hacer viajar la luz a una distancia muy larga. Entonces, el tiempo en que emplea en recorrer esa distancia sí podría medirse. La primera persona a quien se le ocurrió ese experimento fue Galileo.

Él y un ayudante se provieron de sendas linternas, y una noche oscura escalaron dos colinas próximas. Galileo abriría la puertecilla de su linterna, permitiendo que saliera un haz de luz. El ayudante lo percibiría, y de inmediato abriría a su vez la puertecilla de su linterna, emitiendo otro haz luminoso. Galileo conocía la distancia entre las cumbres de ambas colinas, de manera que el tiempo transcurrido entre la proyección de su luz y la visión de la emitida por su ayudante representaría el tiempo que invertía la luz en recorrer dos veces aquella distancia. O sea, de una colina a la otra y regreso.

Se trataba, claro está, de un breve lapso. Parte de él lo constituía el tiempo invertido por la luz en su recorrido, pero otra parte era imputable al tiempo de reacción. Después de todo, el ayudante necesitaba un momento para abrir la puertecilla de su propia linterna.

Galileo repitió el experimento desde otras dos colinas más alejadas. El tiempo de reacción seguiría siendo el mismo, de modo que entre el primer destello y el de devolución no mediaría tiempo adicional alguno; es decir, que el lapso correspondería enteramente al tiempo que tardara la luz en cubrir su recorrido. Tal como lo había previsto, no se registraba tiempo adicional: el transcurrido entre el destello y su respuesta era enteramente tiempo de reacción. La luz viajaba demasiado aprisa para que su velocidad pudiera medirse de esta manera.

Galileo comprendió que era necesario dar con dos colinas que estuvieran mucho más alejadas, pero comprendió también que eso resultaba impracticable. La curvatura de la Tierra determinaría que una cumbre fuera invisible desde la otra. Además, Galileo tampoco

pudo hallar un destello tan brillante como para ser visto desde muy lejos. Claro que si hubiera dispuesto de algún instrumento capaz de medir intervalos extremadamente cortos, hubiera podido proceder a la medición; pero como carecía de él, desistió del experimento.

Casi medio siglo después, el problema quedó resuelto de una manera completamente incidental. El astrónomo danés Olaus Roemer (1644-1710) se dedicaba a estudiar los cuatro satélites de Júpiter. Por entonces, el reloj de péndulo permitía medir el tiempo con gran exactitud, y se conocía cuánto tiempo invertía cada satélite en completar una traslación en torno a Júpiter. En un momento dado, y de forma enteramente regular, cada uno de ellos desaparecía detrás de Júpiter y luego reaparecía por el otro lado.

Pero el fenómeno no se manifestaba con tan absoluta regularidad como se creía. En efecto, durante la mitad del año, los eclipses de los satélites se anticipaban ligeramente a las previsiones. En conjunto, todos desaparecían, pero en ciertas ocasiones los eclipses se adelantaban hasta ocho minutos a lo previsto. La otra mitad del año se atrasaban ocho minutos.

Roemer buscó una explicación, y se dio cuenta de que los eclipses se veían gracias a la luz solar reflejada por Júpiter y sus satélites, luz que viajaba desde ese planeta al nuestro. Puesto que ambos orbitaban en torno al sol, a veces los dos se hallaban exactamente al mismo lado del sol, cuando la luz podía viajar de Júpiter a la Tierra siguiendo la trayectoria más corta posible. Alrededor de doscientos días más tarde, Júpiter y la Tierra se encontraban en lados opuestos con respecto al sol, y la luz del primero tenía que viajar hasta donde hubiera estado la Tierra en caso de hallarse en el mismo lado que Júpiter, y luego cruzar toda la anchura de la órbita terrestre hasta llegar a donde verdaderamente se encontraba nuestro planeta.

La luz necesitaba dieciséis minutos para recorrer la anchura de la órbita terrestre, ocho minutos para llegar desde Júpiter al sol, y otros ocho para alcanzar la Tierra, situada al otro lado. Esta distancia era sin la menor duda mucho más larga que la que

mediaba entre las dos colinas del experimento de Galileo. Las dos «colinas» muy alejadas eran Júpiter y la Tierra, cada una visible desde la otra; la luz era lo bastante intensa como para ser percibida desde ambas, y la distancia cambiaba constantemente con el transcurso del tiempo. Fue, pues, la repetición del experimento de Galileo, sólo que a una escala enorme, y esta vez sí dio resultado.

Roemer anunció sus conclusiones en 1676. No disponía de una cifra exacta para el diámetro de la órbita terrestre, con lo que su cálculo pecó ligeramente por defecto, pero se hallaba en el buen camino. Por vez primera se tuvo la seguridad de que la velocidad de la luz no era infinita, sino que era superior a cualquier otra velocidad jamás medida. Se idearon otros métodos para determinar la velocidad de la luz con más exactitud, y la cifra hoy día aceptada se sitúa un poco por debajo de los 299 800 km por segundo.

77. ¿Qué es un año luz?

¿Cómo puede ayudarnos la velocidad de la luz a determinar la distancia de las estrellas? Supongamos que nos proponemos calcular cuánto viaja la luz en un año. Cada segundo recorre 299 800 km, y cada minuto tiene 60 segundos, cada hora 60 minutos, cada día 24 horas y cada año 364 1/4 días. Lo cual significa que cada año tiene casi 31 557 000 segundos. Multiplicando la distancia que la luz recorre en un segundo por el número de segundos de un año, obtendremos que en un año la luz recorre alrededor de 9,46 billones de km. Esta distancia se denomina año luz.

La estrella más próxima, Alfa del Centauro, se encuentra a 4,4 años luz de distancia. Esto significa que la luz precisaría 4,4 años para ir desde la Tierra a Alfa del Centauro, o viceversa. Lo cual da idea de lo lejos que están las estrellas. Un haz de luz necesita un sesentavo de segundo para viajar de Nueva York a San Francisco, algo más de un octavo de segundo para dar la vuelta al mundo y unos 16 minutos para cruzar la órbita terrestre, pero 4,4 años luz para alcanzar la estrella más cercana.

Sirio se encuentra a 8,6 años luz de distancia; 61 del Cisne a 11,2; y Vega a 27 años luz. Y se trata de las estrellas más próximas.

Aunque los años luz constituyen una manera muy dramática de expresar las largas distancias, los astrónomos no recurren a ellos con tanta frecuencia como antes. En su lugar, miden la distancia en parsecs.

Cada círculo, incluido el enorme círculo que imaginariamente podría dibujarse en el cielo, está dividido en 360 grados y cada

grado en 60 minutos de arco. Esto significa que cada círculo se divide en 1 296 000 segundos de arco iguales.

Si usted imagina una pequeña *o* en el cielo que tuviera sólo un segundo de arco de diámetro, y a continuación imagina toda una serie de esas *oes* puestas en fila y tocándose la una a la otra, de tal manera que recorran el cielo formando una línea, se precisarían 1 296 000 de ellas para completar un círculo en torno al firmamento. Queda claro que cada *o* es pequeñísima.

¿A qué distancia debería estar una estrella para tener un paralaje que se desplazara un segundo de arco desde su posición normal, primero a un lado y luego al otro, mientras la Tierra se traslada alrededor del sol? La respuesta es 3,26 años luz, un paralaje de un segundo *o* parsec (*paralax second*) para abreviar. Ninguna estrella está tan cerca, pues todas las que conocemos tienen un paralaje inferior a un segundo de arco cuando las observamos desde los lados opuestos de la órbita terrestre, que se emplea porque presenta la longitud suficiente como para medir las distancias estelares. Alfa del Centauro está a 1,35 parsecs, Sirio a 2,65, 61 del Cisne a 3,44 y Vega a 8,3 parsecs de distancia. Un parsec equivale a poco más de 30 billones de km.

78. ¿Se mueve el sol?

Desde los tiempos de Copérnico, el sol pasó a considerarse el centro inmóvil del universo. Una vez Halley hubo descubierto que las estrellas fijas se movían, y una vez comenzó a especular sobre si las estrellas son realmente soles localizados a enormes distancias, fue haciéndose improbable que nuestro sol fuese la única estrella que no se movía, y aún más improbable que objetos situados a incontables kilómetros de distancia giraran en torno a nuestro sol como centro de todo.

Si todas las estrellas se mueven, ¿por qué no habría de moverse también el sol? Que sepamos, éste no tiene nada insólito, salvo que se halla más cerca de nosotros que cualquier otra estrella. Así pues, deberíamos aceptar que se mueve y preguntarnos cómo podemos demostrar que se mueve y en qué dirección lo hace.

En 1805, al cabo de más de veinte años de estudio, Herschel (el descubridor de Urano) consideró que tenía la respuesta a esa pregunta. Supongamos que el sol estuviera rodeado de estrellas por todas las direcciones, y todas, como promedio, a igual distancia. Parecería, sin embargo, que las más próximas al sol se hallarían más lejos de él. (Experimentamos este mismo efecto en un bosque, donde los árboles cercanos a nosotros están bien separados, mientras que los situados a lo lejos parecen muy juntos).

Herschel midió los movimientos propios de cuantas estrellas pudo, y encontró que en una dirección concreta las estrellas parecían separarse y moverse hacia un punto determinado en la constelación de Hércules. A este punto Herschel le llamó apex.

Exactamente en el otro lado del firmamento, las estrellas parecían moverse hacia un punto opuesto al apex.

No habría razón para que las estrellas se comportaran de esta manera en concreto si el sol permaneciese quieto. Pero si se diera el caso de que el sol también se moviese hacia el apex, entonces las estrellas próximas a este último se irían acercando a nosotros a medida que el sol se les aproximara, y parecería que se alejaban. Las estrellas del lado opuesto del cielo se alejarían realmente de nosotros a medida que el sol se apartara de ellas, con lo que parecería que se nos acercaban.

Herschel concluyó que el sol se movía en dirección a la constelación de Hércules. Al cabo de miles de años de aceptar que la Tierra era el centro del universo, y después de dos siglos y medio de aceptar que el sol es ese centro, resultaba que, en la medida en que los astrónomos así podían establecerlo, no existía tal centro del universo. Todo estaba en movimiento.

Entre otros pronósticos acertados que hizo relativos al universo, un siglo antes que Copérnico, Nicolás de Cusa sostuvo también que no había un centro del universo.

79. Las leyes de la naturaleza ¿son las mismas en todas partes?

Al tratar del origen del sistema solar, me ocupé de temas como las leyes de la gravedad y de la conservación del momento angular, y del efecto centrífugo. Dije que resultaba útil dar por supuesta la validez de esas leyes porque eran aplicables en la Tierra aquí y ahora.

Pero ¿cómo sabemos que por el hecho de tener vigencia actual funcionaban también hace 4600 millones de años? ¿Cómo sabemos que si algo actúa aquí seguirá actuando en otros mundos? En definitiva, ¿cómo sabemos que las leyes de la naturaleza son las mismas a través del espacio y del tiempo?

¿Por qué habrían de ser diferentes las leyes de la naturaleza según el tiempo o el lugar? Ciertamente no varían de un sitio a otro de la Tierra, y no han cambiado durante los últimos siglos, cuando los científicos han estado investigando los asuntos con detalle.

Este argumento no resulta muy convincente, sin embargo, pues ¿qué son unos pocos miles de kilómetros y unos pocos cientos de años cuando hemos de tratar de distancias de muchos años luz y miles de millones de años?

Pero si las leyes de la naturaleza no fueran universales, nos enfrentaríamos a muchos fenómenos que no podríamos comprender. En el universo reinarían el caos y la anarquía, porque las reglas que creemos conocer no serían ciertas en determinadas condiciones.

Pero sí podrían serlo. Hay, en efecto, muchos fenómenos en el universo que todavía no comprendemos, y quizá nos enfrentemos al

caos y la anarquía. En años recientes, en efecto, los científicos han decidido que algunos aspectos del universo son más caóticos de lo que se había sospechado.

En general, sin embargo, a los científicos les agrada creer que el universo es esencialmente simple, y que las mismas leyes de la naturaleza son válidas en todo él y en cualquier época. Pero ésta es una creencia cómoda. Antes de aceptarla, debemos contar con ejemplos y poseer pruebas.

A finales del siglo XVIII, la generalización más importante acerca del mundo físico que el hombre había descubierto era la ley de la gravitación universal de Newton. No cabía duda de que era aplicable en todo el sistema solar, pues los planetas y satélites se movían en total acuerdo con ella. Cuando resultó que el movimiento de Urano no se conformaba a ella con exactitud, los astrónomos sospecharon que podía existir otro planeta más allá cuyo efecto gravitatorio explicara la discrepancia. Ese planeta, Neptuno, fue buscado y hallado precisamente donde se había predicho.

Mientras se dio por sentado que el sistema solar era en la práctica todo el universo, las leyes universales fueron satisfactorias, pero una vez quedó de manifiesto que las estrellas eran soles localizados a enorme distancia, los astrónomos empezaron a sentirse incómodos. ¿Seguirían siendo aplicables las leyes de la naturaleza a tan inimaginables distancias?

Herschel también respondió a esta pregunta. Buscaba una prueba de la existencia de paralaje entre las estrellas, y se le ocurrió estudiar aquellas que estaban muy cerca unas de otras en el firmamento. En esa época se daba por hecho que todas las estrellas, incluido nuestro sol, estaban aisladas en su esplendor. En consecuencia, si dos estrellas parecían próximas en el cielo, era sólo porque se encontraban en la misma dirección respecto de nosotros, pero una estaba mucho más lejos que la otra. En este caso, la más cercana de las dos podía mostrar un leve paralaje en relación con la otra.

En el caso de esas estrellas encontró que había ligeros desplazamientos en su posición, pero no hasta el punto de apreciarse paralaje. En 1793, se impuso la convicción de que se estaba observando pares de estrellas —estrellas binarias—, próximas en la realidad y no sólo en apariencia, y que giraban la una en torno a la otra. Tales estrellas estaban unidas por la fuerza de la gravedad, y con sus movimientos se podía demostrar que la ley de la gravedad de Newton, que se había deducido del movimiento de la luna alrededor de la Tierra, era aplicable no sólo a todos los cuerpos del sistema solar, sino también a las estrellas distantes.

Éste fue el primer indicio de que las estrellas no existían necesariamente por sí solas; se disponían en parejas, y como se averiguó más adelante, también en asociaciones más complejas. Cuando murió, Herschel llevaba localizadas no menos de ochocientas estrellas binarias. Todas sin excepción obedecían a la ley de la gravitación tal como la formuló Newton y la generalizó Einstein.

Y así ha continuado siendo. En los dos últimos siglos, todos los descubrimientos científicos se han atenido a la noción de que las leyes de la naturaleza se aplican en todos los casos a través del espacio y del tiempo. Podrían darse condiciones especiales de naturaleza extrema en las que las leyes no se cumplieran, pero aún no hemos sido capaces de estudiar adecuadamente esas condiciones. También podría suceder, como los científicos han pensado últimamente, que se dan condiciones caóticas imposibles de predecir o explicar con seguridad, pero tales condiciones caóticas rigen asimismo en todas partes, tanto en la Tierra como en la estrella más alejada.

80. ¿Qué son las estrellas variables?

La creencia aristotélica de que los objetos celestes eran eternos e inmutables parecía razonable. Las estrellas ciertamente semejaban las mismas noche tras noche.

Pero esto no era del todo cierto. Considérese el caso de la segunda estrella más brillante de la constelación de Perseo, Beta de Perseo. Cada dos días y veintiuna horas pierde más de la mitad de su brillo y luego, tras un breve intervalo, lo recupera.

Esto debió de ser observado en época antigua y medieval. La constelación de Perseo muestra a este héroe de los mitos griegos en el momento en que ha cortado la cabeza de Medusa, de cabellos hechos de serpientes. Levanta la cabeza seccionada, señalada como Beta de Perseo, a la que los árabes (y nosotros hoy día) llamaron Algol, que en su lengua significa profanador de tumbas. Pero con anterioridad a los tiempos modernos, nadie mencionó su variabilidad luminosa. Podría muy bien suceder que habiéndose advertido el cambio de brillo, un signo de la impermanencia de los objetos en el cielo, esta particularidad produjera tal incomodidad, que nadie quisiera hablar de ella.

En 1782, el astrónomo inglés John Goodricke (1764-1786), un brillante sordomudo que murió joven, sugirió que Algol era una estrella binaria, y que un miembro de la pareja era más bien apagado. Cada dos días y veintiuna horas, la estrella apagada se colocaba frente a la brillante y la eclipsaba, lo que explicaba la temporal pérdida de brillo. Cuando la estrella tenue se apartaba, el brillo volvía. Goodricke se anticipó a su tiempo, porque la existencia

real de las estrellas binarias aún no había sido demostrada por Herschel. Sin embargo, había acertado plenamente.

Existen numerosas variables eclipsantes como éstas, pero también hay estrellas cuyo brillo cambia con el tiempo de una manera irregular. En 1596, el astrónomo alemán David Fabricius (1564-1617) descubrió una estrella en la constelación de la Ballena (Cetus), Omicron Ceti, cuyo brillo variaba. A medida que los astrónomos continuaron observándola, se percataron de que a veces era lo bastante brillante como para clasificarse entre las cien estrellas más brillantes del firmamento, mientras que en otras ocasiones se apagaba hasta el punto de no ser visible sin el auxilio del telescopio. Esta pérdida y aumento de brillo se produce en ciclos de casi un año, si bien su magnitud es tan irregular que el efecto puede no ser el resultado de un eclipse. La conclusión es entonces que la estrella sencillamente irradia más luz y calor en un momento que en el otro. Se trata de una verdadera estrella variable, y los sorprendidos astrónomos la bautizaron Mira (maravillosa, en latín).

En 1784, Goodricke descubrió otra clase de estrella variable, Delta del Cefeo, en la constelación de este último nombre. Presenta una variación regular de brillo, pero ello no es el resultado de un eclipse, porque el incremento del brillo es rápido y el descenso, lento. (Si fuera el resultado de un eclipse, ese incremento y descenso se registraría en tiempos iguales, como en el caso de Algol).

Se han descubierto centenares de otras estrellas que se ajustan a este mismo esquema de subida y bajada del brillo, y se las ha reunido bajo la denominación común de variables Cefeidas. Algunas Cefeidas completan su variación en tres días, y otras emplean en ella cincuenta días. Como ya explicaré más tarde, resultó que las Cefeidas tuvieron enorme importancia para la medición de grandes distancias.

81. ¿Cómo se diferencia una estrella de otra?

Hasta la Edad Moderna, el principal rasgo diferencial de las estrellas parecía ser el brillo. Hiparco fue el primero en dividir las estrellas en clases según su brillo. Las veinte más brillantes son las de primera magnitud. Luego, en orden decreciente, vienen las de segunda, tercera, cuarta y quinta magnitud, mientras que las de sexta magnitud apenas resultan perceptibles a simple vista.

La brillantez de una estrella puede medirse con tanta exactitud que se llega a los decimales. Así, una estrella puede ser de magnitud 2,3 o 3,6. Cada grado de magnitud representa un brillo 2512 veces el de la siguiente magnitud. Una estrella de magnitud 2,0 es 2512 veces más brillante que una de 3,0, y así sucesivamente.

Algunas de las estrellas de primera magnitud son tan brillantes que pueden asignárseles números de 0 magnitud, o incluso recibir numeración negativa. Sirio, la estrella más brillante del firmamento, tiene una magnitud de $-1,47$. La escala de magnitudes puede también aplicarse a otros objetos aparte de las estrellas. Venus, en su momento de mayor brillo, alcanza una magnitud de -4 ; la luna llena, -12 , y el sol, -26 . El orden de magnitudes puede extenderse a las estrellas más débiles que sólo pueden verse a través del telescopio, de tal manera que las hay de magnitudes 7, 8, etc., hasta 20 y más.

Una estrella puede brillar más que otra no porque irradie más luz, sino porque esté más cerca de nosotros. Una estrella relativamente débil que se halle cerca de nosotros puede parecer

más brillante que otra en realidad mucho más brillante, pero mucho más alejada.

Si conoce usted la distancia de una estrella y su magnitud, puede calcular su brillo real o luminosidad. También puede suponer que cualquier estrella se encuentra a una distancia estándar de 10 parsecs (32,6 años luz) y calcular qué brillo presentaría en el cielo a esa distancia, una medida conocida como magnitud absoluta.

Por ejemplo, si nuestro sol estuviera a 10 parsecs de distancia, tendría una magnitud de sólo 4,6, lo que en verdad no corresponde a una estrella muy luminosa. Sirio, a la misma distancia, tendría una magnitud de 1,3, lo que significa que es considerablemente más luminoso, y hay estrellas que incluso son más radiantes. Rigel, en la constelación de Orión, tiene una magnitud absoluta de $-6,2$, y es unas 20 000 veces más luminosa que el sol. Pero las estrellas muy luminosas son raras. Atraen la atención por su brillo, pero no son numerosas, y alrededor de las nueve décimas partes de todas las estrellas son menos luminosas que el sol.

En 1914, el astrónomo norteamericano Henry Norris Russell (1877-1957) demostró que las estrellas pueden clasificarse en orden progresivo, o al menos el 95% de ellas lo admite. Cuanto más elevada sea la masa de una estrella, más luminosa y caliente será. La mayor parte de las estrellas, ordenadas según su masa desde la más pequeña, fría y apagada, hasta la mayor, caliente al rojo blanco y brillante, pueden disponerse de acuerdo con la secuencia principal.

Eddington, que calculó la temperatura central del sol, explicó la naturaleza de la secuencia principal. Cuanto más elevada es la masa de una estrella, con más fuerza la gravedad atrae su materia hacia dentro, y cuanto más alta es la temperatura central, mejor contrarrestará esa fuerza. Cuanto más alta es la temperatura central, más luz y calor emite la estrella. En otras palabras, cuanto más elevada es la masa de una estrella, más luminosa debe ser: un principio conocido como ley de la masa-luminosidad.

La temperatura de una estrella aumenta más aprisa que su masa, de manera que si posee bastante masa, la temperatura interna es tan elevada y el empuje expansivo hacia fuera es tan poderoso, que la estrella se vuelve inestable y puede llegar a explotar. Por esta razón no es probable que existan estrellas con una masa 60 veces superior a la del sol.

Por otra parte, cuanto menos masa tiene una estrella, menos temperatura se requiere en su núcleo para contrarrestar su modesta gravedad. Si la estrella es lo bastante pequeña, la temperatura en su centro es tan baja que no brilla en absoluto. Un objeto con menos de la décima parte de la masa del sol se oscurecería y no sería una estrella en el sentido usual de la palabra.

Con todo, esas estrellas fallidas pueden tener todavía una masa cien veces superior a la de Júpiter. Serían calientes e irradiarían luz infrarroja, menos energética que la luz visible. Se llaman enanas pardas, y resultan difíciles de identificar, pero los astrónomos las buscan, pues es concebible que puedan existir en gran número y, en tal caso, afecten a la naturaleza del universo. Mientras una estrella mantiene un buen suministro de hidrógeno como parte de su estructura, y continúa produciendo radiación mediante fusión de hidrógeno, permanece en la secuencia principal.

82. ¿Qué sucede cuando descende el suministro de hidrógeno de una estrella?

Una vez los científicos decidieron que las estrellas, incluido nuestro sol, producen su energía por fusión de hidrógeno, ésta se convirtió en una pregunta importante. El sol y las estrellas generalmente contienen una gran cantidad de hidrógeno, pero el suministro no es infinito, o sea, que no durará siempre. ¿Qué pasa entonces, a medida que dicho suministro merma?

Podría parecer que cuando el suministro de hidrógeno empezara a disminuir, una estrella produciría menos energía. Se enfriaría e, incapaz de contrarrestar la fuerza de la gravedad, iría disminuyendo de tamaño hasta convertirse en un objeto frío y denso: una estrella muerta. Realmente eso puede suceder con el tiempo, pero antes de la etapa final de la estrella, ésta debe atravesar una serie sorprendente de estadios intermedios. Esta teoría de la clasificación estelar la formuló por vez primera el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung (1873-1967), quien fue también el primero en avanzar el concepto de magnitud absoluta.

Hertzsprung encontró que algunas estrellas que emitían una luz de un color rojizo tenían elevadas magnitudes absolutas, y sin embargo eran muy débiles. Otras, en cambio, presentaban magnitudes absolutas bajas y eran muy luminosas. Entre unas y otras no halló estrellas de ninguna otra clase.

Si una estrella emite luz rojiza, esto es un signo infalible de que su superficie es relativamente fría, con una temperatura no superior a los 2000 °C. Esta estrella, si pertenece a la secuencia principal, ha de tener una masa baja, y por eso se llama enana roja. Las enanas

rojas abundan en el universo: las tres cuartas partes de las estrellas existentes parecen pertenecer a este tipo.

El enigma lo constituían las estrellas brillantes rojas. Sus superficies habían de ser frías, pues cada unidad de superficie emitía mucha menos luz que cada unidad de nuestro sol, aun siendo aquéllas mucho más luminosas. La única explicación de esto parecía ser que si bien una parte dada de la superficie es débil, hay una enorme cantidad de superficie. En otras palabras, las estrellas brillantes rojas son muchísimo mayores que el sol y destacan por su gran luminosidad. Se las llama gigantes rojas.

Al principio se creía que las gigantes rojas eran estrellas en proceso de condensación; muy jóvenes, destinadas a disminuir de tamaño y ganar calor, y luego continuar condensándose y perdiendo brillo hasta transformarse en enanas rojas. Pero esto no podía ser, porque emiten demasiada luz y calor como para ser simples estrellas en proceso de condensación. Debían tener hornos nucleares situados en sus núcleos. Cuando los astrónomos continuaron estudiando el proceso de la fusión del hidrógeno en el centro de las estrellas, encontraron que las gigantes rojas no estaban en un estadio primitivo de la evolución estelar, sino en uno tardío.

Los astrónomos hallaron que cuando el hidrógeno se funde para dar helio, este último se concentra en el centro de la estrella para formar un núcleo de helio. Entonces la fusión de hidrógeno continúa en la periferia de dicho núcleo, el cual gana masa y compresión y su temperatura va incrementándose lentamente, de manera que con el tiempo una estrella se calienta en lugar de enfriarse.

Finalmente, la temperatura en el núcleo se eleva hasta el punto de que el helio empieza a fundirse en átomos de masa más elevada, como los de carbono y oxígeno. Entonces, el calor producido por la estrella mediante la fusión del helio, al alcanzar el máximo la fusión de hidrógeno que todavía se está operando, aumenta más allá de lo necesario para contrarrestar la atracción gravitatoria de la estrella hacia dentro, y comienza a expandirse. Al hacerlo, las capas

internas se enfrían, al extenderse el calor producido por una superficie cada vez mayor. Cada parte individual de dicha superficie se enfría, con lo que la estrella se vuelve roja, pero el calor dispersado por toda la superficie expandida supera el que reinaba antes de que dicha expansión diera comienzo.

Algunas estrellas se expanden de manera intermitente, alternando los períodos de expansión y contracción una y otra vez, si bien con el tiempo prevalece la expansión. Estas alternancias vienen representadas por las variables Cefeidas. Cuando una estrella se expande para transformarse en una gigante roja, se dice que ha «abandonado la secuencia principal».

La gigante roja mejor conocida es la estrella Betelgeuse, en la constelación de Orión. Se estima que posee un diámetro de 1100 millones de km, o sea 800 veces el del sol. Si Betelgeuse brillara en el lugar del sol, su tamaño sería tal, que su cuerpo expandido abarcaría todos los planetas interiores del sistema solar. Su superficie llegaría más allá de Marte y del cinturón de asteroides.

83. ¿Se convertirá nuestro sol en una gigante roja?

Su suministro de hidrógeno empieza a decaer, pero ello no representa un peligro inmediato, pues el sol seguirá en la secuencia principal durante unos 10 000 millones de años. Dado que sólo cuenta 4600 millones de años, puede afirmarse que es de mediana edad. Por supuesto que cada vez ganará más calor, y durante los últimos mil o dos mil millones de años de su permanencia en la secuencia principal, en la Tierra hará demasiado calor como para que en ella sea posible la vida. Pero eso aún nos deja por delante 3000 millones de años, y es muy dudoso que la especie humana vaya a durar siquiera una pequeña fracción de ese tiempo.

Naturalmente, si sobrevivimos y aprendemos a adaptarnos a las crecientes temperaturas, una vez hayan transcurrido unos 5000 millones de años el sol comenzará a expandirse. Tiene una masa considerablemente menor que la de Betelgeuse, de manera que no se expansionará tanto, pero aun así crecerá lo bastante como para destruir la Tierra. A menos que nuestros lejanos descendientes sean capaces de trasladarse a un sistema planetario que gire en torno a otra estrella o aprendan a vivir en el espacio con independencia de estrellas y planetas, eso significará nuestro fin.

Las distintas estrellas permanecen en la secuencia principal cantidades de tiempo diferentes según su masa. Recuérdese que Eddington descubrió que cuanto más masa tuviera una estrella, mayor cantidad de calor debía producir para contrarrestar su también mayor fuerza gravitatoria, y que la cantidad de calor debía aumentar más de prisa que la masa. Esto significa que una estrella

gigante, con abundante suministro de hidrógeno, debe gastarlo tan aprisa que permanece en la secuencia principal mucho menos tiempo que una estrella enana, la cual consume su menor suministro de hidrógeno en reducidas cantidades. En otras palabras, cuanta más masa tiene una estrella, menos tiempo permanece en la secuencia principal.

Una estrella que tenga la masa de nuestro sol puede mantenerse en la secuencia principal 10 000 millones de años, pero una pequeña gigante roja que presente el mínimo brillo rojizo puede permanecer 200 000 millones de años en la secuencia. Por otra parte, las estrellas muy luminosas no es probable que permanezcan en ella más que unos pocos millones de años.

84. ¿Por qué siguen existiendo estrellas muy luminosas?

Ésta es una buena pregunta. Si las estrellas gigantes tienen una vida muy breve, ¿por qué seguimos viendo un número considerable de ellas en la secuencia principal? ¿Por qué no la han abandonado y se han expandido hace ya mucho tiempo, convirtiéndose en gigantes rojas? Por ejemplo, la estrella Sirio tiene aproximadamente una masa triple que el sol, y gasta su hidrógeno unas veinte veces más aprisa que él. Lo cual significa que debería permanecer en la secuencia principal tan sólo unos 500 millones de años en total. Suponiendo que Sirio se hubiera convertido en estrella a la vez que el sol, hace 4600 millones de años, se hubiera convertido en una gigante roja hace 4000 millones de años, pero en realidad eso aún no ha sucedido.

La única razón que tal vez podamos avanzar para explicar este fenómeno es que Sirio se convirtió en estrella hace menos de 500 millones de años, y que en tan breve lapso aún no se ha transformado en una gigante roja. De manera similar, las estrellas brillantísimas de la secuencia principal que vemos en el cielo hoy día deben haberse formado hace unos pocos millones de años, o de otro modo serían gigantes rojas.

Esto significa que no todas las estrellas se formaron a la vez cuando nació el universo, considerado en su conjunto. Algunas estrellas pequeñas se desarrollaron en los primeros días del universo, y aún podrían seguir hoy día en la secuencia principal, mientras que otras se produjeron en diferentes tamaños y han permanecido en dicha secuencia breves períodos, a veces

cortísimos, para abandonarla luego, en tanto otras estrellas se han formado recientemente.

Estamos muy seguros de que el propio sol no es tan antiguo como el universo. Cuando se creó nuestro sistema solar, el universo ya existía y probablemente se parecía mucho a su aspecto actual. (Más adelante ya nos ocuparemos del tema de la antigüedad del universo). De hecho, no hay razón para suponer que las estrellas no se hallan ahora mismo en proceso de formación.

El problema se centra en la extrema dificultad de captar una estrella en su proceso de formación. En primer lugar, las estrellas se forman en el seno de grandes nubes de polvo y gas, y no resulta fácil penetrar en esas nubes para ver con exactitud lo que sucede en ellas. Por lo demás, la formación requiere un período de tiempo que puede ser muy breve en términos de existencia astronómica, pero muy largo comparado con la duración de nuestras vidas. Si determinadas partes de una nube precisan un millón de años para colapsarse y formar una nueva estrella, resulta evidente que no es mucho lo que hemos podido ver a lo largo de toda la historia de la investigación astronómica desde la invención del telescopio. Pese a ello, los astrónomos están convencidos de que ahora mismo están naciendo nuevas estrellas.

85. ¿Qué es una enana blanca?

Una vez se ha formado una gigante roja, la mayor parte de la energía de fusión disponible, precisa para mantenerla regularmente con vida, se ha disipado, en especial porque ahora gasta más que nunca. Al cabo de unos pocos millones de años como mucho, ya no puede expandirse contrarrestando la fuerza de la gravedad.

Aun no prestando más atención a este fenómeno, podemos comprobar que esto ha de ser cierto, pues si las gigantes rojas permanecieran como tales durante prolongados períodos, acabarían extendiéndose por todo el firmamento. Cada una de las estrellas de elevada masa que hayan existido, con el tiempo se convertiría en una gigante roja y como tal permanecería. Pero lo cierto es que las gigantes rojas son escasas en número, lo cual significa que deben desaparecer (como tales gigantes rojas, en todo caso) tras un relativamente corto período de existencia.

Cuando una gigante roja ya no posee la energía requerida para mantener su expansión, debe colapsarse, aunque no para recuperar el tamaño que tenía como estrella ordinaria en la secuencia principal, sino como una nueva clase de estrella enana. Los astrónomos eran conscientes de la existencia de esas estrellas enanas mucho antes de que llegaran a comprender cómo las estrellas cambiaban con el tiempo (evolución estelar), e incluso antes del descubrimiento de las gigantes rojas.

En 1844, F. W. Bessel, el primer astrónomo que anunció la distancia real de una estrella, estudiaba el movimiento de Sirio. Ordinariamente, las estrellas se mueven muy despacio en línea recta. Pero éste no era el caso de Sirio, que Bessel descubrió que

seguía una trayectoria sinuosa. Bessel se planteó las razones de esta excentricidad, y llegó a la conclusión de que la única fuerza conocida capaz de imprimir a una estrella una trayectoria tan notable era la gravitación de otra estrella.

Supongamos que Sirio no sea una estrella única, sino que se trate de una binaria. Sirio y su compañera se moverían juntas por el espacio, pero si así lo hicieran, también girarían una alrededor de la otra en torno a un común centro de gravedad, y éste marcaría una línea recta a través del espacio. Sirio se hallaría primero a un lado del centro de gravedad, y su compañera, en el otro; y luego intercambiarían sus lugares. Suponiendo que Sirio y su compañera giren en torno a su centro de gravedad cada cincuenta años, y que la masa de Sirio sea unas dos veces y media la de su compañera, eso explicaría la trayectoria ondulante de Sirio.

Pero ¿por qué no podía Bessel ver la compañera? La conclusión lógica era que la compañera era una estrella tenue. En esta época, no se tenía idea de cuál podía ser la fuente de energía de una estrella, pero en cualquier caso Bessel pensó que estaba agotada, y que esa compañera, oscura y fría, pero conservando su masa original, debía girar alrededor del centro de gravedad. Se le llamó por eso la «compañera oscura», y Bessel descubrió más tarde que esa estrella, Proción, tenía a su vez una compañera.

En 1862, el astrónomo norteamericano Alvan Graham Clark (1832-1897), mientras probaba un nuevo telescopio, advirtió un débil fulgor en las proximidades de Sirio. Al principio creyó que se trataba de un halo del telescopio, pero un estudio más atento demostró que estaba viendo una estrella de brillo apagado. En efecto, tenía ante sí la compañera oscura de Sirio, de una magnitud 7,1. No tenía brillo suficiente para ser vista sin telescopio; quizá era 8000 veces menos brillante que Sirio, pero no era fría y oscura. Por eso se la llamó la «compañera débil de Sirio». Se denomina con más propiedad Sirio B. Sirio es Sirio A.

En 1896, el astrónomo germanoamericano John Martin Schaeberle (1853-1924) descubrió la compañera de Proción. Ahora

se llama Proción B, tiene la mitad de masa que Sirio B y aún es menos luminosa.

Ocupémonos ahora de Sirio B. De su efecto sobre Sirio A pudo determinarse que ha de tener una masa más o menos igual que la de nuestro sol, pero su luminosidad es 130 veces inferior.

Pocas décadas más tarde se desentrañó la relación entre masa y luminosidad, que hasta entonces había constituido un enigma, pues una estrella con la misma masa que el sol debía tener su misma luminosidad. A principios del siglo xx, sin embargo, eso aún no se había comprendido, y por tanto no preocupaba a los astrónomos.

Lo que por entonces les inquietaba era que si Sirio B era mucho menos luminosa que el sol, debía ser más fría y emitir una luz roja. En cambio, luce con una luz blanca exactamente igual que la de Sirio A. Se necesitaba disponer del espectro de Sirio B, pues a partir de la distribución de los colores de la luz y de las líneas negras presentes, podría determinarse la temperatura superficial.

En 1915, W. S. Adams, el primero en descubrir dióxido de carbono en la atmósfera de Venus, logró el espectro de Sirio B. Para su sorpresa, halló que la temperatura superficial de Sirio B era de 10 000 °C, lo que significaba que estaba tan caliente como la superficie de Sirio A, y considerablemente más caliente que la temperatura superficial de nuestro sol.

Esto significaba que cada parte de la superficie de Sirio B emitía más luz que las partes correspondientes de la superficie de nuestro sol. ¿Por qué, entonces, Sirio B era mucho menos luminosa que el sol? La única respuesta era que Sirio B disponía de muy poca superficie: era una enana, y una enana particularmente pequeña. Fue la primera estrella que se descubrió de una clase de estrellas calientes al rojo blanco, pero de reducidísimo tamaño, conocidas ahora como enanas blancas.

En este momento sabemos que el diámetro de Sirio B es de sólo 11 000 km, menos, por tanto, que el de la Tierra. Pero debe tener una masa equivalente a la del sol para poder ejercer suficiente

gravitación y forzar a Sirio A a seguir su trayectoria. Así pues, ¿puede una masa igual a la del sol «embutirse» en un volumen propio de un planeta?

Si calculamos la densidad de Sirio B, resulta que es de unos 33 000 000 de g por cm^3 , o sea alrededor de 1 500 000 veces la densidad del elemento osmio, que es la sustancia más densa que conocemos en la Tierra. Además, la gravedad superficial de Sirio B ha de ser 462 000 veces la terrestre.

Pocos años antes del descubrimiento de Adams, esas cifras tan elevadas hubieran parecido sencillamente ridículas, y por ello se hubieran descartado, puesto que desde luego no podría haber algo tan denso. Aunque se sometiera el osmio a enormes presiones, estaba claro que sólo podrían comprimirse sus átomos ligeramente. Pero poco antes del descubrimiento de Adams, Rutherford había demostrado que los átomos consistían en un núcleo central, pequeñísimo, que contenía la práctica totalidad de la masa de ese átomo. A las elevadas temperaturas y presiones del núcleo de una estrella, los átomos se descomponen, y los núcleos atómicos giran a su alrededor libremente, y se comprimen mucho más de lo que sería posible si los átomos permanecieran intactos. Estos átomos descompuestos se llaman materia degenerada.

El sol posee un núcleo de materia degenerada, pero una enana blanca es toda ella materia degenerada. Cuando una gigante roja se colapsa y se convierte en enana blanca, sus capas exteriores, que aún contienen hidrógeno, son desechadas, dejando la estrella rodeada por una bola de gas que se expande en todas direcciones y finalmente desaparece en el espacio exterior. Durante un tiempo, sin embargo, las enanas blancas recién formadas parecen rodeadas por una corona de gas, pues los bordes de la bola absorben más luz que el centro. Lo que vemos entonces se denomina nebulosa planetaria, porque el gas presenta un aspecto como si cubriera una órbita planetaria.

Una vez formada una enana blanca, expande energía con tanta lentitud, que tarda mucho tiempo antes de enfriarse y, en definitiva,

morir. Se cree que no ha existido nunca una enana blanca el tiempo suficiente como para oscurecerse, y que hay tal vez 3000 millones de enanas blancas entre las estrellas del universo, aunque son tan débiles que sólo vemos las que se hallan muy cerca de nosotros.

86. ¿Qué es una nova?

Cuando tratamos de la evolución estelar y de los cambios en la naturaleza de las estrellas individuales, recorreremos un largo camino desde la vieja noción aristotélica de que los cielos son perfectos e inmutables. Sin embargo, dicha evolución es muy lenta, y si nos limitamos a observar las estrellas en el transcurso de una vida humana, o incluso de siglos, apenas advertiremos cambio alguno.

Pero de vez en cuando experimentamos una inequívoca sensación de cambio, pues de repente una nueva estrella aparece en el cielo. La primera observación recogida de una nueva estrella en el firmamento se debe a Hiparco, que se cree vio una el año 134 a. C. en la constelación de Escorpión. No tenemos la completa seguridad de que fuera así, pues la única información del evento se debe a Plinio, autor romano dos siglos posterior.

Tras la decadencia de la astronomía griega en el siglo I, los mejores astrónomos del mundo fueron los chinos, que informaron de diversas estrellas nuevas en el siglo II, todas ellas particularmente brillantes. En 1006 advirtieron una nueva estrella doscientas veces más brillante que Venus, y en 1054 observaron otra que aventajaba en brillo a ese mismo planeta dos o tres veces.

De ninguna de esas estrellas informaron los astrónomos europeos, en parte porque la astronomía europea mantuvo un bajo nivel en esta época, y en parte porque las nuevas estrellas, incluidas las muy brillantes, no resultan fáciles de reconocer cuando no se está observando constantemente el cielo y no se memorizan las formas de las constelaciones. Además, los astrónomos europeos estaban tan seguros de la idea aristotélica de que las estrellas eran

inmutables, que aun en el caso de haber visto lo que hubieran podido creer una nueva estrella, probablemente hubieran dudado de hacer público su hallazgo.

Todas las nuevas estrellas recogidas por los chinos se comportaban como estrellas salvo en una característica: no sólo eran nuevas, sino temporales. Se presentaban como puntos muy luminosos que no se movían respecto de las estrellas vecinas, pero no podían ser meteoros ni cometas. Y cuanto más brillante parecía ser la nueva estrella, más duraba, aunque ninguna permanecía mucho tiempo en el cielo. La nueva estrella de 1006, mucho más brillante que Venus, pudo verse en el firmamento sólo tres años, en cuyo transcurso fue perdiendo brillo de manera paulatina, hasta que acabó por desaparecer.

El cambio se operó en 1572, cuando apareció una nueva estrella en Casiopea. También era varias veces más brillante que Venus, cuando fue avistada. Resultaba visible incluso de día, y en las noches sin luna proyectaba una pequeñísima sombra. Por esta época la astronomía europea se estaba recuperando, y el astrónomo más destacado de su tiempo, Tycho Brahe, vio la estrella y la estudió. La observó todas las noches claras durante dieciséis meses, en cuyo transcurso fue apagándose lentamente hasta que al cabo desapareció. Escribió un libro sobre ella, *De Nova Stella*. Estas estrellas han venido llamándose novae desde entonces.

Otra nueva estrella, aunque no tan brillante, apareció en la constelación de Ofiuco en 1604. La observó y estudió Johannes Kepler.

Cinco años más tarde, se introdujo el uso del telescopio, y poco a poco los astrónomos inventaron toda clase de instrumentos con los que estudiar las estrellas. Pero por un capricho del destino, desde 1604 no ha aparecido en el cielo ninguna que iguale en brillo al planeta más brillante.

Sí han aparecido, desde luego, novae de brillo moderado, y en el siglo XIX fueron observadas varias que semejaban estrellas de primera magnitud, pero no se acercaban al brillo de Júpiter o Venus.

En 1901 apareció una nova en la constelación de Perseo, y por eso se le llamó Nova Persei. Presentaba más o menos el mismo brillo que Vega. Nova Aquilae, observada en 1918, resultó ser la nova más brillante desde 1604, y su fulgor rivalizaba con el de Sirio. Merecen mencionarse también Nova Herculis en 1934 y Nova Cygni en 1975.

Antes de la invención del telescopio, las novas les parecían completamente extrañas a quienes las observaban. No provenían de parte alguna y acababan por diluirse en el espacio. ¿Se trataba acaso de mensajes especiales de los dioses, con el fin de advertir de desastres? ¿Eran señales de que el orden natural de los cielos estaba quebrándose? No es por ello extraño que ninguno de los pocos astrónomos de la Europa medieval llegara a mencionarlas.

Pero el telescopio cambió la situación. Nova Persei, por ejemplo, no se apagó hasta desaparecer; sencillamente se tornó demasiado débil para ser observada a simple vista, aunque siguió perceptible con ayuda del telescopio. Y esto fue cierto también para otras novas del siglo xx. Además, en las fotografías del cielo donde aparecieron posteriores novas, eran visibles estrellas muy débiles en los lugares de las que se daban por desaparecidas.

Al parecer, sucede que una estrella de brillo débil de repente lo incrementa, y durante un breve lapso aumenta su luminosidad cientos de miles de veces, luego palidece y vuelve a ser la estrella apagada que fue antes. Si se toman cuidadosas fotografías de la estrella después de haber pasado por el estadio de nova, se advierten signos de una nube de gas que emerge de la estrella, lo que la hace aparecer como si se hubiera producido en ella algún tipo de explosión que la hubiese devuelto a su existencia ordinaria.

Pero esto sólo sirve para suscitar otra pregunta: ¿por qué una estrella que ha estado brillando regularmente, sin altibajos, durante un período indefinido, de repente estalla?

En 1954, el astrónomo norteamericano Merle Walker, estudiando la estrella pálida que había sido Nova Herculis veinte años antes, halló que se trataba de una estrella binaria —dos estrellas girando

en torno a un centro de gravedad común—, y que una de las dos era una enana blanca. Ésta es la misma situación que se da con Sirio A y Sirio B, pero con la importante diferencia de que éstas se hallan muy alejadas entre sí y nunca se aproximan a menos de mil millones de kilómetros, más o menos, con lo que la traslación mutua se cumple en cincuenta años. Las dos estrellas de Nova Herculis, en cambio, giran la una en torno de la otra en cuatro horas y media aproximadamente, lo que significa que están muy juntas. En efecto, las separa una de sólo 1 500 000 km.

Esto explica que ejerzan un mutuo efecto gravitatorio tan fuerte, y que el hidrógeno gaseoso caliente lo vaya perdiendo poco a poco la estrella mayor y normal, en beneficio de la pequeña enana blanca, con su intensísima gravedad superficial. Si por alguna razón una cantidad de hidrógeno mayor de la usual escapara del interior de la enana blanca y se asentara en su superficie, el intenso efecto gravitatorio de la estrella comprimiría su materia hasta el punto de determinar su fusión instantánea. Ésa sería una tremenda explosión por fusión, y así aparecería una nova.

A partir de 1954 se ha descubierto que todas las novae de brillo medio que podemos estudiar son binarias próximas, y que uno de sus componentes es una enana blanca. Ello significa que con seguridad nuestro sol nunca se convertirá de repente en una nova, por la sencilla razón de que no se trata de una estrella binaria.

87. ¿Qué es una supernova?

Las novas estudiadas en el siglo xx no han sido ni con mucho tan brillantes como las monstruosas observadas por Tycho Brahe y por Kepler, o como las primitivas novas de los astrónomos chinos. En 1934, el suizo Fritz Zwicky (1898-1974) dio el nombre de supernovas a esas novas especialmente brillantes.

El estudio de las supernovas (aparte de su mera observación y la comprobación de su extraordinario brillo) comenzó con el astrónomo francés Charles Messier (1730-1817). Se trataba de un «cazador de cometas» que en ocasiones se vio desorientado por una mancha nubosa en el cielo que resultó no ser un cometa. En la década de 1770, elaboró una lista numerada con la localización de esas manchas para advertencia de quienes, como él, buscaban cometas.

Los objetos repertoriados por Messier se conocen a menudo como M1, M2, etc., numeración que él les atribuyó. Resultaron tener mucha más importancia que los cometas. Por ejemplo, el primer objeto de la lista, M1, es una mancha neblinosa situada en la constelación de Tauro.

M1 fue estudiado con algún detalle en 1944 por el astrónomo británico William Parsons, tercer conde de Rosse (1800-1867). Se había construido un gran telescopio, que resultó inútil porque era muy difícil de manejar, y porque los cielos de su finca de Irlanda, donde lo tenía instalado, raras veces estaban claros. Aun así consiguió estudiar M1, que consideró una turbulenta nube de gas, en cuyo seno había filamentos luminosos retorcidos. Debido a estos filamentos que presentaban una forma tan peculiar, llamó a M1 Nebulosa del Cangrejo, y el nombre prendió.

Fue estudiada de nuevo en 1921 por el astrónomo norteamericano John Charles Duncan (1882-1967), quien encontró que era un poco mayor de lo que Rosse había creído. La nube parecía expandirse, y el también norteamericano Edwin Powell Hubble (1889-1953) sugirió que por su posición la nebulosa del Cangrejo podría muy bien constituir los restos de la explosión que dio lugar a la supernova de 1054. Se midió el ritmo de expansión, y calculando retrospectivamente se determinó que la explosión original sin duda tuvo lugar novecientos años antes.

Así pues, una supernova es el resultado de una explosión estelar, lo mismo que una nova ordinaria, sólo que la explosión es mucho mayor. Pero ¿cuál sería la causa de esa superexplosión?

El primer intento de respuesta data de 1931. Ese año, el astrónomo indio Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), que trabajaba en Gran Bretaña, calculó la posible masa de una enana blanca. Cuanta más masa tuviera, más comprimida estaría, por causa de la fuerza de su propio campo gravitatorio, y Chandrasekhar calculó que más allá de cierto punto se fragmentaría. Ese punto, llamado límite de Chandrasekhar, se alcanzaba cuando la masa estelar era 1,44 veces la del sol. Una enana blanca con una masa superior a esa cifra sencillamente no puede existir.

Este límite no parecía muy importante al principio, pues al menos el 95% de las estrellas existentes tienen una masa inferior a 1,44 veces la del sol. Todas ellas pueden expandirse hasta convertirse en gigantes rojas y luego en enanas blancas sin el menor inconveniente.

Incluso las estrellas de muy elevada masa podrían ser capaces de formar enanas blancas, pues cuando una de esas estrellas se expande para constituir una gigante roja y luego se colapsa, sólo se colapsan las partes internas. Las capas externas quedan inafectadas o son expulsadas, con lo que se forma una nebulosa planetaria. Así pues, parecía natural suponer que con independencia de la mucha masa que pudiera tener una gigante

roja, el núcleo que se contraía siempre sería inferior a 1,44 veces la masa del sol, y formaría una enana blanca sin dificultades. (En realidad, esto no resultó del todo cierto, como pronto explicaré).

Pero supongamos ahora que tenemos una enana blanca cuya masa se acerca a 1,44 la del sol, pero no la alcanza, y supongamos que forma parte de un sistema binario próximo, y que el otro miembro es una estrella normal. La enana blanca atrae materia de la estrella normal y añade masa de ésta a la suya propia. Aunque la masa adicional sea hidrógeno en fusión, se convierte en helio y permanece en la enana blanca. El resultado es que esas enanas blancas aumentan paulatinamente su masa, hasta ganar la suficiente como para rebasar el límite de Chandrasekhar.

Cuando sucede esto, la enana blanca no puede mantener su estructura y explota. La explosión es millones de veces mayor que la de la más notable de las novae ordinarias. Esa supernova brilla por un momento con la luz de unos miles de millones de estrellas ordinarias; luego la luz se va debilitando, y la enana blanca se destruye sin dejar rastro. Esta explosión se traduce en una supernova de Tipo I. También existe una supernova de Tipo II, ligeramente menos brillante.

Está claro que nuestro sol nunca podría ser una supernova. La enana blanca que formaría se situaría muy por debajo del límite de Chandrasekhar, y carece de compañera binaria a cuyas expensas podría ganar masa.

Los espectros de las supernovas de Tipo I muestran que carecen de hidrógeno. Esto es de esperar si están originadas por la explosión de enanas blancas, porque para cuando una gigante roja se colapsa para transformarse en una enana blanca, ha gastado ya la mayor parte de su hidrógeno, y las regiones centrales que desencadenan el colapso ya no tienen ese elemento.

Los espectros de las supernovas de Tipo II, en cambio, demuestran poseer mucho hidrógeno, lo que indica que la explosión afecta a una estrella que aún no ha alcanzado el estadio de enana blanca. Parece ser la propia gigante roja la que explota. Cuanta más

masa tiene la estrella, mayor es la gigante roja que forma y más catastrófico su colapso. Si es lo bastante grande, el colapso se produce tan súbita y drásticamente que todo el hidrógeno que ha quedado en la parte colapsada se comprime, entra en fusión y produce una supernova.

La supernova de Tipo II difiere de la de Tipo I en otro sentido. Mientras que la enana blanca que explota como supernova de Tipo I no deja traza alguna, la gigante roja que explota y se colapsa como Tipo II deja un resto colapsado.

Pero ese resto no se convierte en una enana blanca. Ante todo, si la estrella tiene suficiente masa —digamos al menos 20 veces más que el sol—, el resto que se colapsa sobrepasaría el límite de Chandrasekhar y tendría demasiada masa para convertirse en una enana blanca. O bien el colapso podría ser tan violento, con materia absorbida hacia el interior por la gravitación con tal fuerza, que incluso si la masa de la parte colapsada fuera inferior en 1,44 veces a la del sol, se tornaría compacta más allá del estadio de enana blanca.

Pero ¿qué ocurre si un fragmento de estrella que se colapsa sobrepasa el estadio de enana blanca?

En 1934, Zwicky e, independientemente de él, el físico norteamericano J. Robert Oppenheimer (1904-1967) especularon sobre esta cuestión. Decidieron que una enana blanca debe estar compuesta por núcleos atómicos libres y electrones asimismo libres, y que estos últimos actúan a manera de freno que evita que un colapso llegue demasiado lejos. El freno tiene una capacidad limitada para detener la condensación. Si la masa es demasiado elevada o la fuerza del colapso excesiva, los electrones se ven obligados a combinarse con los protones en los núcleos libres, formando neutrones. Entonces se crea una estrella que consiste enteramente en neutrones, que carecen de carga eléctrica y que se reúnen hasta tocarse entre sí. Una estrella hecha sólo de neutrones puede comprimir toda la masa de una estrella como nuestro sol en

una pequeña bola de no más de 14 km de diámetro. Ésta sería una estrella de neutrones.

Se trataba de una especulación interesante, pero en la década de 1930 no parecía haber forma de que un objeto tan pequeño pudiera detectarse. Si Sirio B era una estrella de neutrones en lugar de una enana blanca, obligaría a Sirio A a seguir una trayectoria sinuosa, pero brillaría con una luz 750 000 veces menos intensa de la que ahora emite. Tendría una magnitud en torno a 20, y apenas se vería con ayuda de los mejores telescopios. En cambio, Sirio B es la enana blanca más próxima a nosotros. Los astrónomos consideraron que cualquier otra enana blanca, si realmente fuera una estrella de neutrones, resultaría del todo inidentificable. Así que la idea se olvidó por espacio de más de treinta años.

88. ¿Tienen alguna utilidad las supernovas?

Los astrónomos creen que las supernovas son vitales; que sin ellas nosotros no estaríamos aquí, que la vida no existiría sobre la Tierra, y que la propia Tierra tampoco existiría. Considérese lo siguiente. Cuando el universo se formó, los únicos elementos que nacieron fueron el hidrógeno y el helio, los dos más simples. (Por supuesto que nadie estaba presente para efectuar esta observación, pero los científicos han calculado las posibilidades, aunque no sin controversia. Los detalles de ningún modo son ciertos, y ya diré algo más al respecto). Las primeras estrellas consistían en hidrógeno y helio, pero las condiciones en los centros de las estrellas permiten formarse aquí los átomos más complicados: carbono, oxígeno, nitrógeno, silicio, e incluso elementos más complejos aún como el hierro. Estos átomos más complejos se localizaban en el centro de las estrellas, e incluso si una estrella se convertía en una gigante roja y a continuación se colapsaba, esos elementos permanecían en el interior del núcleo condensado.

Sólo cuando se producen explosiones de supernovas los átomos complejos se dispersan por el espacio y se añaden a las nubes de gas del universo, formando partículas de polvo. Cuando se forman estrellas a partir de esas «nubes contaminadas», tenemos una estrella de segunda generación que incluye, ante todo, átomos complejos.

Nuestro sol es una de esas estrellas de segunda generación. Cada átomo de la Tierra y de nuestros cuerpos (excepto el ocasional átomo de hidrógeno) formó alguna vez parte del interior de una estrella que más tarde estalló. Sin supernovas, nuestro sol podría

ser meramente hidrógeno y helio, y la Tierra y la vida en ella no existirían.

Hace unos 4600 millones de años, el sistema solar se formó a partir de una nube de polvo y gas que contenía átomos complejos, desarrollados en el interior de las estrellas, y que se habían diseminado por el espacio como consecuencia de las explosiones de supernovas. Esa nube pudo haber existido miles de millones de años. ¿Por qué empezó a contraerse y a condensarse cuando lo hizo?

Realmente ignoramos el porqué, pero una posibilidad es que una supernova cercana emitiera una descarga que comprimió una parte de la nube más próxima a ella. Esto intensificó la fuerza de la gravedad en esa parte de la nube y causó más contracciones, que a su vez dieron origen al sistema solar, incluyendo el sol y la Tierra. Si esto es cierto, una vez más resulta que sin supernovas nosotros no estaríamos aquí.

Además, la evolución biológica debe algo a las supernovas. Cuando los organismos se duplican, no lo hacen necesariamente con toda exactitud, porque si así lo hicieran, las formas más primitivas de vida (los organismos semejantes a simples bacterias) nunca hubiesen cambiado. Pero como sí cambian, con imperfecciones ocasionales, los perfeccionamientos se producen más o menos por accidente y muy despacio, de manera que las formas de vida se vuelven más complejas y se adaptan mejor a su entorno.

Hay varios factores que determinan esas duplicaciones imperfectas, pero acaso las más importantes e inevitables son los rayos cósmicos (de los que ya tendré ocasión de ocuparme más adelante). Estos rayos los producen las explosiones de supernovas, y el hecho de que la vida sobre la Tierra haya evolucionado más allá del estadio bacteriano se debe a esas explosiones.

89. ¿Hay vida en los planetas que giran en torno a otras estrellas?

Con anterioridad, llegamos a la conclusión de que probablemente no hay vida del tipo de la nuestra en el sistema solar, aparte de la Tierra misma. No obstante, los satélites Europa y Titán pueden ser candidatos muy idóneos a albergar vida. Entonces, podemos preguntarnos si acaso la hay en los planetas que giran en torno a otras estrellas.

Antes de tratar de responder, debemos interrogarnos sobre si hay, en efecto, planetas que giren en torno a otras estrellas. Hace más de quinientos años, Nicolás de Cusa dio por supuesto que así era. Los astrónomos modernos creen que es probable que estuviera en lo cierto, pues si nuestro sistema solar se formó a partir de una nube de polvo y gas que, automáticamente, formó a su vez los planetas, eso sería cierto para muchas otras estrellas e incluso, quizá, para todas las estrellas.

Pero éste es un razonamiento arriesgado. Sería mucho mejor descubrir realmente una estrella, aparte de nuestro sol, que tuviera un sistema planetario. Por desgracia, incluso con nuestros instrumentos actuales no podemos distinguir planetas en torno a otras estrellas. Para que un planeta resultara visible, debería estar a 4,4 años luz de distancia, pero aunque se trasladara en torno a la estrella más cercana y brillara sólo con la luz reflejada de esa estrella, no sería lo bastante luminoso como para ser visto a esa distancia. Pero aun en el supuesto de que lo fuera, la luz mucho más brillante de la estrella cercana enmascararía su presencia. (Los cuatro grandes satélites de Júpiter brillan lo bastante como para ser

percibidos a simple vista, pero la luz mucho más intensa de ese planeta los borra, y sólo podemos verlos con ayuda del telescopio).

Ésta es una respuesta, desde luego. Sirio B fue descubierto por Bessel porque su fuerza gravitatoria forzaba a Sirio A a seguir una trayectoria sinuosa, no porque se viera a través del telescopio. ¿Puede aplicarse este caso a un planeta o grupo de planetas con respecto a las estrellas en torno a las cuales giran?

En teoría sí, pero el efecto sería extremadamente pequeño. Después de todo, Sirio B tiene la masa del sol, mientras que un planeta todo lo más tendría una masa mil veces inferior. Si hubiera más de un planeta, estos objetos se distribuirían en torno a la estrella, y el efecto gravitatorio quedaría anulado en parte, a menos que un planeta tuviera una masa superior a la del resto considerado en su conjunto (como es el caso de nuestro propio sistema planetario).

La mejor oportunidad para identificar un planeta fuera de nuestro sistema solar es elegir una estrella que se encuentre muy cerca de nosotros, de manera que podamos medir cualquier desviación de su trayectoria con la mayor exactitud. La estrella habría de ser pequeña, para que un planeta pudiera afectar suficientemente su movimiento, y éste a su vez habría de ser muy grande, para que produjera un efecto considerable.

El astrónomo holandés-americano Peter Van de Kamp (1901-1995) se dedicó a investigar las pequeñas estrellas próximas con ese propósito concreto. Descubrió irregularidades en el movimiento de estrellas cercanas como 61 del Cisne, Lalande 21 185 y, en particular, la Estrella de Barnard.

Esta última recibió su nombre del astrónomo Barnard, quien en 1916 fue el primero en percatarse de que poseía el movimiento propio más rápido entre las estrellas conocidas. Y hoy día sigue manteniendo el récord. Recorre una distancia igual al diámetro de la luna llena en 180 años, lo que significa una gran rapidez para una estrella. En parte, la razón de que sea así es que se trata de la segunda estrella más próxima a nosotros: está a sólo 5,97 años luz.

Además de estar muy cerca, es muy pequeña, pues se trata de una enana roja débil. Van de Kamp creyó que a partir de su movimiento había descubierto un planeta del tamaño de Júpiter girando en torno a ella. Descubrió planetas grandes similares relacionados con las otras estrellas que estudió. Pero su trabajo se desarrollaba en el límite mismo de la capacidad de los instrumentos, por lo que los astrónomos posteriores han decidido que sus resultados no son fiables.

Por otra parte, en los dos últimos años se han encontrado algunas estrellas brillantes, rodeadas de franjas de polvo. Resulta difícil evitar pensar que puede tratarse de cinturones de asteroides, y allá donde existen asteroides también debe haber planetas grandes. Pese a todo, aún no se ha observado planeta alguno trasladándose en torno a otras estrellas, y debemos contentarnos con razonar que las posibilidades de que existan son muchas.

Pero si hay tales planetas girando en torno a la mayoría de las estrellas, ¿significa eso que hay posibilidad de vida en ellos?

Ciertamente, la vida no puede existir en ningún mundo que forme parte de otro sistema planetario, lo mismo que no puede existir en ningún mundo de nuestro propio sistema. El planeta en cuestión debe ser adecuado para albergar vida.

En primer lugar, un planeta ha de seguir una órbita razonablemente estable. Si la tiene errática, puede haber ocasiones en que la temperatura se eleve por encima del punto de ebullición del agua, y otras en que la temperatura caiga a niveles propios de la Antártida, con lo que no habría muchas oportunidades de hallar una vida floreciente tal como la concebimos. Además, un planeta debería tener la masa suficiente para retener una atmósfera y un océano, pero no tanta como para captar hidrógeno y helio.

Aun admitiendo que un planeta tenga el tamaño y la composición química adecuados, y siga una órbita estable y ni muy cerca ni muy lejos de su estrella, de tal manera que la temperatura permita mantenerse siempre el agua en estado líquido (lo que es el caso de la Tierra, excepto en las regiones polares), la existencia de vida

dependería en gran medida de la clase de estrella en torno a la que girase. Las estrellas con una masa muy superior a la del sol, por ejemplo, no serían muy aptas para tener planetas. Su paso por la secuencia principal sería demasiado breve. Al fin y al cabo, aquí, en la Tierra, los organismos tan avanzados como los primitivos moluscos no aparecieron hasta que la vida llevaba 3000 millones de años de existencia en el planeta. Si éste es el ritmo normal de la evolución, un planeta que gire alrededor de una estrella como Sirio nunca podría tener una vida avanzada más allá de la forma más simple de bacterias, pues al cabo de sólo 500 millones de años Sirio se convertiría en una gigante roja y destruiría el planeta.

Además, si una estrella es muy pequeña y apagada, el planeta debería estar muy cerca a fin de obtener suficiente luz y calor como para sostener la vida tal como la conocemos. Pero a tan corta distancia, los efectos de marea determinarían que el planeta presentara siempre la misma cara a su sol, con lo que medio planeta sería demasiado frío y la otra mitad, demasiado caliente.

En otras palabras, necesitamos estrellas más o menos del tamaño de nuestro sol.

Una vez más, tales estrellas no pueden formar parte de binarias próximas ni pueden hallarse en regiones donde haya demasiada radiación energética procedente de las estrellas de los alrededores. Supongamos que decidimos que sólo una entre trescientas estrellas tiene una oportunidad de poseer un planeta hospitalario para nuestra forma de vida, y que sólo una entre trescientas de esas estrellas tiene un planeta del tamaño, la composición química y la temperatura adecuados para mantener realmente la vida. Esto podría significar todavía la existencia de millones de planetas capaces de sustentar vida, repartidos entre las diversas estrellas.

No obstante, ¿cuáles son las posibilidades de que uno de esos planetas haya desarrollado vida inteligente, capaz de crear tecnología, como nosotros?

Esta pregunta no admite respuestas optimistas. Después de todo, la Tierra hubo de existir 4600 millones de años antes de que

apareciera una forma de vida capaz de desplegar dicha tecnología.

Aun si las posibilidades de que así sea resultan escasas, podría haber millares de tecnologías en las estrellas, pero eso plantea otra pregunta, todavía más difícil: ¿cuánto tiempo pueden durar tales tecnologías?

Los seres inteligentes pueden aprender a disponer de grandes fuentes de energía y usarla con fines de autodestrucción. Es cierto que ahora la humanidad ha desarrollado tecnologías avanzadas, que hemos empezado a utilizarla en guerras devastadoras, y que estamos inmersos en un proceso de destrucción de nuestro ambiente. Si esto es lo típico, el universo podría estar lleno de planetas susceptibles de albergar vida, cuyos habitantes aún no se han hecho con una tecnología, o bien sí han conseguido una tecnología avanzada y se han destruido a sí mismos. En tales condiciones habría poquísimos, aparte de nosotros mismos, que hubieran conquistado la tecnología y aún no hubieran tenido tiempo de autodestruirse.

Hacia 1950, el físico italonorteamericano Enrico Fermi (1901-1954) se planteó esta pregunta: ¿dónde están? Con ello quería significar que si las estrellas son ricas en tecnologías, ¿por qué ninguna forma de vida ajena ha llegado hasta nosotros? (No podemos tomar en cuenta relatos de platillos volantes ni de astronautas en tiempos antiguos, porque las pruebas en su favor son debilísimas).

Tal vez los alienígenas no han aparecido porque las distancias entre las estrellas son demasiado grandes para salvarlas, o acaso porque, habiendo llegado hasta nosotros, han decidido dejar que nos desarrollemos en paz o no han conseguido mostrarse por un cúmulo de razones. Y tampoco podemos asegurar que, sencillamente, no haya tales alienígenas y que no haya humanidad en ningún otro lugar fuera de la Tierra.

Algunos astrónomos se muestran dispuestos a buscar pruebas de la existencia de civilizaciones extraterrestres, tema éste sobre el que volveremos.

90. ¿Qué son los cúmulos globulares?

Las estrellas no tienen por qué existir aisladas, como es el caso del sol. Herschel descubrió las estrellas binarias, y hay pruebas de que más de la mitad de las estrellas del cielo pertenecen a sistemas binarios.

Las estrellas también existen como parte de complejas acumulaciones. Aun antes de la introducción del telescopio, los hombres admiraban las Pléyades, un grupo de estrellas situado en la constelación de Tauro. Las Pléyades incluyen seis estrellas que pueden percibirse a simple vista, aunque algunos identifican una séptima. Cuando Galileo dirigió su telescopio a las Pléyades en 1610, pudo contar 36 estrellas, y las modernas fotografías muestran más de 250.

Pero las Pléyades sólo representan un pequeño cúmulo. El cambio decisivo en la consideración del tema lo produjo la lista de Messier, a la que ya me he referido antes. La primera entrada de dicha lista, esto es, M13, correspondía a un objeto borroso en la constelación de Hércules. Cuando William Herschel lo estudió unos veinte años más tarde, sirviéndose de un telescopio mucho mejor que el empleado por Messier, descubrió que se trataba de un gran cúmulo de estrellas dispuestas muy juntas. Ahora se conoce como el gran cúmulo de Hércules, y ha de contener como mínimo 100 000 estrellas. Como el cúmulo afecta forma de globo, constituye un ejemplo de lo que se llama cúmulo globular. En la actualidad se conoce alrededor de un centenar de tales cúmulos.

Los cúmulos globulares se distribuyen con extraña asimetría. El astrónomo británico John Herschel (1792-1871) señaló que, en

efecto, no se distribuían de manera uniforme en el firmamento; casi todos estaban localizados en una parte del mismo y prácticamente en ningún otro lugar. De hecho, una tercera parte de los cúmulos globulares se encontraba en la constelación de Sagitario, que ocupa sólo un 2% del firmamento.

Esta observación, como no tardaremos en comprobar, resultó ser de la mayor importancia.

91. ¿Qué son las nebulosas?

No todo el cielo consiste en estrellas o cúmulos estelares.

En 1694, Huygens vio y describió una región brillante y borrosa en la constelación de Orión. Presentaba el aspecto de una nube brillante, y fue bautizada con el nombre de nebulosa, de la palabra latina *nebula*, que significa sencillamente nube. La nebulosa descrita por Huygens se conoce ahora como nebulosa de Orión. Sabemos que se trata de una gran nube de polvo y gas de unos 30 años luz de anchura. Si todo nuestro sistema solar, desde el sol hasta el cometa más alejado, se incluyera en la nebulosa de Orión, quedaría perdido en medio de la inmensidad de la nube, e incluso nuestro sol y una docena de sus estrellas más próximas podrían caber holgadamente. De hecho, la nebulosa de Orión incluye muchas estrellas, y éstas son las que explican su brillo debido a la luz reflejada.

En 1864, el astrónomo británico William Huggins (1824-1910) consiguió estudiar el espectro de la nebulosa de Orión. Éste mostró líneas brillantes individuales sobre un fondo oscuro, que cabría esperar fuese gas caliente, y quedó confirmada la suposición de que la nebulosa era una gran nube (quizá del mismo tipo a partir del cual se formó nuestro sistema solar). Los astrónomos están razonablemente seguros de que en la nebulosa de Orión se están formando en este momento nuevas estrellas. Han sido descubiertas muchas otras nebulosas brillantes, de formas muy distintas y algunas de notable belleza.

Pero una nebulosa no ha de ser necesariamente un objeto brillante. Si no contiene estrellas se llama nebulosa oscura.

Herschel, por ejemplo, identificó pequeñas áreas oscuras en regiones por lo demás cuajadas de estrellas; áreas en las que no lucía estrella alguna. Le desconcertaron, y pensó que podían ser como túneles vacíos de estrellas, cuyas bocas, por así decirlo, daban frente a nosotros. Pero había tantas, que la explicación parecía inadecuada, pues no podía haber tantos túneles, y todos ellos con la boca orientada hacia nosotros.

Hacia 1900, E. E. Barnard, e independientemente de él Max E. J. C. Wolf (1863-1932), astrónomo alemán, sugirieron que los túneles eran nebulosas oscuras que impedían la difusión de la luz de estrellas situadas detrás. Al parecer, los cielos estrellados estaban llenos de nubes de polvo que ocultaban en alguna medida el esplendor del universo. Un hecho que resultó tener un gran significado en nuestra interpretación de cómo se distribuyen las estrellas en el espacio.

92. ¿Qué es la Galaxia?

Si nos limitamos a estudiar el cielo a simple vista, nos parecerá que vemos estrellas por todas partes. No hay zonas que parezcan especialmente llenas de estrellas, y ninguna que esté vacía. De ahí podemos concluir que las estrellas están distribuidas en torno a nosotros regularmente en todas direcciones, y si las estrellas como un todo forman un conjunto provisto de forma, esa forma debe ser una esfera. Esto también tiene sentido porque todos los objetos astronómicos de cierto tamaño parecen esféricos. ¿Por qué, entonces, el universo como un todo no habría de ser también esférico?

Lo que vemos a simple vista son sólo 6000 estrellas, todas las cuales están más bien próximas a nosotros. ¿Qué ocurre si se emplea el telescopio? La respuesta es que vemos muchísimas estrellas más, pero también parecen estar distribuidas con regularidad alrededor del cielo, salvo en el caso de la Vía Láctea.

A simple vista, la Vía Láctea es una franja débilmente luminosa (que hoy día difícilmente vemos si vivimos en las ciudades, debido a que el cielo brilla a causa de la iluminación artificial). Tiene la apariencia de un desvaído reguero de leche: un mito nos explica que una vez, cuando Hera, esposa de Zeus, amamantaba a uno de sus hijos, parte de su leche se derramó por el cielo y formó la franja de luz apagada que conocemos. Los griegos la llamaron *galaxias kyklos* (anillo de leche) y los romanos, *via lactea* (camino de leche), nombre que hemos tomado en español.

Pero ¿qué es, en realidad, la Vía Láctea? Si prescindimos de la mitología, podemos empezar con el filósofo griego Demócrito (h.

470-h. 380 a. C.), quien sugirió, hacia 440 a. C., que realmente estaba constituida por un elevado número de estrellas de escaso brillo que no podían distinguirse una por una, pero que en conjunto daban lugar a una atenuada luminosidad. Nadie prestó atención a este punto de vista, pero resultó ser perfectamente adecuado. Esto quedó probado cuando Galileo dirigió su primer telescopio al firmamento en 1609 y encontró que la Vía Láctea contenía miríadas de estrellas.

¿Qué hay que entender por «miríadas»? La primera impresión que tienen las personas cuando miran el cielo nocturno es que las estrellas son innumerables, que son demasiadas para contarlas. Pero como ya he dicho en más de una ocasión, el número total de estrellas visibles a simple vista es sólo de unas 6000. A través del telescopio, sin embargo, se perciben muchas más. ¿Significa eso que, después de todo, sí son innumerables?

Las estrellas situadas en la dirección de la Vía Láctea son en verdad numerosísimas, pero en otras direcciones aparecen comparativamente dispersas, lo cual significa que debemos abandonar la idea de que el conjunto de las estrellas forma una estructura esférica. En caso de ser así, las estrellas serían igual de numerosas en todas direcciones, como sucede en la Vía Láctea, y todo el cielo presentaría una débil luminosidad, con las estrellas más próximas luciendo (menos espectacularmente que ahora) sobre ese fondo.

Debemos suponer, entonces, que las estrellas existen agrupadas en un vasto conglomerado que no afecta forma esférica, sino que se extiende en la dirección de la Vía Láctea, abarcando distancias mayores que si presentara otra forma. Podría darse el caso de que la Vía Láctea señale que todas las estrellas están agrupadas en forma lenticular, o sea, de hamburguesa. El conglomerado con esta peculiar forma se llama Galaxia (de la expresión griega que designa la Vía Láctea), mientras que la denominación Vía Láctea se reserva para la franja de luz tenue que vemos rodear el cielo.

La primera persona que sugirió que las estrellas existen en una galaxia aplanada fue el astrónomo inglés Thomas Wright (1711-1786). Así lo manifestó en 1750, pero sus ideas parecieron tan confusas y místicas, que pocos fueron los que les prestaron atención al principio.

Por supuesto que si la Galaxia tuviera forma lenticular podría crecer de manera indefinida por su diámetro mayor. Podría haber relativamente pocas estrellas si se mirara desde la Vía Láctea, pero innumerables en la dirección de la propia Vía Láctea.

Para zanjar la cuestión, William Herschel emprendió la tarea de contar las estrellas. Naturalmente carecía de sentido pretender contarlas todas, en un período razonable de tiempo. Lo que hizo Herschel fue escoger 683 pequeñas regiones, bien apartadas unas de otras en el cielo, y contar las estrellas visibles al telescopio en cada una de ellas. De esta manera, tomó lo que hoy se llamaría un «muestreo» del cielo. Éste fue el primer caso de aplicación de la estadística a la astronomía.

Herschel encontró que el número de estrellas en cada región se iba incrementando a medida que se aproximaba a la Vía Láctea en cualquier dirección. A partir del número de estrellas contado, pudo efectuar estimaciones como el número total de estrellas de la Galaxia, y cuál podía ser el tamaño de ésta. Anunció los resultados en 1785, y sugirió que el diámetro mayor de la Galaxia era unas 800 veces la distancia entre el sol y Sirio, y que el diámetro menor era 150 veces esa distancia.

Una vez estuvo calculada la distancia real de Sirio, medio siglo después, quedó de manifiesto que para Herschel la Galaxia medía 8000 años luz de diámetro mayor y 1500 de diámetro menor. También calculó que contenía 800 millones de estrellas. Se trata de un número elevado, pero no imposible de contar.

En los dos siglos últimos, los astrónomos han examinado la Galaxia con instrumentos muchísimo mejores que aquellos de los que disponía Herschel, y con técnicas también mejores, y ahora sabemos que la Galaxia es mucho mayor de lo que pensó Herschel.

El diámetro mayor se extiende al menos por 100 000 años luz, y la Galaxia podría contener 200 000 millones de estrellas. De todas formas, a Herschel le corresponde el mérito de haber descubierto en cierto modo la propia Galaxia, y de haber demostrado que las estrellas no son innumerables, sino que pueden contarse.

93. ¿Dónde está el centro de la Galaxia?

Desde que en 1805 Herschel descubrió que el sol se movía respecto de las estrellas próximas, se dio por supuesto que el sol no era el centro inmóvil del universo. Y, sin embargo, parecía haber un punto central o casi central por lo menos en lo concerniente a la Galaxia.

La Vía Láctea está casi uniformemente iluminada en derredor del cielo, de lo que parece deducirse de manera razonable que el sol está situado en las proximidades del centro. En efecto, si se hallara a un lado, la Vía Láctea parecería más ancha y brillante en una dirección que en otra. Mirando desde el centro hacia el límite más cercano de la Galaxia, veríamos relativamente pocas estrellas. Hacia el centro, por otra parte, tendríamos ante nosotros el otro y lejano extremo, en el que parecería haber un abundante número de estrellas.

Pese a lo razonable que parezca, esta visión de que el sol debe estar en el centro de la Galaxia, o en sus proximidades, no prevaleció. De ser cierta, no sólo todas las estrellas de la Vía Láctea estarían uniformemente distribuidas en derredor nuestro, sino que cada uno de los demás aspectos de la Galaxia deberían ser también simétricos, lo cual no sucede. Después de todo, está la materia de los cúmulos globulares, de los que me he ocupado algo más atrás. Casi todos ellos están en un lado del firmamento, y un tercio se localiza tan sólo en la constelación de Sagitario.

¿Por qué tan peculiar asimetría? La respuesta empezó a conocerse en 1912, cuando la astrónoma norteamericana Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) estudiaba las nubes de Magallanes. Éstas

consisten en dos manchas brillantes, la Gran Nube de Magallanes y la Pequeña Nube de Magallanes, que semejan partes desprendidas de la Vía Láctea. Sólo pueden verse desde el Hemisferio austral, y reciben su nombre del primer europeo que las divisó, Fernando de Magallanes, el descubridor del paso situado en el extremo meridional de Sudamérica en 1521, y que hoy conocemos como estrecho de Magallanes.

John Herschel había estudiado esas nubes desde un observatorio de Sudáfrica en 1834, y descubrió que, al igual que la Vía Láctea, estaban compuestas por grandes concentraciones de estrellas. Las nubes de Magallanes se extienden por muchos años luz en el espacio, pero se hallan tan lejos de nosotros que todas sus estrellas puede considerarse que están más o menos a la misma distancia de la Tierra (de la misma manera que si bien las personas están ampliamente distribuidas por la ciudad de Chicago, todas ellas se encuentran a la misma distancia aproximada de París).

La Pequeña Nube de Magallanes contiene numerosas variables Cefeidas, del tipo de estrella variable descubierta por John Goodricke en 1784, todas las cuales se localizan aproximadamente a la misma distancia de nosotros. Las variables Cefeidas se presentan en grados cambiantes de brillo, característica determinada por dos factores: masa y distancia. Después de todo, el brillo se incrementa con la masa de una estrella y decrece con la distancia respecto a nosotros. Sin embargo, una Cefeida insólitamente brillante puede tener al mismo tiempo una elevada masa o hallarse muy cerca de nosotros, y por lo general es imposible decir qué alternativa es la cierta. Pero dado que todas las variables Cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes se consideran más o menos a la misma distancia de nosotros, en este caso puede prescindirse del factor distancia. Si observamos que una Cefeida es más brillante que otra en esa nube, sabemos que cuanto más brillante es una de las Cefeidas, sin duda será la que más masa tenga de las dos, y en realidad será la más luminosa.

Leavitt descubrió que en la Pequeña Nube de Magallanes, cuanto más brillante y luminosa era la Cefeida, más prolongado era su período de variación.

Suponga entonces que halla usted la distancia de una Cefeida en concreto y mide su período. A partir de esos factores, estaría usted en condiciones de determinar su luminosidad, y derivar la curva del período-luminosidad descubierta por Leavitt.

A continuación, podría usted estudiar cualquier otra Cefeida de la nube. A partir de su período, podría hallar su luminosidad utilizando la curva de Leavitt y, a partir de ella, podría determinar a qué distancia debería aparecer tan brillante como se ve en el cielo. De esta manera, puede emplearse la «vara de medir Cefeidas» para determinar las distancias de las estrellas demasiado distantes para mostrar un paralaje mensurable.

Un problema era, sin embargo, que incluso la Cefeida más próxima se hallaba demasiado lejos para determinar su distancia mediante paralaje, de modo que no disponíamos de la cifra de la distancia necesaria para aplicar primero la «vara de medir».

En 1913, sin embargo, Ejnar Hertzsprung (el descubridor de las gigantes rojas), siguiendo una cuidadosa línea de razonamiento, consiguió calcular la distancia de algunas Cefeidas sin recurrir al paralaje. Lo cual consagró la validez de la «vara de medir».

En 1914, el astrónomo norteamericano Harlow Shapley (1885-1972) aplicó aquella pauta a las variables Cefeidas que localizó en varios cúmulos globulares. Halló la distancia de cada una y luego diseñó un modelo de cada cúmulo en sus respectivas direcciones y distancias. Esto le brindó un modelo tridimensional de todos los cúmulos globulares, que, según descubrió, formaban más o menos una esfera, con su centro a miles de años luz de distancia en la dirección de Sagitario.

Shapley pensó que era razonable suponer que la esfera de cúmulos globulares estaba en el centro de la Galaxia, que de este modo parecía hallarse muy alejada de nosotros. Realmente sobreestimó esta distancia, y ahora sabemos que el sol no se

encuentra en el centro de la Galaxia ni en sus proximidades, sino a 30 000 años luz hacia un lado.

Si es así, ¿por qué no vemos la Vía Láctea muchísimo más brillante en la dirección de Sagitario que en la dirección opuesta? Lo cierto es que la Vía Láctea en alguna medida brilla más y presenta mayor complejidad en la dirección de Sagitario que en cualquier otra, pero no podemos ver el centro de la Galaxia y más allá. Las nebulosas oscuras que cubren la Vía Láctea oscurecen la gran mayoría de las estrellas en esa dirección.

Lo que vemos cuando miramos al cielo es, pues, una parte más bien reducida de la Galaxia que comprende la región externa, la más próxima a nuestro sistema solar; en otras palabras, a nuestra vecindad. Si consideramos sólo esta parte de la Galaxia, entonces sí estamos cerca del centro, pero no por ello dejamos de hallarnos lejos de su verdadero centro.

94. ¿Qué es el efecto Doppler?

Con objeto de ampliar nuestros conocimientos acerca de la Galaxia, debemos estudiar otra forma de determinar los movimientos de las estrellas. Cuando Halley descubrió que las estrellas se movían, sólo pudo medir la trayectoria que seguían a través de la línea de visión (el movimiento propio), como si se deslizaran por la esfera celeste. Una vez quedó de manifiesto que la esfera celeste no existía, y que las estrellas se distribuían más cerca o más lejos de nosotros a través de grandes distancias del espacio, se suscitó la cuestión de si una estrella en concreto se mueve hacia nosotros o se aleja. Este movimiento de proximidad o lejanía se llama movimiento radial, porque la estrella se la ve acercarse o alejarse a lo largo del radio de una rueda en cuyo centro se sitúa la Tierra.

¿Cómo podríamos determinar ese movimiento? Si una estrella se mueve alejándose directamente de nosotros o aproximándose, su posición en el firmamento no cambiaría. Desde luego que si se alejara, aparecería cada vez más apagada, y si se nos fuera aproximando ganaría brillo. Pero las estrellas están tan lejos y se mueven tan despacio en comparación con sus enormes distancias, que una estrella fácilmente necesitaría miles de años para cambiar de brillo lo suficiente como para ser detectada, incluso con los instrumentos más exactos. Además, si una estrella se trasladara por el firmamento con un movimiento propio, podría también acercarse o alejarse de nosotros, pues tiene un movimiento oblicuo en tres dimensiones. ¿Cómo es posible ver ese movimiento?

La respuesta se halló en un fenómeno observado en la Tierra, que parecía no tener nada que ver, con las estrellas. Se sabía que si

un jinete se lanzaba a la carga durante un ataque militar, haciendo sonar la trompeta para animar a sus tropas y asustar al enemigo, la trompeta parecía cambiar de tono cuando el jinete pasaba ante un oyente que parecía parado. En el momento que cruzaba ante él, el sonido bajaba súbitamente de tono.

Este fenómeno hubiera podido pasar inadvertido en el fragor de la batalla, pero en 1815 el ingeniero británico George Stephenson (1781-1848) inventó la locomotora de vapor, y pocos años después esas máquinas viajaban tan aprisa como un caballo al galope o incluso más rápidamente. Además, solían ir equipadas con silbatos de algún tipo para advertir a las personas cuando atravesaban regiones pobladas, con lo que se hizo muy común oír el súbito aumento de tono cuando la locomotora pasaba, y empezó a plantearse la pregunta de por qué sucedía.

El físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853) resolvió el problema y decidió, muy correctamente, que cuando la locomotora se aproxima, el intervalo entre cada una de las sucesivas ondas sonoras es más breve, de modo que inciden en el oído más frecuentemente que si la locomotora permaneciese detenida. O sea, que el tono del silbato era más alto que con la locomotora parada.

Cuando la locomotora pasaba ante un oyente y empezaba a alejarse, cada sucesiva onda sonora era desplazada por la anterior, e incidían en el oído con menos frecuencia que si la locomotora hubiese permanecido parada, con lo que sonaban con un tono más bajo. Cuando la locomotora pasaba, se producía un cambio natural de tono desde más alto de lo normal a más bajo de lo normal.

En 1842, Doppler determinó la relación matemática entre velocidad y tono, y la probó con éxito, disponiendo una locomotora que arrastrara un vagón plataforma a diversas velocidades. En la plataforma se colocaron unos trompetistas que hacían sonar varias notas. En tierra, unos músicos, con un sentido desarrolladísimo para captar el tono, reproducían el cambio que percibían al pasar el tren. Estos cambios de tono se llamaron desde entonces efecto Doppler.

Por entonces se había descubierto que la luz consistía también en ondas, aunque eran muchísimo más pequeñas que las sonoras. El físico francés Armand-Hippolyte Fizeau (1819-1896) señaló en 1848 que el efecto Doppler sería aplicable a cualquier movimiento ondulatorio, incluida la luz. Como resultado de ello, la forma de actuar de la luz se llama en ocasiones efecto Doppler-Fizeau.

Si una estrella ni se aproxima ni se aleja de nosotros, las líneas oscuras del espectro permanecen en su lugar. Si la estrella se aparta de nosotros, la luz que emite tiene una mayor longitud de onda (el equivalente de un tono grave), y todas las líneas oscuras se desplazan hacia el límite rojo del espectro. Cuanto mayor es el desplazamiento, con más rapidez se aparta de nosotros la estrella.

Si la estrella se nos acerca, la luz que emite tiene una longitud de onda inferior (equivale a un tono agudo), y las líneas espectrales se desplazan hacia el límite violeta. Una vez más, a mayor desplazamiento, mayor rapidez en la aproximación de la estrella.

Si conocemos tanto el movimiento radial (dentro o fuera) y el movimiento propio (lateral), podemos calcular el verdadero movimiento de una estrella en tres dimensiones. Pero en realidad la velocidad radial es con mucho la más importante de las dos. El movimiento propio sólo puede medirse si una estrella está lo bastante cerca como para que su rapidez sea perceptible. Y sólo una pequeñísima proporción de estrellas se encuentra cerca de nosotros. Por otra parte, el movimiento radial puede determinarse sin que importe lo lejos que se encuentre una estrella, con tal de que pueda obtenerse su espectro.

En 1868, William Huggins fue el primero en determinar la velocidad radial de una estrella. Encontró que Sirio se alejaba de nosotros alrededor de 46 km por segundo. Ahora disponemos de cifras más exactas, pero la que propuso ya era bastante ajustada para tratarse de un primer intento.

95. ¿Gira la Galaxia?

Todos los objetos que conocemos en el sistema solar tienen un movimiento de rotación, desde el sol a los asteroides, aunque algunos giran más aprisa que otros. Esto nos permite suponer que otras estrellas también giran y que, de hecho, la Galaxia entera lo hace. Pero ¿cómo podemos afirmar que es así?

Una vez los astrónomos estuvieron en condiciones de determinar el verdadero movimiento, en tres dimensiones, de numerosas estrellas, se comprobó que las estrellas no se movían en distintas direcciones de manera errática.

Así, en 1904, el astrónomo holandés Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) halló que cierto número de estrellas de la Osa Mayor y también de otras regiones del firmamento se movían más o menos en la misma dirección. En efecto, encontró que había dos corrientes estelares, una que avanzaba con las estrellas de la Osa Mayor y otra que se movía en dirección opuesta.

En 1927, J. H. Oort (que más adelante formuló la teoría de una distante nube de cometas) interpretó la existencia de las dos corrientes estelares de la siguiente manera. Todas las estrellas de la Galaxia giran en torno al centro galáctico. Las que están más próximas a ese centro que nuestro sol se mueven más aprisa que el sol y nos van alcanzando, pues todas ellas parecen moverse en una dirección más allá de nosotros, unas más despacio que otras, naturalmente. Las estrellas más alejadas del centro que el sol se mueven con más lentitud, y el sol tiende a alcanzarlas, con lo que parecen moverse en la dirección opuesta de las situadas más cerca del centro. Así pues, si todas las estrellas se mueven en la misma

dirección, unas más aprisa y otras más despacio, alrededor del centro galáctico, cabe afirmar que la Galaxia experimenta un movimiento de rotación.

Esta rotación conduce a una importante conclusión. Los astrónomos tienen razones para creer que las estrellas están muy juntas, y que existen aglomeraciones mayores conforme nos aproximamos al centro de la Galaxia. En efecto, parece probable que el 90% de toda la masa de la Galaxia se halle en un volumen relativamente pequeño situado en el centro. Las estrellas alejadas de dicho centro giran en torno a esa masa central, de manera muy semejante a como los planetas del sistema solar se trasladan alrededor del sol.

Al determinar que la Galaxia rotaba, Oort demostró que el sol giraba a su vez alrededor del centro de la Galaxia una vez cada 230 millones de años aproximadamente. De este período de revolución y de la distancia del sol al centro, es posible calcular la masa del conglomerado central de estrellas.

Resulta que la masa de la Galaxia —o al menos de las estrellas que la componen— es unos 100 000 millones de veces la del sol, lo que significa que haya 100 000 millones de estrellas en la Galaxia, pues el sol no es una estrella representativa. Probablemente, las tres cuartas partes de las estrellas de la Galaxia sean enanas rojas, y al menos el 90% de ellas tienen una masa inferior a la del sol. Si la estrella promedio tiene la mitad de la masa del sol, podría haber aproximadamente 200 000 millones de estrellas en la Galaxia.

96. ¿Nos llega algo más que luz de las estrellas?

Hasta bien entrado el siglo xx, la única información que recibíamos del universo estelar fuera del sistema solar era luz. Mediante ésta estudiábamos las posiciones de las estrellas, su brillo, sus movimientos, sus temperaturas, su composición química e incluso sus mutuos efectos gravitatorios. Pero hay otros tipos de información que nos llegan de las estrellas.

Tras el descubrimiento de la radiactividad en 1896, los científicos aprendieron a detectar radiaciones radiactivas acudiendo a diversos recursos. Incluso pequeñas cantidades de esa radiación eran detectables. Era posible aislar esos detectores tras barreras de plomo que absorbieran las radiaciones energéticas, y del grosor del plomo requerido para bloquear las radiaciones podía estimarse el contenido de energía. Lo que más sorprendió a los científicos era que cuando se interponía suficiente protección para bloquear todas las radiaciones radiactivas que ellos conocían, alguna radiación particularmente energética aún conseguía atravesar el ingenio detector. El problema se centraba en cuál era esa radiación desconocida.

El físico austroamericano Victor Franz Hess (1883-1964) consideró que cualquiera que fuese la radiación, debía provenir de una fuente terrestre. En 1911, se propuso demostrar lo anterior disponiendo un aparato de detección, bien aislado, en un globo que se remontara muy alto. Efectuó diez ascensiones, cinco de ellas de noche, con las que alcanzó casi 10 000 m de altitud. Para su sorpresa, encontró que a mayor altura registraba una radiación más

intensa. En la máxima altura, la radiación era ocho veces más intensa que en la superficie terrestre, de lo cual sólo pudo concluir que la radiación no provenía de la Tierra, sino del espacio. Otros empezaron a investigar esta radiación que se derramaba sobre la Tierra desde todas direcciones, y en 1925 el físico norteamericano Robert Andrews Millikan (1868-1953) dio a esa radiación el nombre de rayos cósmicos, porque llegaban a nosotros desde el cosmos.

Pero seguía planteada la cuestión de la naturaleza de los rayos cósmicos. Millikan creyó que eran ondulatorios y mucho más energéticos que la propia luz. Otro físico norteamericano, Arthur Holly Compton (1892-1962), consideró, en cambio, que consistían en partículas subatómicas muy energéticas, cargadas eléctricamente, que viajaban casi a la velocidad de la luz. Pero esto ¿podía ser probado?

Si los rayos cósmicos eran semejantes a la luz, resultarían inafectados por el magnetismo terrestre. Si se tratara de partículas cargadas, estarían unidas a su campo, y tenderían a alcanzar la Tierra cerca de los polos magnéticos y no lejos de ellos. En la década de 1930, Compton viajó por todo el mundo, midiendo la intensidad de los rayos cósmicos acá y allá, y encontró que aquélla era mayor a medida que se aproximaba a los polos magnéticos. Los rayos cósmicos estaban cargados de partículas.

Resultó que se trataba de la misma clase de partículas cargadas emitidas por el sol como viento solar. Eran núcleos atómicos cargados positivamente, en su mayoría de hidrógeno. Cuando las protuberancias solares emiten chorros de viento solar inusualmente energéticos, los núcleos atómicos a esa velocidad pueden ser tan energéticos que incluso debilitan los rayos cósmicos. Cuando estos últimos, sin embargo, llegan hasta nosotros desde más allá del sistema solar, contienen mucha más energía que la que pueda producir el sol, y probablemente los causan acontecimientos que también dan lugar a mucha más energía que una simple protuberancia solar, como por ejemplo la explosión de una supernova. En segundo lugar, cuando los rayos cósmicos pasan

entre las estrellas, continuamente se ven afectados por la presencia de campos magnéticos, los cuales tienden a imprimirles aceleración y a incrementar su energía.

Los rayos cósmicos son importantes por muchas razones. Antes he mencionado su influencia sobre la evolución biológica, pero también nos dicen algo acerca de la constitución química del universo en general, y ayudan a los físicos a provocar colisiones con átomos en la atmósfera, que son mucho más energéticas que cualesquiera que podamos causar por medios artificiales incluso hoy día. (Sin embargo, aguardar colisiones espontáneas de rayos cósmicos puede ser muy tedioso, mientras que ahora contamos con aparatos para la descomposición del átomo, que pueden crear colisiones más suaves, pero capaces de provocar cuantas se desee).

Una importante limitación de los rayos cósmicos es que no pueden proporcionarnos información específica de acontecimientos concretos en el universo. Sus trayectorias están tan condicionadas por los campos magnéticos, que no es posible determinar de qué dirección original provenían.

Aparte de los rayos cósmicos, existen también los neutrinos, partículas subatómicas no cargadas, que carecen de masa y que, por tanto, viajan por el espacio a la velocidad de la luz. Su existencia fue predicha teóricamente por el físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) en 1931. La partícula la llamó neutrino (diminutivo italiano de neutro) Enrico Fermi en 1932.

Puesto que los neutrinos no tienen masa ni carga eléctrica, y dado que interactúan con la materia ordinaria sólo muy raramente, casi resultan imposibles de detectar. Su existencia es tan adecuada, que los físicos aceptaron su realidad; pero hasta 1956 el neutrino no fue realmente detectado por dos físicos norteamericanos: Frederick Reines (1918-1998) y Clyde Lorrain Cowan (1919-1974).

A diferencia de los rayos cósmicos, no están cargados y no se ven afectados por campos magnéticos; en lugar de eso, viajan en líneas invariablemente rectas (excepto los leves efectos de los

campos gravitatorios), lo mismo que la trayectoria de la luz. Son producidos en grandes cantidades por el sol y otras estrellas, y se estima que el universo contiene mil millones de veces más neutrinos que las clases más comunes de partículas subatómicas.

El problema consiste en que los neutrinos atraviesan la materia sin colisionar con nada, excepto en raras ocasiones, de manera que se pueden detectar sólo unos pocos entre los muchos billones que pasan por los aparatos instalados al efecto. Así, durante décadas Reines ha venido tratando de detectar los neutrinos emitidos por el sol. Desde luego que continuamente ha ido detectando algunos, pero sólo un tercio de los que en teoría cabía esperar. La razón de que sea así nos resulta desconocida, y ahora se habla del «misterio de los neutrinos perdidos».

En 1987, cuando apareció una supernova en la Gran Nube de Magallanes (la supernova más próxima a nosotros desde 1604, pues sólo se hallaba a 150 000 años luz), la primera indicación de que había estallado fue la súbita aparición de siete neutrinos detectados en un aparato (un telescopio de neutrinos) situado bajo los Alpes. A medida que se perfeccionaron los detectores, pudieron ser hallados más neutrinos, que nos suministraron mayor información acerca de acontecimientos generadores de energía en el universo. En cualquier caso, el año 1987 presenció el inicio de la «neutrinoastronomía» fuera del sistema solar.

Otra partícula que nos llega del espacio es el gravitón. Los gravitones son partículas desprovistas de carga y de masa que, al igual que los neutrinos, viajan a la velocidad de la luz. Son las partículas menos energéticas que conocemos y las más difíciles de detectar. Su existencia fue predicha por Albert Einstein (1879-1955) en 1916, pero desde entonces han fracasado todas las tentativas de encontrarlos, si bien los físicos estaban seguros de que había tales gravitones. Si pudieran detectarse, probablemente suministrarían información sobre los acontecimientos más energéticos del universo.

La luz y la radiación semejante a ella viajan a través del espacio como ondas que existen en unidades similares a partículas. (Todas las ondas tienen aspectos de partícula, y todas las partículas tienen aspectos ondulatorios). En 1905, Einstein llamó al aspecto de partícula de la luz fotón, de una palabra griega que significa precisamente luz. La mayor parte de la información que recibimos del universo todavía hoy nos viene a través de fotones de luz visible. Hay fotones de muchos otros tipos, menos y más energéticos que la luz visible.

97. ¿Qué es el espectro electromagnético?

Cuando Einstein introdujo el concepto de fotón, quedó claro que cuanto más cortas eran las ondas de una particular clase de luz, más energéticos eran los fotones. Así, la luz roja, que tiene las ondas más largas del espectro, posee los fotones con menos energía. Los fotones de la luz naranja, amarilla, verde y azul tienen sucesivamente más energía, y el violeta es el que cuenta con los fotones más energéticos. La pregunta es, pues, si los fotones de luz ordinaria son todos los fotones que existen.

La respuesta es negativa, y esta información se conocía en realidad desde hacía casi doscientos años, desde 1800, cuando William Herschel descubrió que el espectro se extendía más allá del límite rojo visible. Como se recordará, colocó un termómetro en diferentes partes del espectro para comprobar qué temperatura obtenía, y halló que la temperatura era más elevada inmediatamente después del límite rojo del espectro. Esa luz se llamó infrarroja (o sea, por debajo del rojo), y ya me he referido a ella en relación con el efecto invernadero.

En 1801, el físico británico Thomas Young (1773-1829) demostró finalmente que la luz consistía en pequeñas ondas más que en pequeñas partículas. En 1850, el físico italiano Macedonio Melloni (1798-1854) fue capaz de demostrar que la radiación infrarroja tenía todas las propiedades de la luz ordinaria, sólo que sus ondas eran más largas y no afectaban al rojo. Una vez se comprendió qué eran los fotones, quedó claro que los fotones infrarrojos eran individualmente menos energéticos que los fotones de luz visible.

También existía radiación más allá del límite violeta del espectro. En 1801, el físico alemán Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) se dedicaba a probar cómo la luz causaba el oscurecimiento de ciertos componentes de la plata. Halló que este oscurecimiento se aceleraba si se desplazaba por el espectro en dirección al límite violeta, pero que era más rápido que nunca cuando se movía más allá de ese color. Al parecer, había también radiación ultravioleta (o sea, más allá del violeta), aunque no podía ser vista, y ahora sabemos que la luz ultravioleta está compuesta por ondas más cortas que la luz visible, y que sus fotones son más energéticos.

Hacia 1870, James Clerk Maxwell elaboró cuatro ecuaciones que describían todo el comportamiento de la electricidad y el magnetismo, y demostraban que estos dos fenómenos eran aspectos distintos de una misma interacción electromagnética. Además, demostró que si el campo electromagnético vibraba, producía una ondulación que se movía a la velocidad de la luz. Si la vibración tenía la velocidad adecuada, se creaba luz, de modo que esa luz podía ser considerada un ejemplo de radiación electromagnética.

Pero a diversas velocidades, la vibración podía producir ondas más y más largas, no sólo las de radiación infrarroja, sino otras formas de radiación mucho más allá de ésta, y ondas más y más cortas, incluidas las de la radiación ultravioleta y más allá. En otras palabras, hay un espectro electromagnético, con ondas que se extienden desde las increíblemente cortas hasta las no menos increíblemente largas, entre las cuales la luz visible sólo constituye una reducida banda.

Una vez Maxwell hubo señalado la existencia de esas radiaciones extremas, los científicos ya sabían qué buscar, y estuvieron en condiciones de encontrarlo. En 1888, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) descubrió las que se llamaron ondas de radio, con longitudes de onda mucho mayores que las de la radiación infrarroja. En 1895, otro físico alemán, Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), descubrió los rayos X, cuyas longitudes de

onda eran mucho más cortas que la radiación ultravioleta. En 1900, el físico francés Paul-Ulrich Villard (1860-1934) descubrió que entre las radiaciones emitidas por sustancias radiactivas se contaban los rayos gamma, una radiación electromagnética con longitudes de onda inferiores a los rayos X.

Los fotones de las radioondas eran menos energéticos que los fotones infrarrojos; los fotones de los rayos X eran más energéticos que los fotones ultravioleta, y los fotones de los rayos gamma aún eran más energéticos.

Las estrellas tienden a irradiar fotones a través de toda la escala de la radiación electromagnética. En este caso, ¿por qué sólo somos sensibles a la estrecha banda del espectro representada por la luz visible?

En primer lugar, una estrella como nuestro sol emite su máxima intensidad de radiación en la región de la luz visible, lo que tiene sentido para las formas de vida que dependen del sol para desarrollar un aparato sensorial que reciba y reaccione a esa escala. Las estrellas más frías, como las enanas rojas, son mucho más ricas en la menos energética radiación infrarroja. Las estrellas más calientes, como las enormes azules-blancas, tienen muchas más ondas energéticas ultravioleta. Acontecimientos muy energéticos en esas estrellas calientes pueden producir emisiones desacomodadamente elevadas de rayos X e incluso rayos gamma.

En segundo lugar, la atmósfera terrestre, aunque del todo transparente a la luz visible, es relativamente opaca a otras regiones del espectro electromagnético, de manera que no tenemos muchas oportunidades de captar otras formas de luz. Pero algunas de las ondas infrarrojas y ultravioleta próximas al espectro visible sí consiguen atravesar la atmósfera. Por ejemplo, la luz ultravioleta que penetra aquélla es más energética que la luz visible y mucho más efectiva para producir quemaduras solares.

A partir de la década de 1950, los seres humanos empezaron a enviar cohetes más allá de la atmósfera, y también satélites

equipados que se colocaron en órbita, con instrumentos capaces de registrar regiones del espectro electromagnético que no podían penetrar en la atmósfera terrestre. Estudiando los rayos X emitidos por la corona solar, por ejemplo, los astrónomos pudieron demostrar que su temperatura era de un millón de grados. Estudiando las radiaciones infrarrojas, los astrónomos hallaron bandas de polvo en torno a la brillante estrella Vega, que podían indicar la existencia de cuerpos planetarios, y llevaron a cabo una investigación acerca de las enanas pardas. También han sido objeto de estudio las emisiones ultravioleta e incluso ocasionales estallidos de rayos gamma.

Pero no cabe duda de que, en astronomía, la región más útil del espectro electromagnético ha pasado a ser la de las radioondas.

98. ¿Cómo se desarrolló la radioastronomía?

En 1931, el ingeniero de telecomunicaciones norteamericano Karl Guthe Jansky (1905-1950), que trabajaba para los laboratorios de la Bell Telephone, estaba empeñado en resolver el problema de la estática que interfería las comunicaciones por radio entre los barcos y tierra firme. La electricidad estática tiene numerosas causas, incluidas las tempestades, la proximidad del equipo eléctrico y el paso de aviones por la vertical, todo lo cual produce ondas de radio que interfieren las ondas ordenadas que se usan en las comunicaciones por teléfono, introduciendo efectos irregulares que causan sonidos extraños: el característico ruido «de freír huevos» de la electricidad estática.

Jansky construyó un aparato capaz de detectar estas fastidiosas ondas que interferían, y mientras lo utilizaba, descubrió una nueva clase de estática, débil, como un silbido cuya fuente no pudo identificar al punto. Provenía de lo alto y se movía regularmente de un día a otro. Al principio le pareció a Jansky que se movía con el sol. Pero poco a poco se aproximaba a éste a razón de cuatro minutos diarios: la misma cifra que las estrellas en su aproximación al sol.

Entonces Jansky razonó que la fuente debía situarse más allá del sistema solar, y en 1932 había decidido que procedía de la dirección de la constelación de Sagitario, la misma que ahora se reconocía como el centro de la galaxia. Bell publicó sus resultados antes de terminar el año 1932, y si bien atrajo poca atención en ese momento, señaló el nacimiento de la radioastronomía.

Una de las razones de que el trabajo de Jansky despertara tan escasa atención fue que los astrónomos de la época nunca sospecharon que se pudieran captar radioondas del cielo, por falta del equipo adecuado para recibir y analizar dicha radiación. Otro ingeniero de telecomunicaciones norteamericano, Grote Reber (1911-2002), trató de aprovechar el trabajo de Jansky, y en 1937 construyó un receptor de radioondas en forma paraboloide (la forma de la carcasa de un faro de automóvil). De menos de 10 m de diámetro, recibía y reflejaba las radioondas, enfocándolas al punto donde podían estudiarse mejor. Con ello construyó el primer radiotelescopio, y se convirtió en el primer radioastrónomo.

Reber descubrió y cartografió regiones del cielo que parecían fuentes de radioondas más fuertes de lo usual. Las llamó radioestrellas, y el conjunto lo denominó radiomapa. Publicó sus resultados en 1942, pero la segunda guerra mundial estaba en su apogeo, y se les prestó escasa atención.

Sin embargo, las radioondas más cortas, llamadas microondas, situadas en la inmediata proximidad de la región infrarroja del espectro, resultaron ser muy útiles en la guerra. Esas microondas podían ser enviadas en impulsos capaces de ser reflejados por un avión. Según la dirección de la que procedieran los reflejos, y del tiempo transcurrido entre emisión y reflexión, podía calcularse la situación del aparato, en qué dirección volaba y a qué velocidad. Este dispositivo se llamó *radio detection and ranging*, donde *ranging* significa determinación de la distancia. Ese nombre se abrevió en su acrónimo radar.

El desarrollo del radar fue rápido en Gran Bretaña, bajo la guía del físico de ese país Robert Alexander Watson-Watt (1892-1973). El radar, más que ninguna otra cosa, permitió a la numéricamente inferior Royal Air Force derrotar a la Luftwaffe alemana en la batalla de Inglaterra, librada a fines de 1940.

En el proceso del desarrollo del radar, se inventaron dispositivos que podían detectar radioondas, y una vez concluida la guerra, fue posible captar las procedentes del espacio con gran precisión. Se

construyeron radiotelescopios más y más potentes, pues estas instalaciones son mucho más fáciles de construir que los telescopios ópticos de gran tamaño.

Naturalmente, las microondas son mucho más largas que las ondas de luz visible, lo que significa que la visión con ellas es mucho más «borrosa» que con luz visible. Pero a medida que se construyeron radiotelescopios mayores, se perfeccionó la visión con microondas. Como es lógico, los grandes radiotelescopios podían construirse muy alejados uno de otro y sincronizarse mediante ordenadores, de manera que el efecto era el de un radiotelescopio de muchos kilómetros de diámetro. La visión con microondas llegó a ser más precisa que la que se sirve de la luz.

A partir de la década de 1950, la radioastronomía se ha vuelto extremadamente útil para proporcionarnos información sobre el universo, que la astronomía óptica ordinaria posiblemente no nos hubiera dado. Como resultado de ello, hemos aprendido más del universo en los últimos treinta años que en todo el tiempo precedente.

99. ¿Qué son los púlsares?

Una vez los astrónomos centraron su tarea en la detección de microondas, se dieron cuenta de que ésta presentaba dos enormes ventajas. En primer lugar, era la única región importante de todo el espectro electromagnético, aparte de la luz visible, para la que la atmósfera terrestre resultaba transparente. Existía una ventana de microondas abierta al espacio exterior, así como una ventana de luz, lo que significaba que las radiaciones de microondas del universo podían estudiarse desde la superficie terrestre y no era necesario recurrir a cohetes.

En segundo lugar, las microondas podían penetrar la niebla, la neblina y las nubes de polvo que resultaban opacas a la luz ordinaria. Esto se descubrió en relación con el radar durante la guerra, pues podía seguirse la trayectoria de los aviones que se acercaban aunque los ocultara la niebla o las nubes. De forma parecida, partes del universo exterior que resultaban opacas a la luz visible eran transparentes a las microondas, y podíamos estudiar sirviéndonos de éstas aquello que no conseguíamos ver con luz. Así, el centro de la Galaxia, oculto desde siempre a nuestra visión por las nubes de polvo, pudo ser estudiado finalmente mediante sus emisiones de microondas.

Más cerca de nuestro hogar terrestre se situaba la emisión de microondas de Venus, detectada por vez primera en 1956, que dio a los astrónomos su indicio inicial de que el planeta era extremadamente caliente. Además, las sondas cohete enviadas a Venus pudieron transmitir haces de microondas que penetraron la capa nubosa y fueron reflejadas por la sólida superficie subyacente.

Estas reflexiones permitieron cartografiar la superficie de Venus a partir de 1962, si bien nunca ha sido vista mediante la luz, salvo los pequeños fragmentos que pudieron ser fotografiados con cámaras introducidas a través de la atmósfera.

Las reflexiones del radar también pueden emplearse para determinar los ritmos de rotación de Venus y Mercurio. Se descubrió que Venus giraba mucho más despacio de lo que se creyó (y en la dirección contraria), mientras que Mercurio giraba mucho más aprisa.

En 1955, el astrónomo norteamericano Kenneth Linn Franklin (n. en 1923) halló una gran emisión de microondas procedente de Júpiter, que finalmente quedó explicada en 1960, cuando se demostró que ese planeta tenía un enorme campo magnético, mucho mayor que el de la Tierra. Este dato se confirmó en la década de 1970, cuando se enviaron sondas más allá de Júpiter.

Más espectaculares han sido los descubrimientos efectuados mediante la radioastronomía en el universo más allá del sistema solar. Como ya expliqué, Zwicky y Oppenheimer especularon independientemente sobre la existencia de estrellas de neutrones, estrellas extremadamente condensadas, compuestas sólo por neutrones, que reducían la masa de una estrella ordinaria a una bolita de sólo unos kilómetros de diámetro. El astrónomo norteamericano Herbert Friedman (1916-2000) estudió la posibilidad de que una de esas estrellas de neutrones se hubiera formado a partir de la explosión de una supernova responsable del nacimiento de la nebulosa del Cangrejo. Se detectaron rayos X procedentes de diversas partes del cielo, y una de las fuentes era la nebulosa del Cangrejo. ¿Podía esa fuente ser una estrella de neutrones que había quedado en el seno de aquella nebulosa?

En julio de 1964, la luna hubo de pasar frente a la nebulosa del Cangrejo, y Friedman supervisó el envío de un cohete al espacio, con objeto de controlar la producción de rayos X durante el evento. Si dichos rayos procedían de una estrella de neutrones, la emisión se interrumpiría por entero y de inmediato en cuanto la luna pasara

frente al pequeño objeto. Si la emisión de rayos X se producía de forma gradual mientras la luna transitaba frente a la nebulosa del Cangrejo, entonces la fuente era la nebulosa entera y no un pequeño objeto contenido en ella. Este último caso fue el que se dio, y quienes habían esperado detectar una estrella de neutrones por este procedimiento, quedaron muy desilusionados.

Pero el mismo año de 1964 se efectuó un nuevo descubrimiento. Las radioondas procedentes de ciertas regiones del cielo parecían mostrar una rápida fluctuación en su intensidad, como «centelleos de radio» aquí y allá. El astrónomo británico Anthony Hewish (n. en 1924) diseñó un radiotelescopio que permitiría estudiar con gran detalle los rápidos cambios en las intensidades de las microondas. Supervisó la construcción de 2048 receptores que se distribuirían por una superficie de algo más de una hectárea, y en julio de 1967 se pusieron en funcionamiento.

Al cabo de un mes una joven británica que seguía estudios de posgrado, Jocelyn Bell, detectó ráfagas de microondas procedentes de un lugar situado a medio camino entre Vega y Altair. Las ráfagas en cuestión eran sorprendentemente breves, pues duraban sólo un treintavo de segundo. Aún más sorprendente resultó que esos fenómenos se sucedieran con notable regularidad. Eran, en efecto, tan regulares, que el período podía calcularse hasta una cienmillonésima de segundo; era de 1,33730109 segundos. En febrero de 1968, cuando Hewish anunció su descubrimiento, había localizado otros tres «centelleos de radio», y desde entonces se han encontrado cientos de ellos.

Naturalmente, al principio no había forma de determinar qué significaba aquella pulsación. A Hewish sólo se le pudo ocurrir que se trataba de una estrella pulsante, en la que cada pulsación emitiría una andanada de energía. Casi en seguida, los nuevos objetos pasaron a denominarse púlsares.

Todos los púlsares se caracterizan por sus pulsaciones de radio extremadamente regulares, pero el período exacto de éstas varía de un púlsar a otro. Uno tenía un período largo: 3,7 segundos. En

noviembre de 1968, los astrónomos detectaron un púlsar en la nebulosa del Cangrejo cuyo período era de sólo 0,033089 segundos, de modo que experimentaba treinta pulsaciones por segundo. Desde entonces se han descubierto unos pocos púlsares que registran varios cientos de pulsaciones por segundo.

La cuestión se centraba ahora en qué podía producir esos breves destellos con tan fantástica regularidad. Algún objeto debía trasladarse, rotar o pulsar, y con cada revolución, rotación o pulsación, debía emitir una andanada de microondas. Para conseguirlo, sin embargo, debía trasladarse, rotar o pulsar en cuestión de segundos, o incluso en centésimas de segundo, lo que requeriría un tamaño muy pequeño, combinado con un campo gravitatorio muy fuerte. Los púlsares no pueden ser enanas blancas, por ejemplo, porque éstas son demasiado grandes y sus campos gravitatorios, demasiado débiles. Si se pudieran imaginar obligadas a trasladarse, rotar o pulsar con suficiente rapidez, se disgregarían.

El astrónomo austroamericano Thomas Gold (1920-2004) sugirió casi en seguida que un púlsar debía ser una estrella de neutrones en rotación. Una estrella de neutrones era lo bastante pequeña como para girar sobre sí misma en una fracción de segundo, y registraría una gravedad superficial lo bastante intensa como para mantener su cohesión mientras efectuaba aquel movimiento. Ya se había establecido teóricamente que una estrella de neutrones poseería un campo magnético de enorme intensidad, con unos polos magnéticos que no precisarían coincidir con el polo de rotación. Los electrones estarían tan juntos por efecto de la fuerza de la gravedad, que sólo podrían escapar en los polos magnéticos. Conforme los electrones fueran desprendidos, perderían energía en forma de microondas. Si a medida que la estrella de neutrones efectúa el movimiento de rotación, resulta que las microondas son emitidas en dirección a nosotros, captamos una andanada o posiblemente dos por cada rotación.

Gold señaló que mientras se emiten las microondas, la estrella de neutrones perdería energía de rotación, y su período se

incrementaría muy lentamente. Esta hipótesis se comprobó en varios púlsares, y se halló ese incremento. En particular, el período del púlsar de la nebulosa del Cangrejo se volvía más lento a razón de 36,48 milmillonésimas de segundo por día.

Así pues, la nebulosa del Cangrejo tenía en su seno una estrella de neutrones. Pero otras partes de la misma nebulosa también emitían rayos X. Sólo el 5% de los rayos X provienen del púlsar, que es lo que desorientó a Friedman. En 1969, los astrónomos descubrieron que el púlsar de la nebulosa del Cangrejo también emitía brevísimos destellos de luz con cada revolución, a un ritmo de 30 por segundo. Por esta razón se le llamó púlsar óptico.

El primer púlsar realmente rápido fue localizado en 1982. Emitía 642 radiopulsaciones por segundo. Probablemente es menor que la mayoría de los púlsares: acaso no pase de los 5 km de diámetro, y su masa supere la del sol en dos o tres veces. Han sido localizados otros púlsares rápidos.

A veces un púlsar acelera de pronto su período muy ligeramente para luego recuperar su ritmo más lento. Algunos astrónomos sospechan que esta particularidad sea el resultado de un «terremoto estelar», un desplazamiento de la distribución de la masa en el interior de la estrella de neutrones. O bien podría causarlo un cuerpo de tamaño considerable que se precipitara en la estrella de neutrones y añadiera al de ésta su propio momento.

100. ¿Qué son los agujeros negros?

Hacia 1800, Laplace (que había avanzado la hipótesis nebular) señaló que cuanto más masa y densidad tenía un objeto, más elevada era su gravedad superficial y mayor su velocidad de escape. Había combinaciones de masa y densidad que producirían una gravedad superficial tan elevada, que la velocidad de escape igualaría o superaría la velocidad de la luz. En este caso, el objeto no podría emitir luz.

En aquel tiempo, la hipótesis se consideró una vana especulación, pues no se conocía nada que se aproximara siquiera en densidad a lo requerido para que llegara a darse el caso.

Pero en 1939, cuando Oppenheimer desentrañó las propiedades de una estrella de neutrones, señaló que si dicha estrella tenía más de 3,2 veces la masa del sol, ni siquiera los neutrones de que estaba compuesta serían capaces de resistir la fuerza gravitatoria hacia dentro. Los neutrones se colapsarían, y no habría nada lo bastante fuerte como para resistir la gravedad, que entonces produciría un colapso total, una singularidad o punto prácticamente desprovisto de volumen, y de masa y densidad infinitas.

Esta superestrella de neutrones no sería capaz de emitir luz, como había predicho Laplace. Podría ser comparada a un «agujero» infinitamente hondo en el espacio, en el que cualquier cosa podría precipitarse, pero nada salir. Puesto que ni siquiera la luz podría escapar, el físico norteamericano John Archibald Wheeler (n. en 1911) sugirió que se le llamara agujero negro, y el nombre prendió.

En 1970, sin embargo, el físico británico Stephen Hawking (n. en 1942) señaló que los agujeros negros podían «evaporarse» muy

espacio, con lo que no se trata de objetos absolutamente permanentes.

En el año 2004, Stephen Hawking reconsideró su teoría sobre los agujeros negros, y cuestionó que todo aquello que entra en ellos desaparezca, sino que pueden expulsar materia y energía en forma descompuesta. Según el científico británico, emiten radiaciones que permiten descubrir su contenido.

Lo más probable es que los agujeros negros se formen donde las estrellas se distribuyen más densamente, donde las colisiones estelares son más comunes y donde las estrellas puedan reunirse para formar grandes masas susceptibles de colapsarse. De ello se sigue que los agujeros negros podrían hallarse en el centro de cúmulos globulares, y es más probable que se den en el centro de la Galaxia.

Por supuesto que el pequeño núcleo de nuestra galaxia en la dirección de Sagitario es tan activo —o sea, que libera mucha energía (recuérdese que el descubrimiento de Jansky de las radiofuentes situadas fuera del sistema solar se localizó en este núcleo)— que la mayoría de los astrónomos se muestran razonablemente seguros de que en el centro hay un agujero negro, con una masa de tal vez cien millones de estrellas.

Un agujero negro de tan elevada masa podría continuar creciendo a medida que fuera incorporando materia en derredor, acaso estrellas enteras, sumándolas al conjunto. Pero no existe peligro de que la galaxia entera sea tragada de este modo en un futuro próximo. A medida que el agujero negro despeja el área que le rodea, disminuye más y más la probabilidad de nuevas adquisiciones.

El problema es cómo se puede observar un agujero negro para determinar si en verdad existe. Puesto que no emite fotones de ninguna clase, no podemos verlo en ninguna parte a lo largo del espectro electromagnético. Sin embargo, el material atrapado por el

campo de gravedad del agujero negro gira con enorme rapidez y, mediante colisiones, pierde energía y tiende a precipitarse en remolino en el agujero negro. Este proceso produce rayos X, de tal manera que allá donde haya emisión de rayos X en el cielo, podemos al menos sospechar la posible existencia de un agujero negro. Por desgracia, hay otros procesos que también podrían liberar esa radiación, de modo que ésta, por sí misma, no brinda la posibilidad de un agujero negro y nada más. Así, aunque nos conste que el centro de la Galaxia es activo y produce abundante radiación, ello no nos proporciona una prueba directa de un agujero negro.

Pero supongamos que un agujero negro forma parte de un sistema binario cuyos componentes están muy juntos, con una estrella normal como compañera. Un sistema binario muy próximo consistente en una enana blanca y una estrella binaria puede dar lugar a novas. Se sabe de la existencia de binarias muy próximas compuestas por dos estrellas de neutrones, y el estudio de su movimiento se ha usado para apoyar la teoría general de la relatividad, formulada por Einstein. ¿Por qué no, entonces, un sistema de binarias próximas consistente en un agujero negro y una estrella normal?

Si tal cosa existiera, materia procedente de la estrella normal tendría que ir a parar al agujero negro, y se generarían rayos X al imprimírsele un movimiento en espiral al ser engullida. Puesto que la materia sería captada irregularmente, los rayos X variarían en cantidad e intensidad de una manera irregular.

En 1965, se detectó una fuente particularmente intensa de rayos X en la constelación del Cisne, y se la llamó Cygnus X-1. En 1971, un cohete detector de rayos X demostró que la radiación emitida por Cygnus X-1 era irregular, lo que indicaba la posibilidad de un agujero negro.

Cygnus X-1 fue inmediatamente investigada con gran cuidado, y se descubrió que en la inmediata vecindad existía una grande y caliente estrella azul blanca, cuya masa se estimó en unas treinta veces superior a la del sol. Esta estrella y la fuente de rayos X

parecían tener de cinco a ocho veces la masa del sol. Como no podía verse, tenía que tratarse de una estrella condensada de reducido tamaño, y dado que su masa era excesiva para tratarse de una estrella de neutrones, debía de ser un agujero negro.

Éste es el caso en que más nos hemos aproximado a la detección real de un agujero negro, y la mayoría de los astrónomos aceptan Cygnus X-1 como uno de esos objetos. Están seguros de que los agujeros negros existen y que deben ser muy comunes.

101. ¿Qué hay en las nubes interestelares de polvo?

En las regiones interestelares —el espacio entre las estrellas— hay nubes de polvo y gas. Al principio, los científicos estaban muy seguros de que el polvo consistía en finos granos de materiales rocosos y de metales, el material que acabó constituyendo los mundos más pequeños cuando esas nubes se condensaron en sistemas estelares de estrellas y planetas. En cuanto al gas, consistía principalmente en hidrógeno y helio.

Aunque el polvo y el gas son lo bastante espesos como para oscurecer las estrellas que se encuentran entre y detrás de ellos, y abundantes como para formar estrellas y planetas, este material se halla esparcido por tan vastos espacios, que al principio los científicos confiaban en que las partículas de polvo fueran pequeñas y los gases consistieran en átomos individuales. Estaban demasiado extendidos como para que se les presentaran oportunidades de entrecrochar entre sí y agruparse.

El astrónomo alemán Johannes Franz Hartmann (1865-1936) fue el primero que, en 1904, obtuvo información del contenido real de las nubes. Estudió la velocidad radial de la estrella Delta de Orión, y encontró que las diversas líneas espectrales se desplazaban en la misma cantidad, tal como se esperaba, pero con algunas excepciones. Las líneas que representaban el elemento calcio no se movían. No parecía probable que la estrella se moviera y dejara calcio tras de sí, de modo que Hartmann comprendió que estaba detectando calcio en la leve y casi inmóvil materia interestelar situada entre la estrella y nosotros.

Por supuesto que el componente principal de la materia interestelar era el hidrógeno, y a partir de 1951 el astrónomo norteamericano William Wilson Morgan (1906-1994) detectó líneas espectrales que representaban hidrógeno ionizado (esto es, hidrógeno lo bastante caliente como para perder los electrones de sus átomos). El hidrógeno estaba caliente no por la inmediata presencia de grandes estrellas azules blancas, que al parecer existían en las líneas curvas de la galaxia. El hidrógeno caliente señalaba esas líneas, de manera que la estructura de nuestra galaxia podría verse no como una simple forma lenticular, sino más bien como una rueda con unos brazos espirales extendiéndose desde las regiones centrales. Nuestro sistema solar es uno de esos brazos.

Es muy poco lo que podría verse en las nubes interestelares si sólo se tomaran en consideración los espectros de luz visible. Con el advenimiento de la radioastronomía todo ha cambiado, pues de átomos fríos y de las combinaciones de átomos que no emitían luz se pasó a hablar de los que emitían muchas más microondas, por lo demás menos energéticas.

Por ejemplo, en 1944 el astrónomo holandés Hendrik Christoffell Van de Hulst (n. en 1918), mientras permanecía escondido durante la ocupación alemana de los Países Bajos en la segunda guerra mundial, e incapacitado para trabajar en astronomía en la forma habitual, se dedicó a calcular cuántos átomos de hidrógeno frío podrían contenerse en el espacio. Llegó a la conclusión de que esos átomos de hidrógeno podían alinear cada uno su núcleo y su electrón (sólo tenían un electrón cada uno) en la misma dirección o en direcciones opuestas, y de vez en cuando un átomo de hidrógeno se desplazaba de una configuración a otra, emitiendo una microonda con ondas de 21 cm de longitud. Cualquier átomo dado de hidrógeno actuaría así sólo cada 11 millones de años, aproximadamente, pero había tantos de esos átomos en el espacio, que siempre había algunos produciendo esas microondas. En 1951, el físico norteamericano Edward Mills Purcell (1912-1997) detectó

esta emisión de microondas, y desde entonces pudo ser usada para seguir las huellas de concentraciones insólitas de hidrógeno frío en el espacio interestelar.

A medida que se perfeccionó la detección de microondas, pudieron ser detectados a su vez los componentes menores de las nubes de gas. Por ejemplo, existe un tipo raro de átomo de hidrógeno cuyo núcleo tiene el doble de masa de los átomos ordinarios del mismo elemento. El hidrógeno ordinario es el hidrógeno 1, pero el tipo con mayor masa es el deuterio (de una palabra griega que significa segundo) o hidrógeno 2. En 1966, se detectaron microondas características del hidrógeno 2, y había algunos indicios de que, en el conjunto del universo, el 20% de todo el hidrógeno se presenta en forma de hidrógeno 2.

Pueden ser identificadas combinaciones de átomos por sus características emisiones de microondas. Por ejemplo, cerca del hidrógeno, los átomos más comunes del espacio capaces de combinarse con otros átomos son los de oxígeno. No cabe sorprenderse de que muy de vez en cuando un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno puedan chocar y juntarse en una combinación conocida como grupo hidroxilo. Este grupo emitiría o absorbería microondas en cuatro longitudes de onda características, y dos de ellas fueron observadas en nubes en 1963.

Los astrónomos empezaron a aceptar combinaciones biatómicas en la delgada materia interestelar, aunque aún parecían improbables combinaciones de tres o más átomos. Pero hacia finales de 1968 también se detectaron las «huellas dactilares» en microondas de moléculas de agua (dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno: tres en total) y de amoníaco (tres átomos de hidrógeno y uno de nitrógeno: cuatro en total).

Después de esto, se hallaron numerosas combinaciones más bien complejas, conteniendo invariablemente uno o más átomos de carbono, y con ello se fundó la ciencia de la astroquímica. Los astrónomos aún no están completamente seguros de cómo esas complejas moléculas, algunas compuestas hasta por trece átomos,

podieron formarse en la materia del espacio, tenue, cercana al vacío. Pero cabe la posibilidad de que si enviáramos aparatos detectores hasta las nubes de materia interestelar (cosa que nos está vedada, pues se encuentran a muchos años luz) podríamos detectar agrupaciones aún más complejas.

102. ¿Qué es SETI?

Más atrás especulábamos sobre la posibilidad de vida en los planetas que giran en torno a otras estrellas. Aún no dominamos la tecnología que nos permitiría visitar esos planetas, y los alienígenas, que sepamos, tampoco nos han visitado. Por tanto, resulta mucho más práctico transmitir un mensaje que enviar naves y a seres inteligentes en ambas direcciones. Los mensajes no implican el enorme gasto de grandes naves espaciales accionadas mediante cohetes, y tampoco ponen en peligro la vida de nadie. Además, mientras los vehículos espaciales fácilmente precisarían siglos o milenios para alcanzar incluso las estrellas más cercanas, los mensajes pueden trasladarse a la velocidad de la luz (que, dicho sea de paso, es la mayor velocidad alcanzable, como Einstein demostró en 1905), y por tanto sólo necesitarían años o decenios.

Pero se da la circunstancia de que nuestra civilización no está lo bastante avanzada para enviar un mensaje de esa naturaleza. Éste, en efecto, debería ser tan potente como para llegar a las estrellas distantes con razonable intensidad. Sin embargo, podemos partir del supuesto de que si existen seres inteligentes fuera de nuestro mundo, podrían estar más adelantados que nosotros, y entonces nuestro papel consistiría en detectar los mensajes ajenos antes que enviar los propios.

La pregunta consiste en cuál es la forma más probable de que nos lleguen esos mensajes. No lo es la de rayos cósmicos modulados, pues éstos implican un elevado gasto de energía y siguen trayectorias curvas, por lo que se dispersarían y distorsionarían sin proporcionar necesariamente indicio alguno de

cuál fue su punto de origen. Los neutrinos y gravitones resultarían demasiado difíciles de detectar. Lo cual sólo nos deja los fotones.

Por lo que a éstos se refiere, primero hemos de identificar haces de luz, los cuales no se manifestarían con claridad en medio de las vastas cantidades de luz producidas por las estrellas, y unos fotones más energéticos que los de la luz visible implicarían un derroche. Esto nos lleva a la conclusión de que las microondas de fotones representan los medios más probables de enviar mensajes.

La búsqueda de inteligencia extraterrestre, que se abrevia con las siglas SETI (*Search of Extraterrestrial Intelligence*), supone, pues, la cuidadosa observación del cielo en busca de la existencia de cualesquiera señales de radio que no sean absolutamente regulares, como las que emiten los púlsares, o absolutamente irregulares, como las procedentes de las nubes turbulentas. Ninguno de esos tipos de señales indicaría la presencia de una inteligencia extraterrestre. Precisaríamos señales irregulares, pero claras y no aleatorias en su irregularidad.

Desde la década de 1960 se han llevado a cabo investigaciones de esta naturaleza, pero han sido breves y limitadas y no han servido para detectar nada. Lo que se necesita en realidad es un sistema elaborado de instrumentos de detección capaces de examinar todo el cielo con detalle y a lo largo de un prolongado período de tiempo. Desafortunadamente, esto costaría elevadas sumas de dinero y muchísimo trabajo, y aunque la humanidad está bien dispuesta a gastarse billones de dólares al año en guerras y preparativos bélicos, está mucho menos dispuesta a invertir cantidades muy inferiores en algo parecido a SETI. Domina la creencia de que no es probable que se tenga éxito, y que una iniciativa semejante sería tanto como tirar el dinero. Entre quienes han visto demasiadas películas realizadas con mentalidad primitiva, persiste alguna sospecha de que si hacemos algo para atraer la atención de los alienígenas, éstos podrían sentirse estimulados a venir a la Tierra y conquistarnos (como si pudieran amenazarnos

más de lo que ya nos tomamos el trabajo de amenazarnos nosotros mismos).

Realmente, SETI podría constituir una empresa provechosa, aun en el caso de que no diéramos con ningún mensaje. En primer lugar, las tentativas de reunir instrumentos apropiados para la recepción de dichos mensajes sin duda contribuiría a perfeccionar nuestras técnicas de radioastronomía, y esto resultaría útil en muchos sentidos, aunque acabáramos renunciando a la investigación.

En segundo lugar, si inspeccionamos el cielo cuidadosamente y no recibimos mensajes, seguro que sí encontraremos muchos objetos de interés que no descubriríamos sin el auxilio de nuestras nuevas técnicas y sin una búsqueda cuidadosa y tenaz. Los púlsares, por ejemplo, no se localizaron porque alguien se lo propusiera: el descubrimiento fue casual, un inesperado subproducto de una investigación científica.

Tercero, aunque detectáramos alguna clase de mensaje y no pudiéramos hacer nada con él (y es muy probable que no fuéramos capaces de interpretar el producto de unas mentes alienígenas), el mero hecho de su existencia probaría que los seres inteligentes pueden alcanzar el dominio de la tecnología mucho más lejos que nosotros sin destruirse necesariamente.

Cuarto, si los alienígenas estuvieran interesados en que los comprendiésemos, y transmitieran un mensaje lo bastante elemental como para permitirnos interpretarlo, se abriría ante nosotros el camino para aprender mucho y adelantar nuestro propio conocimiento más allá de los niveles que ordinariamente podría alcanzar por evolución normal.

Actualmente existen numerosos proyectos SETI, en busca de vida extraterrestre inteligente, ya sea por medio del análisis de señales electromagnéticas capturadas en radiotelescopios, o bien enviando al espacio mensajes de distintas naturalezas a la espera de que alguno obtenga respuesta. Aprovechando las nuevas tecnologías, hoy en día casi 5 millones de usuarios de ordenador de

todo el mundo participan en el proyecto SETI@home, procesando con sus computadoras los datos que captura el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico.

103. ¿Representa la Galaxia el universo entero?

Una vez Herschel hubo demostrado que las estrellas formaban una galaxia de forma lenticular, se aceptó que eso era el universo. Cuando se calculó su tamaño —100 000 años luz de diámetro, y conteniendo tal vez 2000 millones de estrellas—, ciertamente pareció lo bastante grande como para representar un universo de respetables dimensiones. Antes de la década de 1910, ningún astrónomo había soñado con un universo que se aproximara siquiera a esas cifras.

Y, sin embargo, la Galaxia no representaba la totalidad del universo. Así, se hallan fuera de la Galaxia las nubes de Magallanes, en las que Leavitt estudió las variables Cefeidas, lo que le permitió calcular la «vara de medir» utilizable para demostrar el verdadero tamaño de la Galaxia. A partir de sus Cefeidas podía demostrarse, en efecto, que la Gran Nube de Magallanes se encontraba a 160 000 años luz de distancia, y que la Pequeña Nube estaba a unos 200 000 años luz. Las nubes de Magallanes podían considerarse como satélites de la Galaxia, de la misma forma que la luna es un satélite de la Tierra y los planetas lo son del sol. En otras palabras, podemos considerar dichas nubes como distritos periféricos de la Galaxia.

¿Hay algo más que pueda encontrarse fuera de la Galaxia?

La sospecha, aunque no muy fundada, recaía sobre la nebulosa de Andrómeda (que ya hemos mencionado en relación con la hipótesis nebular de Laplace, por ejemplo). La nebulosa de Andrómeda es visible como un objeto pequeño de cuarta magnitud

que presenta a simple vista el aspecto de una estrella desvaída y ligeramente borrosa. El astrónomo alemán Simon Marius (1573-1624) fue el primero en observarla a través de un telescopio en 1612. Messier la incluyó en su lista de objetos borrosos que no eran cometas. Fue el 31.º de la lista, por lo que la nebulosa de Andrómeda en ocasiones se denomina M31.

Laplace elaboró su hipótesis nebular bajo la inspiración de la nebulosa de Andrómeda, que pensaba semejante a una masa turbulenta de gas, de manera que podía ser una estrella con su sistema planetario en proceso de formación. Immanuel Kant, quien en 1755 había precedido a Laplace en idear esa hipótesis, sustentaba un criterio distinto. Pensaba que los objetos como la nebulosa de Andrómeda eran sistemas estelares situados a enormes distancias, y los llamó universos isla. Estaba completamente en lo cierto, como luego se puso de manifiesto, pero su idea fue ignorada.

La nebulosa de Andrómeda presentaba un aspecto algo turbulento en derredor, y entre 1845 y 1850 lord Rosse (el que dio su nombre a la nebulosa del Cangrejo) observó más de una docena de otras nebulosas que presentaban la misma apariencia turbulenta. En efecto, algunas parecían molinillos o remolinos. Uno de los objetos de la lista de Messier, M51, presentaba un aspecto tan espectacularmente turbulento, que se la llamó nebulosa del Torbellino.

Estas nebulosas se denominaron nebulosas espirales, y la de Andrómeda fue una de ellas, pero se veía tan próxima al borde que no se distinguía con facilidad su naturaleza espiral. En 1900 habían sido descubiertas unas 13 000 nebulosas espirales, y todas ellas podían clasificarse como objetos de la Galaxia, y como sistemas planetarios en proceso de formación. (Más adelante resultó que la propia Galaxia representaba una estructura espiral, pero en 1900 esto se ignoraba).

Por entonces se estudiaban los espectros luminosos de los objetos astronómicos. En 1864 William Huggins había captado el

espectro de la nebulosa de Orión, y demostrado que consistía en líneas brillantes sobre un fondo oscuro, exactamente lo que se esperaba de una masa de gas caliente.

Por otra parte, el espectro de la nebulosa de Andrómeda, obtenido por vez primera en 1899, demostraba ser la clase de espectro que cabría esperar de una estrella. ¿Podía darse el caso, entonces, de que la nebulosa de Andrómeda fuese una masa de estrellas, pero situada mucho más lejos que la Vía Láctea o las nubes de Magallanes, hasta el punto de resultar imposible identificar estrellas individuales en ella? De ser así, tenía que encontrarse mucho más lejos de nuestra galaxia, y lo mismo cabría decir de las demás nebulosas espirales, de tal manera que el universo podría ser muchísimo más vasto que nuestra galaxia.

¿Cómo esclarecer el asunto? Si las estrellas normales ya están demasiado lejos para ser vistas en la nebulosa de Andrómeda (aceptando que ésta se componga de estrellas), ¿qué decir de las estrellas mucho más brillantes que las ordinarias? De las novas, por ejemplo.

Se dio el caso de que apareció una nova en la nebulosa de Andrómeda en 1885, y se le dio el nombre de S Andromedae. Alcanzó tal brillo, que casi era visible a simple vista. Sin embargo, no podía decirse si formaba o no parte de la nebulosa de Andrómeda, o era una simple nova que se había desarrollado en la dirección de dicha nebulosa y brillaba frente a ella, pero sin que existiera relación alguna entre ambas.

Lo que había que hacer era buscar más novas, y a ello se dedicó el astrónomo norteamericano Heber Doust Curtis (1872-1942). Mediante cuidadosa observación, percibió los débiles resplandores de numerosas novas en la nebulosa de Andrómeda. Había tantas de esas novas, que no existía la menor posibilidad de que se encontraran en distintos lugares en la dirección de la nebulosa. Ninguna otra región del cielo de igual tamaño producía tantas novas en tan breve tiempo. Sin embargo, las novas que parecían hallarse en la nebulosa de Andrómeda estaban realmente allí.

En segundo lugar, la mayor parte de las novae de Andrómeda eran tan tenues que apenas podían ser divisadas. Se percibían mucho más apagadas que las novae que formaban parte indudable de la Galaxia. La ausencia de luminosidad de estas estrellas hacía que la nebulosa pareciese mucho más alejada, y desde luego mucho más lejos de nuestra galaxia. (¿Por qué, entonces, S Andromedae era tan brillante? Posteriormente, los astrónomos decidieron que ello se debía a que no se trataba de una nova, sino de una supernova).

Las ideas de Curtis, hechas públicas en 1918, extrañaron al mundo de la astronomía, que se mostró reacio a secundarle. En 1920, Curtis y Shapley (que poco antes había determinado el tamaño de la Galaxia) debatieron la materia, y el segundo se opuso tenazmente a los puntos de vista del primero. La disputa concluyó con una especie de empate, pero conforme avanzó el tiempo se puso más y más de manifiesto que Curtis debía tener razón.

La cuestión acabó zanjándola Hubble, que se sirvió de un nuevo telescopio de cien pulgadas en el observatorio de Mount Wilson, en California. Con este instrumento, pudo individualizar las estrellas de la periferia de la nebulosa, las cuales demostraron ser una serie de objetos y no una simple masa de gas y polvo. En 1923, estuvo en condiciones de identificar una de esas estrellas como una Cefeida, y la empleó para estimar la distancia de la nebulosa de Andrómeda. La cifra que dio inicialmente era demasiado baja, pero lo bastante elevada como para demostrar que Andrómeda se encuentra muy alejada de nuestra galaxia.

Hoy día sabemos que la nebulosa está a 2,2 millones de años luz de distancia, lo que equivale a 22 veces la anchura total de nuestra galaxia. Con ello, Andrómeda pasó a considerarse una galaxia, y las nebulosas espirales se denominaron galaxias espirales.

Al parecer, el universo consiste en millones de galaxias, acaso miles de millones, y es muchísimo mayor que la Galaxia por sí sola.

104. ¿Se mueven las galaxias?

Una vez establecido, hace cuatrocientos años, que la Tierra se mueve alrededor del sol, y puesto en claro, hace ciento cincuenta años, que el sol se traslada en torno al centro de la Galaxia, no debería causarnos sorpresa enterarnos de que también la Galaxia se mueve.

Un detenido estudio de las galaxias más cercanas demuestra que nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, forma parte de un cúmulo de galaxias denominado grupo local. Sus dos miembros principales son la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, esta última de mayor tamaño que la nuestra, y que consta por lo menos de 300 000 millones de estrellas. En la periferia del grupo se encuentra otra gran galaxia llamada Maffei 1 (del nombre del astrónomo que primero la estudió), la cual puede o no formar parte del grupo local. Además, hay alrededor de veinte galaxias menores, cada una de las cuales contiene hasta 100 000 millones de estrellas.

Las galaxias que forman parte del grupo local, incluida la nuestra propia, se mueven majestuosamente en torno al centro de gravedad de todo el sistema, y todas ellas pueden ser incluidas en una esfera de alrededor de 3 500 000 años luz de diámetro. Pero incluso tan vasta esfera sólo representa nuestra inmediata vecindad. Más allá se extienden otros cúmulos de galaxias, algunas de ellas mucho mayores que el grupo local, y que constan de miles de galaxias.

Podemos conjeturar que en cada cúmulo de galaxias, las galaxias individuales giran alrededor de algún centro de gravedad, pero ¿se mueven los cúmulos propiamente dichos?

El primer intento de respuesta a esta pregunta se dio aun antes de que los astrónomos conocieran la existencia de otras galaxias en el universo. En 1912, el astrónomo norteamericano Vesto Melvin Slipher (1875-1969) midió la velocidad radial de la nebulosa de Andrómeda (como se la llamaba entonces) y halló que se aproximaba a nosotros a 200 km por segundo. Parte de esta aproximación es el resultado del movimiento del sol hacia la galaxia de Andrómeda en el curso de su propia revolución alrededor del centro de nuestra galaxia. Si la aproximación de la galaxia de Andrómeda a la nuestra se mide de centro a centro, la velocidad es sólo de 50 km por segundo.

Aunque esto pareciera una comprobación de lo más corriente, Slipher midió la velocidad radial de quince nebulosas, y salvo en el caso de Andrómeda y de otra galaxia (que luego resultó formar parte del grupo local), todas se estaban alejando de nosotros. Además, algunas de las velocidades de retroceso parecían insólitamente elevadas.

Otros astrónomos continuaron la tarea, y siguieron comprobando que todas las galaxias (excepto las dos que Slipher estudió al principio) se estaban alejando de nosotros. Y cuanto menos brillantes eran, más aprisa se alejaban (cabe suponer que precisamente por hallarse más distantes).

El astrónomo norteamericano Milton La Salle Humason (1891-1972) tomó fotografías que incluían exposiciones continuadas noche tras noche, a fin de obtener los espectros de las galaxias muy tenues. En 1928, localizó una galaxia que retrocedía a una velocidad de 3800 km por segundo, y en 1936, otra que alcanzaba los 40 000.

Este fenómeno planteaba un problema. ¿Por qué todas las galaxias habrían de alejarse de nosotros, y por qué ese movimiento ganaba en velocidad y en distancia? ¿Tenía algo especial nuestra galaxia? ¿Acaso repelía a las demás, y esta repulsión crecía con la distancia?

Pero eso carecía de sentido. Si nuestra galaxia ejercía una fuerza de repulsión, ésta afectaría también a los grupos locales, y no era así. Además, una fuerza de repulsión que se incrementara con la lejanía no parecía probable. Un polo magnético podía repeler a otro como él, y una carga eléctrica podía repeler a otra como ella, pero en cada caso la repulsión se debilitaba con el aumento de la distancia. Debía, pues, haber otra explicación.

Hubble, que fue el primero en ver auténticas estrellas en el seno de la galaxia de Andrómeda, zanjó la cuestión. Observó que las galaxias no se limitaban a alejarse de nosotros, sino que se alejaban unas de otras. En cualquier galaxia que nos encontráramos, nos parecería que todas las demás se alejaban de nosotros a una velocidad que se incrementaba con la distancia. Hubble concluyó en 1919 que el universo entero iba expandiéndose paulatinamente, y que las galaxias se alejaban entre sí como parte de la expansión y no por causa de una fuerza de repulsión.

En 1916, y dentro de su teoría general de la relatividad, Albert Einstein elaboró una serie de ecuaciones encaminadas a expresar las propiedades del universo como un todo. Aquéllas demostraban que el universo había de expandirse, pero el propio Einstein no se percató de ello en ese momento.

105. ¿Existe un centro del universo?

El sol es el centro del sistema solar, y todos los objetos planetarios giran a su alrededor. Hay un núcleo central de la Galaxia, y todas las estrellas de su periferia se trasladan en torno a él. ¿Hay, pues, un centro del universo, un punto respecto del cual todas las galaxias retroceden?

Parece que debería haberlo, pero no lo hay, porque la expansión del universo no se produce en la forma usual en tres dimensiones. En efecto, es tetradimensional, pues no sólo incluye las tres dimensiones acostumbradas (longitud, anchura y altura), sino una cuarta que es el tiempo. Resulta difícil ilustrar una expansión tetradimensional, pero podemos explicarla, quizá, con la analogía de un globo que se hincha.

Imaginemos que el universo es un globo que se hincha, que las galaxias son puntos en su superficie y que vivimos en uno de esos puntos. Imaginemos que ni nosotros ni las galaxias podemos abandonar la superficie del globo: somos capaces de deslizarnos por ella, pero nunca despegarnos o penetrarla. En cierto modo, estamos pintándonos como seres bidimensionales.

Si el universo continuara expandiéndose y la superficie del globo fuera dilatándose, los puntos sobre ella se alejarían más y más entre sí. Cualquiera que se encontrase en uno de los puntos vería alejarse los demás, y cuanto más lejos estuviera un punto en concreto, más aprisa se alejaría.

Imaginémonos ahora en busca del lugar con respecto al cual se alejan todos los puntos. No lo encontraríamos en ninguna parte de la superficie bidimensional del globo. La auténtica expansión se

efectúa en relación con el centro mismo del globo, que está en su interior, en la tercera dimensión, que nosotros no podemos explorar porque estamos confinados en la superficie.

De la misma manera, el lugar del universo a partir del cual se originó la expansión no está en ninguna parte del espacio tridimensional del universo a la cual podamos viajar; se encuentra en algún lugar del pasado, hace miles de millones de años, y no podemos viajar allí, aunque como veremos sí podemos obtener información acerca de él.

106. ¿Cuál es la edad del universo?

Si el universo está expandiéndose, ayer era más pequeño que hoy, y era aún más pequeño el año pasado. Si nos imaginamos retrocediendo más y más en el tiempo, el universo debe haber sido alguna vez muy reducido, y toda la materia que contenía debía de estar muy comprimida en un volumen muy limitado.

El primero en considerar seriamente esa idea fue el astrónomo belga Georges-Édouard Lemaître (1894-1966). En 1927, sugirió que el universo empezó como un «huevo cósmico» que explotó violentamente. El actual universo en expansión sería el resultado de ese fenómeno. El astrónomo rusoamericano George Gamow (1904-1968) llamó a esa explosión el *big bang*, y el nombre ha pervivido.

Pero ¿cuándo se produjo ese big bang? Si conocemos la separación media de las galaxias y el ritmo al que se alejan una de otra, resultaría fácil calcular retrospectivamente y averiguar cuándo estaban juntas.

Eso, no obstante, plantea algunas dificultades. En primer lugar, es difícil determinar a qué distancia se encuentra una galaxia concreta de otra. Segundo, resulta asimismo difícil precisar con qué rapidez se están alejando. Tercero, no es probable que la expansión se haya producido siempre al mismo ritmo.

Cuando Hubble decidió que el universo se expandía, empleó las cifras que mejor pudo calcular para la separación media, el ritmo de expansión y el cambio de este ritmo con el tiempo, y decidió que el big bang se produjo hace 2000 millones de años. Esta estimación fue recibida por la desaprobación generalizada de geólogos y biólogos, los cuales estaban plenamente convencidos de que la

Tierra tenía una edad muy superior a 2000 millones de años, e insistían en que el universo no podía ser de ningún modo más joven que la propia Tierra.

En los sesenta años siguientes a la primera estimación de Hubble, se ha ido obteniendo información que ha relegado el big bang más y más atrás en el pasado. Ahora, la cifra más comúnmente admitida precisa que el big bang se produjo hace 15 000 millones de años, es decir, que la edad del universo es ésa. Pero no falta quien discrepa, y hay astrónomos que propugnan una antigüedad de 10 000 millones de años y otros, de 20 000 millones. Cabe imaginar que cuando se disponga de más y mejores pruebas, se llegará a alguna decisión al respecto.

Si la cifra de 15 000 millones de años es correcta, el universo ya contaba 10 000 millones de años cuando se formó nuestro sistema solar.

En mayo de 1999 el telescopio Hubble, tras ocho años de investigaciones, aportó datos que permitían atribuir al universo unos 12 000 millones de años. En 2002, tras nuevas investigaciones, el Hubble aportó nuevos datos que concluían que en realidad la edad del universo es de entre 13 000 y 14 000 millones de años.

107. ¿Qué son los cuásares?

Ya he dicho que no podemos viajar al pasado para comprobar cuándo se produjo el big bang o en qué circunstancias, pero sí podemos mirar a ese pasado.

Siempre que contemplamos un objeto distante sabemos que la luz (o las radioondas) que recibimos ha invertido cierto tiempo en llegar hasta nosotros. La radiación no puede viajar a mayor velocidad que la luz (unos 299 800 km por segundo) en ninguna circunstancia, y vemos el objeto sólo como era cuando la radiación inició su viaje, no al finalizarlo. Así, cuando observamos la galaxia de Andrómeda, debemos recordar que la luz que percibimos abandonó la galaxia hace 2 200 000 años, de manera que la vemos como era entonces.

Desde luego que la galaxia de Andrómeda probablemente presenta hoy un aspecto muy parecido al de esos tiempos, por lo que el retraso tiene escasa significación. Pero ¿qué sucede cuando observamos objetos que se encuentran mucho más alejados? ¿Cuáles son los objetos más distantes que podemos percibir?

Esos objetos fueron vistos antes de que tuviéramos la menor idea de lo lejos que estaban. Conforme se perfeccionaron los radiotelescopios y se definió la imagen que nos transmitieron las microondas, fue posible identificar ciertas radiofuentes de regiones muy pequeñas. Se trataba de las llamadas radiofuentes compactas, entre las cuales se contaban objetos conocidos como 3C48, 3C147, 3C196, 3C273 y 3C288. Aquí, 3C es la abreviatura de *Third Cambridge Catalog of Radio Stars*, una lista compilada por el astrónomo británico Martin Ryle (1918-1984).

En 1960, el astrónomo norteamericano Allan Rex Sandage (n. en 1926) investigó esas fuentes y halló que todas ellas parecían provenir de estrellas tenues de decimosexta magnitud, que se diría formaban parte de nuestra galaxia. Esto resultaba bastante insólito, pues las estrellas individuales no solían ser fuentes de microondas detectables. Las recibimos del sol porque éste se halla cerca de nosotros, pero no de otras estrellas, ni siquiera de las que sólo se encuentran a unos pocos años luz. ¿Por qué, entonces, habrían de recibirse microondas de esas estrellas tenues? Los astrónomos consideraron que podía tratarse de estrellas anormales, y por eso las llamaron radiofuentes casi estelares (*quasi-stellar*). En 1964, el físico chinoamericano Hong-Yee Chiu abrevió *quasi-stellar* en *quasar*, que se ha transcrito en español como cuásar, y la denominación hizo fortuna.

Pero ¿qué eran los cuásares? En 1963, el astrónomo holandés-americano Maarten Schmidt (n. en 1929) se interrogó sobre el espectro de 3C273. Las líneas parecían todas ellas extrañas, hasta que de repente se dio cuenta de que se trataba de las familiares líneas que aparecían de ordinario en el extremo del ultravioleta. Simplemente, se habían desplazado hacia el rojo en un grado enorme, y por eso no las había reconocido.

A partir del desplazamiento hacia el rojo, pudo calcularse que 3C273 no era una estrella ordinaria de la Galaxia, sino un objeto situado a unos mil millones de años luz de distancia, más lejos que cualquier galaxia corriente detectada hasta entonces. Los demás cuásares se hallan aún más lejos. El más cercano es 3C273. Hoy día ya se conocen cientos de ellos, y algunos distan 10 000 o 12 000 millones de años luz.

Ahora el problema se centra en cómo pueden descubrirse esos objetos a semejantes distancias. Debemos admitir que son más luminosos que las galaxias: tanto como un billón de soles y cien veces más brillantes que una galaxia ordinaria.

Al mismo tiempo se averiguó que la radiación que emitían variaba, y a veces se registraba una considerable variación en unas

pocas semanas. Esto indicaría que el cuásar no podía estar a más de unas pocas semanas luz (o sea, que tendría alrededor de un billón de kilómetros de diámetro), pues de otro modo cualquier influencia causada por la variación no podría transmitirse de un extremo al otro en tan escaso tiempo. En efecto, nada puede transmitirse a una velocidad superior a la de la luz. ¿Cómo podía emitir un objeto tan pequeño tanta energía?

La respuesta más probable data de 1943, cuando el astrónomo norteamericano Carl Seyfert observó una galaxia que presentaba un núcleo muy brillante y muy pequeño. Ya habían sido observadas otras galaxias como ésta, y el grupo en su conjunto se denomina ahora galaxias de Seyfert.

Los núcleos de las galaxias de Seyfert son muy activos, posiblemente debido a que contienen agujeros negros de insólitas dimensiones que producen estragos en dichos núcleos. Quizá los cuásares son galaxias de Seyfert particularmente vastas y brillantes, y todo cuanto vemos, a tan gran distancia, son sus pequeños, activísimos y muy luminosos núcleos. Recientes estudios han demostrado que los cuásares presentan unos contornos borrosos que podrían representar las regiones más externas de una galaxia.

Dado que los cuásares se localizan en su mayor parte a distancias enormes, del orden de miles de millones de años luz, sin duda florecieron hace miles de millones de años, durante la juventud del universo. Tal vez cuando las galaxias eran también jóvenes, un elevado número de ellas se colapsó catastróficamente en el centro, dando lugar a agujeros negros. Con el tiempo, esos agujeros negros absorbieron todo cuanto resultaba fácil de absorber, y las galaxias se transformaron en objetos menos sujetos a convulsiones, más regulares, de modo que todos los cuásares «se enfriaron» y dejaron de existir hace mil millones de años.

Esto demostraría por sí solo que el universo era muy distinto en su juventud de lo que es ahora, y que se ha operado un proceso evolutivo. Lo cual tiende a desautorizar las teorías en sentido contrario, para las que el universo no habría tenido un verdadero

principio, y en su conjunto, y desde un pasado indefinido, habría presentado siempre el mismo aspecto.

108. ¿Podemos ver el big bang?

Con independencia de lo lejos que alcancemos a penetrar, no podemos ver el big bang en sí. En años recientes, se ha informado de que habían sido vistas galaxias a una distancia de quizá 17 000 millones de años luz (lo que parecería indicar que el universo tiene al menos 17 000 millones de años), y que son tan numerosas que parecen amontonadas. Esto último no es de sorprender, pues naturalmente hace 17 000 millones de años el universo era mucho menor que ahora, y las galaxias deberían estar por entonces mucho más cerca unas de otras.

Sin embargo, aún no podemos ver el big bang mismo, al menos por medio de la luz. En los primeros días del universo, el espacio no era transparente como hoy día, sino que estaba repleto de una niebla de energía. Dondequiera que mirásemos, es probable que tropezáramos con esa niebla impenetrable.

Pero eso sólo afecta a la luz. En 1949, Gamow, el inventor del término *big bang*, señaló que aún estaríamos en condiciones de percibir un leve y lejano eco del big bang. Como resultado de esa explosión cósmica, debería haber microondas que nos llegarían de ella a través de la niebla, e incluso predijo el exacto contenido energético de esas microondas.

Además, como los telescopios alcanzan más y más distancia, y por tanto se adentran más y más en el pasado, tienden a seguir una línea espiral hacia dentro a medida que el universo se va contrayendo de modo paulatino conforme el tiempo retrocede. En cualquier dirección que miremos, la espiral nos conduce al centro y al big bang. Tal como Gamow predijo, las microondas provendrían

de todas las partes del firmamento por igual, y con la misma energía y características por doquier.

En 1964, el físico germanoamericano Arno Allan Penzias (n. en 1933) y su colega, también norteamericano, Robert Woodrow Wilson (n. en 1936) detectaron este fondo de microondas uniformes aproximadamente con las energías predichas por Gamow. Ésta se considera la mejor prueba hasta el momento de que el big bang se produjo en realidad.

Ahora los astrónomos tratan de determinar los acontecimientos que se desarrollaron en los primeros momentos del big bang. Razonan que si miran atrás en el tiempo, pueden ver los objetos del universo reunirse y colisionar, como en una película proyectada en sentido inverso, por así decirlo. El resultado ha de ser el mismo que cuando la materia del sistema solar se reunió para formar el sol y los planetas. La temperatura aumentó y creó un centro caliente de la Tierra y otro aún más caliente del sol. Si miramos atrás en el tiempo y consideramos la totalidad de la materia del universo agregándose, formaría un centro del universo muchísimo más caliente todavía. En otras palabras, al principio el universo era muy pequeño e increíblemente caliente, y desde entonces ha venido expandiéndose y enfriándose.

Al admitir temperaturas elevadísimas, los científicos han avanzado especulaciones relativas al desarrollo de los acontecimientos en las primeras fracciones de segundo tras el big bang. Se interrogan sobre lo que ocurrió en la primera septillonésima de segundo. Prosiguen las especulaciones, y podemos seguir con ellas hasta que se hayan acumulado pruebas suficientes como para fundamentar mejor las teorías.

Con posterioridad a la redacción del presente texto, se ha logrado «ver» el momento inmediatamente posterior al big bang. En 1992, y después de tres años de análisis de los más de 200 millones de datos enviados por el satélite COBE (Cosmic Background Explorer, Explorador de la Radiación cósmica de Fondo), un equipo

dirigido por el astrofísico George Smoot, de la Universidad de California, pudo reconstruir visualmente el momento en que el universo contaba «sólo» 300 000 años de antigüedad.

109. ¿Cómo se produjo el big bang?

Hasta fecha muy reciente, la mayor parte de las personas en los países occidentales creía que la Tierra y el cielo se habían formado por creación sobrenatural hace unos 6000 años. (Muchos son los que siguen creyendo eso sinceramente, con lo que en el plano intelectual se colocan al nivel de quienes aún sostienen que la Tierra es plana). Pero hoy día los científicos suelen aceptar que el sistema solar se formó en virtud de una serie de procesos naturales a partir de una nube de polvo y gas hace 4600 millones de años, y que esa nube existía desde los momentos inmediatamente posteriores al origen del universo, tal vez hace unos 15 000 millones de años.

Pero aun remontándonos al big bang e imaginándonos que toda la materia y la energía del universo estaba concentrada en una bolita de increíble densidad, una materia inimaginablemente caliente que explotó para formar el universo, ¿de dónde provenía la bolita? ¿Cómo llegó a existir? ¿Debemos aceptar la creación sobrenatural en ese estadio?

No necesariamente. En la década de 1920 se introdujo una rama de la ciencia llamada mecánica cuántica, demasiado compleja para tratar aquí de ella. Ha sido una teoría que ha tenido un extraordinario éxito, pues ha servido para explicar fenómenos que de otra manera no recibían una explicación adecuada, y para predecir nuevos fenómenos que se han cumplido luego con absoluta precisión.

En 1980, el físico norteamericano Alan Guth (n. en 1947) se planteó el problema del origen del big bang en términos de mecánica cuántica. Podríamos visualizar el universo antes de que el

big bang se produjera, como un vasto, ilimitado mar de nada. Pero al parecer ésta no es una descripción adecuada. La nada contiene energía y no está vacía por completo, ya que, por definición, un vacío no contiene nada en absoluto. El preuniverso poseía energía, y puesto que todas sus demás propiedades se asemejan a las propias de un vacío, se denomina *falso vacío*.

En este falso vacío aparece un minúsculo punto de existencia allá donde resultó haber energía, por obra de las ciegas fuerzas de los cambios fruto del azar, que la habían concentrado. De hecho, podemos imaginar el ilimitado falso vacío como una masa espumeante y burbujeante, produciendo fragmentos de existencia acá y allá, como una ola del océano produce espuma. Algunos de esos fragmentos de existencia podrían desaparecer con rapidez, regresando al falso vacío. Pero otros tendrían tamaño suficiente o se habrían formado en condiciones tales, que emprendieron una rápida expansión constituyendo un universo. Y nosotros habitamos una de esas burbujas que alcanzaron el éxito.

Este modelo plantea muchos problemas, y los científicos aún se esfuerzan por hacerlo encajar y por resolver esos problemas. Cuando lo consigan, si en efecto lo consiguen, ¿tendremos una idea más cabal del origen del universo?

Desde luego que si alguna versión de la teoría de Guth es correcta, sencillamente podríamos dar un nuevo paso atrás y preguntar de dónde provino la energía primera que actuó en el falso vacío. Eso no podemos precisarlo, pero no nos ayudaría a esclarecer la cuestión suponer que en este punto hubo una creación sobrenatural. En este caso, en efecto, podríamos dar otro paso atrás e interrogarnos acerca de la procedencia de la entidad sobrenatural. La respuesta a esa pregunta suele ser un sorprendido «No vino de ninguna parte; siempre *fue*». Lo cual resulta difícil de visualizar, y por la misma razón también podríamos afirmar que la energía del falso vacío estuvo allí siempre.

110. ¿Continuará indefinidamente la expansión del universo?

¿Hay algo que actúe para frenar y detener la expansión del universo?

La única fuerza que conocemos que produciría ese efecto es la atracción mutua de todas las partes del universo: la fuerza de la gravedad. El universo se expande en contra de su propia fuerza gravitatoria, con lo que el proceso de expansión debe gastar energía a fin de vencer esa fuerza. Al actuar así, la expansión se frena y acabaría deteniéndose. En este caso, tras una breve pausa, el universo empezaría a reunirse de nuevo y acabaría en un gran choque, o sea, lo contrario del big bang. Si el universo sigue expandiéndose indefinidamente, se llama *universo abierto*, y si con el tiempo detiene su expansión y empieza a contraerse, recibirá el nombre de *universo cerrado*.

Nos enfrentaríamos al mismo problema si considerásemos un objeto arrojado a lo alto desde la superficie de la Tierra, en contra de la fuerza de la gravedad. Pertenece a nuestra experiencia común que semejante objeto, arrojado en circunstancias normales, acaba siendo vencido por la atracción gravitatoria de la Tierra. Su velocidad ascensional decrece hasta cero, y a continuación empieza a caer de nuevo al suelo. Cuanta mayor fuerza se le imprime hacia arriba, mayor es su inicial velocidad ascensional, mayor altura alcanza y más tarda en volver a caer.

Por la misma razón, la atracción gravitatoria de la Tierra se debilita con la distancia. Si un objeto es arrojado hacia arriba con velocidad suficiente, alcanza una altura tal, que la fuerza de

gravedad de la Tierra ya no bastará para frenar su movimiento. En efecto, prosigue su trayectoria hasta sobrepasar el campo gravitatorio terrestre, y jamás regresa. La velocidad con que un objeto puede iniciar su movimiento ascensional debe ser superior a los 11 000 m por segundo para que se produzca aquel fenómeno. Esta velocidad, llamada de escape, es la que generalmente deben alcanzar los cohetes que se envían a la luna y más allá.

Podríamos preguntar entonces si el ritmo de expansión del universo hacia fuera, esto es, en contra de la atracción gravitatoria hacia dentro, ha alcanzado la velocidad de escape. A fin de llegar a una decisión, los científicos deben estimar cuál es aquel ritmo. También han de estimar la densidad media de la materia en el universo, lo cual les daría una idea de la fuerza de la atracción gravitatoria hacia dentro. Ambas determinaciones, el ritmo de expansión y la densidad media del universo, resultan difíciles de establecer, y los resultados son sólo aproximados.

La conclusión es, por tanto, que la densidad real de la materia en el universo es de sólo alrededor del 1% requerido para llevar a término la expansión. Así pues, el universo parecería abierto y sometido a una indefinida expansión. Es así solamente si tomamos en cuenta la materia que podemos ver. Si hay materia adicional que no podemos ver o sentir de ninguna manera, eso sería señal de que el universo, después de todo, podría estar cerrado.

111. ¿Hay en el universo materia que no podemos ver?

Los astrónomos creen que debe haberla. En varias ocasiones he señalado que la influencia gravitatoria nos brinda enseñanzas que la luz no nos da. Así, Sirio B fue descubierto por su influencia gravitatoria sobre Sirio A antes de que este último fuera visto. El planeta Neptuno fue descubierto por su influencia gravitatoria sobre Urano antes de ser avistado, y así sucesivamente.

En las galaxias, toda masa parece concentrada hacia el centro, y las estrellas situadas en la periferia se trasladan en torno del núcleo galáctico de manera muy parecida a como los planetas giran alrededor de una estrella. Podríamos esperar, por tanto, que las estrellas giraran alrededor de los centros de sus respectivas galaxias cada vez más despacio, a medida que se hallaran más alejadas del núcleo. Esto es cierto en el caso de nuestro sistema solar, donde los planetas se mueven cada vez más despacio conforme se incrementa la distancia respecto del sol.

Podemos determinar la velocidad de rotación de una galaxia midiendo su velocidad radial a distintas distancias del núcleo. Resulta de ello que en las galaxias que admiten esas mediciones, las estrellas se trasladan en torno del núcleo de la galaxia aproximadamente a la misma velocidad, sin que importe lo alejadas que estén de él.

Esta observación desafía la ley de la gravedad, y los científicos no desean prescindir de dicha ley. Como alternativa, deben suponer que la masa de galaxias no está concentrada en el núcleo, sino que se dispersa ampliamente por toda la galaxia. Así pues, ¿cómo

puede ser cierto eso cuando vemos que la masa, en forma de estrellas, *está* concentrada hacia el centro?

Otro misterio es que las galaxias de un cúmulo dado tiendan a reunirse, sostenidas por su mutua gravitación. Por tanto, si calculamos la atracción que cada galaxia debería ejercer en virtud de las estrellas que contiene, y la velocidad con que las galaxias de un cúmulo se mueven la una en relación con la otra, llegamos a la conclusión de que no hay fuerza gravitatoria suficiente para mantener juntos los cúmulos. Y sin embargo lo están, lo cual sólo puede significar que hay materia adicional en ellos que nosotros no podemos ver, pero que se halla presente en cantidades suficientes como para suministrar la necesaria fuerza gravitatoria a fin de mantener los cúmulos en su lugar.

¿Qué puede ser esa materia adicional invisible? Los astrónomos aún no conocen la respuesta, y se refieren a ella como «el misterio de la materia perdida». No faltan las especulaciones, pero debemos aguardar la aportación de nuevas pruebas antes de tener la razonable seguridad de qué es esa materia, o si es que en realidad existe. Podemos afirmar que de existir, podría hallarse en cantidad suficiente como para cerrar el universo y asegurarnos que, algún día, quizá dentro de billones de años, todo empezará a contraerse de nuevo. Esto es un simple ejemplo de los muchos enigmas que, pese a todos nuestros éxitos y realizaciones, siguen planteados ante nosotros en el mundo y nos conciernen directamente.

En el año 2005, el observatorio de rayos X de la NASA Chandra halló la materia perdida en dos enormes nubes intergalácticas de gas caliente difuso. Según publicó la revista Nature, estas dos nubes cósmicas contienen aproximadamente la mitad de los átomos e iones del universo «perdidos» tras el big bang.

Notas

[¹] La actualización del texto, desde la publicación del libro original hasta nuestros días, realizada por Anna Marta Roca, está reflejada a lo largo de todo el libro con párrafos en cursiva. (Nota del editor). <<