

## Reseña

Nuestros verdaderos orígenes no son sólo humanos, ni siquiera terrestres, sino cósmicos.

*Orígenes* es un libro sorprendente y absorbente, que empieza con el Big Bang y termina con la búsqueda de vida extraterrestre, en el cual los autores sintetizan los resultados de diversos campos científicos para presentar una especie de consiliencia cosmológica.

*Orígenes* es una excelente guía con la que viajar «de vuelta al principio de todo».

## Índice

[Agradecimientos](#)

[Prefacio](#)

[Prólogo](#)

- I. [El origen del universo](#)
- II. [El origen de las galaxias y la estructura cósmica](#)
- III. [El origen de las estrellas](#)
- IV. [El origen de los planetas](#)
- V. [El origen de la vida](#)

[CODA](#)

[Glosario de términos seleccionados](#)

[Lecturas recomendadas](#)

[Imágenes](#)

[Autores](#)

## **Agradecimientos**

*A todos los que buscan, y a todos los que aún no saben lo que deberían*

Por leer y releer del manuscrito, y garantizar que queríamos decir lo que decíamos y decíamos lo que queríamos decir, estamos en deuda con Robert Lupton, de la Universidad de Princeton. Sus conocimientos tanto de astrofísica como de lengua inglesa permitieron que el libro tuviera un nivel muy por encima de lo previsto. También damos las gracias a Sean Carroll, del Instituto Fermi de Chicago; a Tobías Owen, de la Universidad de Hawái; a Steven Soter, del Museo Americano de Historia Natural; a Larry Squire, de la UC San Diego; a Michael Strauss, de la Universidad de Princeton; y al productor Tom Levenson, de PBS NOVA, por aportar sugerencias clave que mejoraron diversas partes del libro.

Por confiar en el proyecto desde el principio, manifestamos nuestro agradecimiento a Betsy Lerner, de la Agencia Gernert, quien vio el manuscrito no sólo como un libro, sino también como la expresión de un profundo interés por el cosmos, que merecía la máxima audiencia posible con la que compartirlo.

Algunas secciones importantes de la parte II y fragmentos dispersos de las partes I y III habían aparecido ya en artículos publicados por Neil deGrasse Tyson en la revista *Natural History*. Por ello, Neil da las gracias a Peter Brown, redactor jefe de la revista, y sobre todo a Avis

Lang, editora jefe, que sigue trabajando heroicamente como erudita guía literaria de los esfuerzos de NDT como escritor.

Los autores agradecen asimismo el respaldo de la Fundación Sloan durante la preparación y la redacción del libro. Seguimos admirando su apoyo a proyectos como este.

NEIL DEGRASSE Tyson, Nueva York  
DONALD GOLDSMITH, Berkeley, California  
Junio, 2004

## **Prefacio**

### *Una reflexión sobre los orígenes de la ciencia y la ciencia de los orígenes*

Ha surgido, y sigue floreciendo, una nueva síntesis de conocimiento científico. En los últimos años, las respuestas a preguntas sobre nuestros orígenes cósmicos no han llegado exclusivamente desde el ámbito de la astrofísica. Trabajando bajo el paraguas de campos emergentes con nombres como astroquímica, astrobiología o física de las astropartículas, los astrofísicos han admitido que pueden sacar un gran provecho de los avances de otras ciencias. Recurrir a múltiples ramas de la ciencia para responder la pregunta «¿De dónde venimos?» ofrece a los investigadores una amplitud y una profundidad de percepciones antes insospechadas sobre el funcionamiento del universo.

En *Orígenes: catorce mil millones de años de evolución cósmica*, introducimos al lector en esta nueva síntesis de conocimiento, la cual nos permite abordar no sólo el origen del universo, sino también el origen de las estructuras más grandes que ha formado la materia, el origen de las estrellas que iluminan el cosmos, el origen de los planetas que ofrecen los lugares más adecuados para la vida y el origen de la vida propiamente dicha en uno o más de esos planetas. Los seres humanos continúan fascinados por el tema de los orígenes por muchas razones, tanto lógicas como emocionales. Difícilmente podemos comprender la esencia de algo si no sabemos de dónde procede. Y todas las historias que escuchamos sobre los orígenes

engendran en nuestro interior hondas resonancias. Debido al egocentrismo que la evolución y la experiencia en la Tierra nos han inoculado en la médula, al contar la mayoría de las historias sobre el origen nos hemos centrado, como es lógico, en episodios y sucesos locales. No obstante, gracias a cada avance en el conocimiento del cosmos sabemos que vivimos en una mota cósmica de polvo que gira alrededor de una estrella mediocre de la periferia de un tipo corriente de galaxia, una más entre los cien mil millones de galaxias que pueblan el universo. La noticia de nuestra irrelevancia cósmica desencadena en la psique humana impresionantes mecanismos de defensa. Muchos nos parecemos, sin darnos cuenta, al hombre de la historieta que contempla el cielo estrellado y le dice a su compañero: «Cuando miro todas esas estrellas, me asombra lo insignificantes que son».

A lo largo de la historia, las distintas culturas han elaborado mitos de la creación según los cuales nuestros orígenes son el resultado de fuerzas cósmicas que forjan nuestro destino. Estas historias nos han ayudado a mantener a raya la sensación de insignificancia. Aunque normalmente los relatos sobre los orígenes empiezan con un cuadro general, bajan a la Tierra a una velocidad pasmosa; pasan como una flecha por la creación del universo, de todo lo que contiene, y de la vida en el planeta Tierra para llegar a prolijas explicaciones sobre innumerables detalles de la historia humana y sus conflictos sociales, como si de alguna manera nosotros constituyéramos el centro de la creación.

Casi todas las respuestas dispares a la cuestión de los orígenes aceptan como premisa subyacente que el cosmos se comporta con arreglo a normas generales que se revelan a sí mismas, al menos en principio, para que podamos examinar detenidamente el mundo que nos rodea. Los filósofos de la Grecia antigua llevaron esta premisa hasta cotas más elevadas al insistir en que los seres humanos son capaces de percibir el funcionamiento de la naturaleza amén de la realidad subyacente a lo observado, es decir, las verdades fundamentales que rigen todo lo demás. Como es lógico, afirmaban que descubrir esas verdades sería difícil. Hace dos mil trescientos años, en su reflexión más famosa sobre nuestra ignorancia, el filósofo griego Platón comparó a quienes se esfuerzan por alcanzar el conocimiento con prisioneros encadenados en una caverna, incapaces de ver los objetos situados a su espalda, y que, por tanto, partiendo de las sombras de dichos objetos, deben intentar deducir una descripción precisa de la realidad.

Con este símil, Platón no sólo resumía los intentos de la humanidad por entender el cosmos, sino que también hacía hincapié en que tenemos una tendencia natural a creer que ciertas entidades misteriosas, vagamente percibidas, dominan el universo y están al tanto de conocimientos que nosotros, en el mejor de los casos, vislumbramos sólo en parte. Desde Platón a Buda, desde Moisés a Mahoma, desde un hipotético creador cósmico hasta películas modernas sobre «la matriz», los seres humanos de todas las culturas han llegado a la conclusión de que el cosmos está regido por unos



poderes superiores dotados de conocimiento sobre la brecha que existe entre la realidad y la apariencia superficial.

Hace medio milenio, fue afianzándose poco a poco un nuevo enfoque para comprender la naturaleza. Esta actitud, que en la actualidad llamamos «ciencia», surgió de la confluencia de las nuevas tecnologías y los descubrimientos propiciados por estas. La proliferación de libros impresos en toda Europa y las mejoras simultáneas en los viajes por tierra y mar permitieron a los individuos comunicarse con más rapidez y eficacia, de tal modo que pudieron enterarse de lo que otros tenían que decir y responder a ello mucho más rápidamente que en el pasado. Durante los siglos XVI y XVII, esto aceleró un debate continuo y desembocó en una nueva manera de adquirir conocimiento, cimentada en el principio general de que el medio más eficaz para entender el cosmos se basa en observaciones detalladas del mismo combinadas con intentos de establecer principios amplios y fundamentales que las expliquen.

Otro concepto influyó también en el nacimiento de la ciencia: esta se apoya en el escepticismo organizado, esto es, en las dudas continuas y metódicas. Pocos dudamos de nuestras conclusiones, por lo que la ciencia adopta un enfoque escéptico que recompensa a quienes dudan de las conclusiones de otros. Podríamos considerar acertadamente que este planteamiento es poco natural, y no tanto porque requiere desconfiar de los pensamientos de alguien como porque la ciencia estimula y premia a quienes pueden demostrar que las conclusiones de otro científico son erróneas. Para los otros científicos, el científico que corrige el error de un colega, o que aporta

buenas razones para dudar seriamente de sus conclusiones, realiza una acción noble, como un maestro zen al dar un sopapo a un novicio que se aleja del camino de la meditación, si bien los científicos se corrigen unos a otros más como iguales que como maestro y alumno. Al recompensar a un científico que descubre los errores de otro — tarea que para la naturaleza humana es mucho más fácil que percibir los errores propios—, los científicos como grupo han creado un sistema innato de autocorrección: han elaborado la herramienta más efectiva y eficiente para analizar la naturaleza, pues tratan de rebatir las teorías de otros científicos incluso cuando respaldan sus concienzudos intentos por fomentar el conocimiento humano. Así pues, la ciencia viene a ser una actividad colectiva; en todo caso, no es una sociedad de admiración mutua ni pretendía serlo.

Como ocurre con todos los intentos de progreso humano, el enfoque científico funciona mejor en la teoría que en la práctica. No todos los científicos dudan unos de otros como realmente deberían. La necesidad de impresionar a colegas que ocupan puestos de poder, y el hecho de que a veces estén influidos por factores que escapan a su conocimiento consciente, acaso obstaculice la capacidad auto correctora de la ciencia. A largo plazo, no obstante, los errores no pueden perdurar, pues otros científicos los descubrirán y promoverán su propia carrera pregonando la novedad a los cuatro vientos. A la larga, las conclusiones que sobrevivan a los ataques de otros investigadores alcanzarán el estatus de «leyes», aceptadas como descripciones válidas de la realidad, aunque los científicos sepan muy

bien que tal vez, algún día, cada una de esas leyes se verá a sí misma formando parte de una verdad más amplia y profunda.

Sin embargo, los científicos no suelen dedicar tiempo a intentar desvelar los errores de los demás. Casi todos sus esfuerzos consisten en examinar hipótesis imperfectamente establecidas frente a resultados observacionales ligeramente mejorados. De vez en cuando, sin embargo, surge un enfoque sensiblemente nuevo sobre una teoría importante, o (más a menudo en una época de avances tecnológicos) un abanico de observaciones totalmente nuevo abre la puerta a un conjunto de hipótesis que expliquen esos resultados. Los grandes momentos de la historia científica se han dado, y siempre se darán, cuando una explicación nueva, quizá combinada con resultados observacionales nuevos, produce un cambio sísmico en nuestras conclusiones sobre el funcionamiento de la naturaleza. El progreso científico depende de individuos en ambos bandos: los que recogen mejores datos y extrapolan con cuidado a partir de ellos; y los que arriesgan mucho —y tienen mucho que ganar si les sale bien— poniendo en entredicho conclusiones comúnmente aceptadas.

El núcleo escéptico de la ciencia constituye un mal contrincante para la mente y el corazón humanos, que rehúyen las controversias en curso y prefieren la seguridad de verdades aparentemente eternas. Si el enfoque científico fuera sólo una interpretación más del cosmos, no habría acabado significando tanto; el gran éxito de la ciencia se basa en el hecho de que funciona. Si subimos a un avión construido conforme a los principios de la ciencia —principios que han sobrevivido a los diversos intentos de demostrar su falsedad—,

tenemos muchas más posibilidades de llegar a nuestro destino que si subimos a un avión construido con arreglo a la astrología védica.

A lo largo de la historia relativamente reciente, las personas enfrentadas al éxito de la ciencia a la hora de explicar los fenómenos naturales han reaccionado de cuatro maneras distintas. En primer lugar, una exigua minoría adopta el método científico como máxima esperanza para entender la naturaleza sin buscar otros medios de interpretación del universo. Segundo, un número mucho mayor ignora la ciencia, que considera poco interesante, opaca o contraria al espíritu humano. (Quienes ven la televisión con avidez, sin pararse a pensar de dónde vienen las imágenes y el sonido, nos recuerdan que las palabras *magia* y *máquina* comparten profundas raíces etimológicas). Tercero, otra minoría, consciente del aparente ataque de la ciencia sobre sus preciadas creencias, procura activamente rebatir resultados científicos que la irritan o la enfurecen. De todos modos, lo hacen fuera del marco escéptico de la ciencia, como podemos comprobar fácilmente al formularles esta pregunta: «¿Qué prueba os convencería de que estáis equivocados?». Estos anticientíficos todavía acusan el sobresalto descrito por John Donne en su poema «Anatomía del mundo: primer aniversario», escrito en 1611, cuando surgieron los primeros frutos de la ciencia moderna:

*Y la nueva filosofía lo pone todo en duda,  
el elemento del fuego está apagado,  
el Sol se ha perdido, y la Tierra, y no hay ingenio  
que guíe al hombre.*

*Y los hombres afirman que este mundo se ha desmoronado,*

*cuando en los planetas y el firmamento  
buscan otros nuevos; ven que este [mundo]  
se ha derrumbado sobre sus propios átomos.  
Y todo está hecho pedazos,  
perdida toda cohesión, todo justo soporte  
y toda relación...*

Cuarto, otro gran sector del público acepta el enfoque científico de la naturaleza mientras sigue creyendo que el cosmos está regido por entidades sobrenaturales situadas más allá de nuestro alcance intelectual. Baruch Spinoza, el filósofo que creó el puente más sólido entre lo natural y lo sobrenatural, rechazaba cualquier distinción entre la naturaleza y Dios, e insistía en que el cosmos es a la vez Dios y naturaleza. Los seguidores de las religiones más convencionales, que por lo general se empeñan en remarcar esta distinción, suelen reconciliar las dos ópticas separando mentalmente las esferas en las que actúan lo natural y lo sobrenatural. Con independencia del bando en que uno esté, no cabe duda de que la nuestra es una época muy prometedora para aprender lo que hay de nuevo en el cosmos. Iniciemos, pues, nuestra aventura en busca de los orígenes cósmicos; en ella actuaremos como detectives que deducen los hechos del crimen partiendo de las pruebas e indicios que vayan quedando atrás. Invitamos al lector a sumarse a la expedición que indagará pistas cósmicas —y los medios para interpretarlas— para quizá sacar a la luz la historia de cómo una parte del universo se ha transformado en nosotros.



## Prólogo

### *La historia más grande jamás contada*

*Este mundo ha persistido durante muchos años tras haber sido puesto en marcha con movimientos apropiados. A partir de ellos se deduce todo lo demás.*

LUCRECIO

Hace unos catorce mil millones de años, en el origen de los tiempos, todo el espacio y toda la materia y toda la energía del universo conocido cabían en una cabeza de alfiler. El universo estaba entonces tan caliente que las fuerzas básicas de la naturaleza, que en conjunto describen el universo, se hallaban fusionadas en una sola fuerza, unificada. Cuando el universo era un infierno a  $10^{30}$  grados y tenía sólo  $10^{-43}$  segundos de vida —tiempo antes del cual todas las teorías de la materia y el espacio pierden sentido—, a partir de la energía contenida en el campo de fuerzas unificado se formaron, desaparecieron y volvieron a formarse espontáneamente agujeros negros. Bajo esas condiciones extremas —en lo que hay que admitir que es física especulativa—, la estructura del espacio y el tiempo llegó a ser muy curva mientras borbotaba en una estructura esponjosa, como de espuma. Durante esa era, los fenómenos descritos por la teoría general de la relatividad (la teoría moderna de la gravedad) de Einstein y la mecánica cuántica eran indistinguibles.

Cuando el universo se expandió y se enfrió, la gravedad se separó de las otras fuerzas. Poco después, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electrodébil se escindieron una de otra, episodio que fue acompañado de una enorme liberación de energía almacenada, lo que provocó un incremento del tamaño del universo de  $10^{50}$ . La rápida expansión, conocida como la «era de la inflación», extendió y alisó la materia y la energía de modo que cualquier variación de densidad desde una parte del universo a la siguiente llegó a ser inferior a una cienmilésima.

Conforme a lo que actualmente es física confirmada en el laboratorio, el universo estaba lo bastante caliente para que los fotones convirtieran espontáneamente su energía en pares de partículas de materia-antimateria, que inmediatamente después se aniquilaron unas a otras, lo que devolvió su energía a los fotones. Por causas desconocidas, esta simetría entre materia y antimateria se había «roto» en la división de fuerzas previa, lo que se tradujo en un ligero exceso de la materia con respecto a la antimateria. La asimetría era pequeña, pero resultó crucial para la futura evolución del universo: por cada mil millones de partículas de antimateria, nacieron mil millones + 1 partículas de materia.

Mientras el universo seguía enfriándose, la fuerza electrodébil se dividió entre la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil, lo que completa las cuatro fuerzas conocidas y diferenciadas de la naturaleza. Mientras la energía del baño de fotones continuaba disminuyendo, los pares de partículas de materia-antimateria ya no podían ser creados espontáneamente a partir de los fotones disponibles. Los pares restantes de partículas de materia-antimateria



se destruyeron con rapidez, lo cual dejó un universo con una partícula de materia corriente por cada mil millones de fotones —y nada de antimateria—. Si no hubiera surgido esta asimetría entre materia y antimateria, el universo en expansión habría estado compuesto eternamente de luz y nada más, ni siquiera astrofísicos. Durante un período de aproximadamente tres minutos, la materia se convirtió en protones y neutrones, muchos de los cuales se combinaron para constituir los núcleos atómicos más simples. Entretanto, electrones errantes desparramaron fotones por todas partes, lo que creó una sopa opaca de materia y energía.

Cuando el universo se hubo enfriado unos cuantos miles de grados Kelvin —algo más caliente que un alto horno—, los electrones sueltos se desplazaron lo bastante despacio para ser arrancados de la sopa por los núcleos errantes y constituir átomos completos de hidrógeno, helio y litio, los tres elementos más ligeros. El universo había llegado a ser (por primera vez) transparente a la luz visible; en la actualidad, por cierto, estos fotones de vuelo libre son observables como radiación cósmica de microondas. Durante sus primeros mil millones de años, el universo continuó expandiéndose y enfriándose mientras la materia gravitaba hacia las concentraciones masivas que denominamos «galaxias». Sólo en el volumen del cosmos que podemos ver, se formaron cien mil millones de estas galaxias, cada una con cientos de miles de millones de estrellas que experimentan fusión termonuclear en su núcleo. Estas estrellas, con una masa más de diez veces superior a la del Sol, alcanzaron en su núcleo una presión y una temperatura suficientes para fabricar montones de elementos

más pesados que el hidrógeno, entre ellos los que componen los planetas y la vida en los mismos. Dichos elementos serían lamentablemente inútiles si hubiesen permanecido encerrados dentro de la estrella. Sin embargo, diversas estrellas de masa elevada estallaron y diseminaron por toda la galaxia la riqueza química de sus tripas.

Al cabo de siete u ocho mil millones de años de enriquecimiento químico, nació una estrella normal y corriente (el Sol) en una región normal y corriente (brazo de Orión) de una galaxia normal y corriente (la Vía Láctea) situada en una parte normal y corriente del universo (las afueras del super grupo de Virgo). La nube de gas de la que se formó el Sol contenía una provisión suficiente de elementos pesados para generar unos cuantos planetas, miles de asteroides y miles de millones de cometas. Durante la formación de este sistema estelar, la materia se condensó y se fue acumulando a partir de la nube progenitora de gas mientras daba vueltas alrededor del Sol. A lo largo de varios cientos de millones de años, los persistentes impactos de cometas y otros escombros a gran velocidad fundieron la superficie de los planetas rocosos, lo que impidió la formación de moléculas complejas. A medida que en el sistema solar iba quedando cada vez menos materia acumulable, la superficie de los planetas comenzó a enfriarse. El planeta que denominamos Tierra se formó en una órbita en la que su atmósfera permite la existencia de mares, sobre todo en forma líquida. Si la Tierra se hubiera formado mucho más cerca del Sol, los mares se habrían evaporado. Si se hubiera formado mucho

más lejos, los mares se habrían helado. En cualquier caso, la vida no habría evolucionado tal como la conocemos.

Mediante un mecanismo desconocido, en los mares líquidos químicamente fértiles emergieron bacterias anaerobias que, inadvertidamente, transformaron la atmósfera del planeta rica en dióxido de carbono en otra con suficiente oxígeno para permitir a los organismos aeróbicos formarse, evolucionar y dominar los mares y la tierra. Estos mismos átomos de oxígeno, normalmente presentes por parejas ( $O_2$ ), también se combinaron de tres en tres para formar en la atmósfera superior ozono ( $O_3$ ), que protege la superficie de la Tierra de la mayoría de los fotones ultravioleta del Sol hostiles a las moléculas.

La extraordinaria diversidad de la vida en la Tierra, y (cabe presumir) en otras partes del universo, surge de la abundancia cósmica de carbono y del infinito número de moléculas (simples y complejas) formadas a partir del mismo: existen más variedades de moléculas basadas en el carbono que de todas las demás moléculas juntas. Pero la vida es frágil. Los encontronazos de la Tierra con objetos grandes, restos de la formación del sistema solar, que en otro tiempo fueron episodios habituales, todavía causan estragos intermitentes en el ecosistema. Hace tan sólo sesenta y cinco millones de años (menos del 2% del pasado de la Tierra), un asteroide de 10 billones de toneladas cayó sobre lo que ahora es la península del Yucatán y destruyó más del 70% de la flora y la fauna del planeta —incluidos todos los dinosaurios, los animales terrestres entonces dominantes—. Esta tragedia ecológica ofreció a los pequeños mamíferos

supervivientes la oportunidad de ocupar nichos recién creados. Una rama inteligente de estos mamíferos, la de los denominados «primates», evolucionó y llevó a un género y una especie —el *Homo sapiens*— a un nivel de inteligencia que permitió a sus miembros crear herramientas y métodos científicos, inventar la astrofísica o deducir el origen y la evolución del universo.

Sí, el universo tuvo un comienzo. Sí, el universo continúa evolucionando. Y sí, se podría seguir el rastro de cada uno de los átomos de nuestro cuerpo hasta el Big Bang y los altos hornos termonucleares con estrellas de masa elevada. No sólo estamos en el universo, somos parte de él. Hemos nacido de él. Cabría incluso decir que el universo nos ha conferido poder, aquí en nuestro rinconcito del cosmos, para llegar a entenderlo. Y esto sólo acaba de empezar.

## **Parte I**

### **El origen del universo**

#### **Contenido:**

*Capítulo 1. Al principio*

*Capítulo 2. La antimateria importa*

*Capítulo 3. Hágase la luz*

*Capítulo 4. Hágase la oscuridad*

*Capítulo 5. Hágase más oscuridad*

*Capítulo 6. ¿Un universo o muchos?*

#### **Capítulo 1**

##### **Al principio**

Al principio, era la física. La física describe el modo en que se comportan y se relacionan entre sí la materia, la energía, el espacio y el tiempo. La interacción de estos personajes en nuestro drama cósmico subyace a todos los fenómenos biológicos y químicos. De ahí que todo lo fundamental y familiar para nosotros, los terrícolas, comience con las leyes de la física y se base en ellas. Si aplicamos estas leyes a escenarios astronómicos, estamos ante una física a gran escala que denominamos «astrofísica».

En casi cualquier ámbito de la investigación, pero sobre todo en la física, la frontera del descubrimiento se sitúa en los extremos de nuestra capacidad para medir sucesos y situaciones. En un extremo de la materia, algo parecido al vecindario de un agujero negro, la

gravedad comba con enorme fuerza el continuo espacio-tiempo circundante. En un extremo de la energía, la fusión termonuclear se mantiene en los núcleos de las estrellas a 15 millones de grados. Y en cualquier extremo imaginable hallamos las condiciones exageradamente calientes y densas que predominaron en los primeros instantes de vida del universo. Entender qué pasa en cada uno de estos escenarios requiere leyes físicas descubiertas después de 1900, durante lo que los físicos denominan actualmente la era moderna para diferenciarla de la era clásica, que incluye toda la física anterior.

Una característica importante de la física clásica es que los acontecimientos, las leyes y las predicciones adquieren de veras sentido cuando uno se para a pensar en ellos. Todo se descubrió y evaluó en laboratorios normales ubicados en edificios normales. Las leyes de la gravedad y el movimiento, de la electricidad y el magnetismo, de la naturaleza y la conducta de la energía calorífica, todavía se enseñan en las clases de física de los institutos. Esas revelaciones sobre el mundo natural alimentaron la revolución industrial, que transformó la cultura y la sociedad de maneras inimaginables para las generaciones anteriores, y siguen siendo esenciales para entender lo que pasa, y por qué, en el mundo de la experiencia cotidiana.

Por contra, en la física moderna nada tiene sentido porque todo sucede en sistemas situados muy lejos de aquellos a los que los sentidos humanos responden. Esto es bueno. Podemos afirmar, encantados, que nuestra vida cotidiana carece totalmente de física

extrema. En una mañana normal, nos levantamos de la cama, deambulamos por casa, comemos algo, salimos disparados por la puerta. Al final del día, nuestros seres queridos esperan vernos igual que cuando nos fuimos y que regresemos a casa sin novedad. Pero supongamos que llegamos a la oficina, entramos en una sala muy caldeada para asistir a una importante reunión a las 10 de la mañana y de repente perdemos todos los electrones —o aún peor, cada átomo del cuerpo va por su lado—. Mal asunto. Imaginemos ahora que estamos sentados en el despacho intentando trabajar un poco bajo una lámpara de mesa de 75 vatios y que alguien enciende unas luces del techo de 500 vatios y que nuestro cuerpo se pone a rebotar al azar de una pared a otra hasta quedar colgado de la ventana. O que después del trabajo asistimos a una pelea de sumo y vemos a dos caballeros casi esféricos que chocan, desaparecen y luego, espontáneamente, se convierten en sendos rayos de luz que abandonan la estancia en direcciones opuestas. O figurémonos que, camino de casa, tomamos un camino menos transitado y que un edificio oscuro nos aspira por los pies y nos estira el cuerpo de arriba abajo estrujándonos los hombros, desaparecemos por un agujero y nunca más se sabe nada de nosotros.

Si estas escenas se produjeran en la vida cotidiana, la física moderna nos parecería mucho menos extraña; nuestro conocimiento de las bases de la relatividad y la mecánica cuántica fluiría con naturalidad desde la experiencia diaria; y nuestros seres queridos seguramente no nos dejarían ir a trabajar. Sin embargo, en los primeros minutos del universo esa clase de cosas ocurrían todo el tiempo. Para

imaginario, y entenderlo, no tenemos más remedio que establecer una nueva forma de sentido común, una intuición modificada sobre cómo se comporta la materia, y sobre cómo las leyes físicas describen dicho comportamiento en los valores extremos de temperatura, densidad y presión.

Hemos de entrar en el mundo de  $E = mc^2$ .

Albert Einstein publicó por primera vez una versión de su famosa ecuación en 1905, año en que su influyente trabajo de investigación titulado «Zur Elektrodynamik bewegter Körper» apareció en *Annalen der Physik*, la ilustre revista alemana de física. En castellano, el título del artículo es «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», pero el trabajo es mucho más conocido como «teoría especial de la relatividad» de Einstein, la cual introdujo conceptos que cambiarían para siempre nuestras nociones del espacio y el tiempo. En 1905, con sólo veintiséis años, mientras trabajaba como examinador de patentes en Berna, Suiza, Einstein ofreció más detalles, incluida su ecuación más conocida, en otro trabajo, cortísimo (dos páginas y media), publicado meses después ese mismo año y en la misma revista: «*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*», o «¿*Depende la inercia de un cuerpo de su contenido en energía?*». Para ahorrar al lector el esfuerzo de localizar el artículo original, diseñar un experimento y verificar de este modo la teoría de Einstein, la respuesta a la pregunta es «sí». Tal como escribió Einstein,

*Si un cuerpo emite la energía radiante  $L$ , su masa disminuye en  $L/c^2$  [...]. La masa de un cuerpo es una medida de su contenido*



*en energía; si la energía cambia en una cantidad  $L$ , la masa cambia en la misma cantidad.*

No muy seguro de la validez de su afirmación, a continuación sugirió lo siguiente:

*No es imposible que un cuerpo cuyo contenido energético sea variable en un alto grado (por ejemplo, con sales de radio) la teoría pueda ser puesta a prueba con éxito.<sup>1</sup>*

Pues ahí está. Esa es la receta algebraica para todas las ocasiones en que queramos transformar la materia en energía, o la energía en materia.  $E = mc^2$  —energía igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado— nos ofrece una potente herramienta computacional que amplía nuestra capacidad para conocer y comprender el universo en su estado actual y remontarnos a fracciones infinitesimales de segundo tras el nacimiento del cosmos. Con esta ecuación, podemos saber cuánta energía radiante puede producir una estrella, o cuánto podríamos ganar convirtiendo las monedas del bolsillo en formas útiles de energía. La forma más conocida de energía —que brilla a nuestro alrededor, aunque nuestra imaginación no suele reconocerla ni identificarla— es el fotón, una partícula irreducible, sin masa, de luz visible o de cualquier otra forma de radiación electromagnética. Vivimos todos en un ininterrumpido baño de fotones: del Sol, la Luna o las estrellas; de la estufa, la araña o la lamparilla; de centenares de emisoras de radio y televisión; y de innumerables transmisiones por

---

<sup>1</sup> Albert Einstein, *Principios de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 2011.

móvil y radar. ¿Por qué no vemos, entonces, la transmutación diaria de energía en materia o de materia en energía? Cuando se convierte en energía mediante  $E = mc^2$ , la energía de los fotones comunes se sitúa muy por debajo de la masa de las partículas subatómicas de menor masa. Como estos fotones cuentan con demasiada poca energía para llegar a ser otra cosa, llevan una vida sencilla, prácticamente sin incidentes.

¿Echamos en falta un poco de acción con  $E = mc^2$ ? Empecemos frecuentando fotones de rayos gamma que tienen algo de energía real —al menos doscientas mil veces más que los fotones visibles—. Enseguida enfermaremos y moriremos de cáncer; pero antes de que pase esto, veremos formarse súbitamente pares de electrones, uno de materia y el otro de antimateria (sólo uno de los muchos dúos dinámicos partícula-antipartícula del universo), donde antaño deambulaban los fotones. Mientras miramos, vemos también chocar pares materia-antimateria de electrones, con lo que se destruyen mutuamente y crean de nuevo fotones de rayos gamma. Si incrementamos la energía de los fotones en otro factor de dos mil, tendremos rayos gamma con suficiente energía para transformar a personas susceptibles en Hulk. Algunos pares de estos fotones manejan suficiente energía, perfectamente descrita por la potencia de  $E = mc^2$ , para crear partículas como neutrones, protones y sus parejas de antimateria, cada una con una masa casi dos mil veces mayor que la del electrón. Los fotones de alta energía no andan sin más por cualquier parte, sino que existen en muchos crisoles cósmicos. Para

los rayos gamma, bastará casi cualquier entorno con una temperatura superior a unos cuantos miles de millones de grados.

La importancia cosmológica de las partículas y los paquetes de energía que se transforman unos en otros es pasmosa. En la actualidad, la temperatura del universo en expansión, calculada midiendo el baño de fotones de microondas que domina todo el espacio, es sólo de 2,73 grados Kelvin. (En la escala Kelvin, todas las temperaturas son positivas: las partículas tienen la menor energía posible a 0 grados; la temperatura ambiente es de unos 295 grados; y el agua hierve a 373 grados). Como pasa con los fotones de luz visible, los fotones de microondas son demasiado fríos para tener alguna esperanza realista de transformarse en partículas mediante  $E = mc^2$ . En otras palabras, ninguna partícula conocida posee una masa tan pequeña que se pueda obtener partiendo de la exigua energía de un fotón de microondas. Ocurre lo mismo con los fotones que forman ondas de radio, infrarrojos y luz visible, así como rayos X y ultravioleta. Dicho de manera más simple: todas las transmutaciones de partículas requieren rayos gamma. Ayer, sin embargo, el universo era un poco más pequeño y un poco más caliente que hoy. Anteayer era aún más caliente y pequeño. Si retrocedemos un poco más—pongamos, trece mil setecientos millones de años—, llegaremos a la sopa primordial posterior al Big Bang, momento en que la temperatura del cosmos era lo bastante elevada para ser interesante desde el punto de vista astrofísico mientras los rayos gamma llenaban el universo.

Entender el comportamiento del espacio, el tiempo, la materia y la energía desde el Big Bang hasta hoy es uno de los grandes triunfos del pensamiento humano. Si buscamos una explicación completa de los sucesos de los primeros momentos, cuando el universo era más pequeño y caliente de lo que lo ha sido después, hemos de hallar la manera de que las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza —la gravedad, el electromagnetismo, y las fuerzas nucleares débil y fuerte— hablen entre sí, se unifiquen y lleguen a ser una sola meta-fuerza. También deberemos encontrar el modo de reconciliar dos ramas de la física actualmente incompatibles: la mecánica cuántica (la ciencia de lo pequeño) y la relatividad general (la ciencia de lo grande).

\* \* \* \*

Espoleados por el feliz matrimonio de la mecánica cuántica y el electromagnetismo a mediados del siglo XX, los físicos se pusieron en marcha enseguida para combinar la mecánica cuántica y la relatividad general en una teoría única y coherente de la gravedad cuántica. Aunque hasta ahora han fracasado todos, ya sabemos dónde están los principales obstáculos: en la «era Planck», la fase cósmica de hasta  $10^{-43}$  segundos (una diez millonésima-billonésima-billonésima-billonésima de segundo) después del comienzo. Como la información no puede viajar a una velocidad superior a la de la luz,  $3 \times 10^8$  metros por segundo, un observador hipotético situado en cualquier lugar del universo durante la era Planck no podría ver más allá de  $3 \times 10^{-35}$  metros (tricentésima mil millonésima-billonésima-billonésima parte de un metro). El físico alemán Max Planck, que da

nombre a estos tiempos y distancias inconcebiblemente pequeños, propuso en 1900 la idea de «energía cuantificada»; se le considera el padre de la mecánica cuántica.

De todos modos, que nadie se preocupe de momento por la vida cotidiana. El choque entre la mecánica cuántica y la gravedad no plantea problemas prácticos en el universo contemporáneo. Los astrofísicos aplican los principios y las herramientas de la relatividad general y la mecánica cuántica a problemas completamente distintos. Pero al principio, durante la era Planck, lo grande era pequeño, por lo cual debió de haber alguna clase de boda de penalti entre las dos. Pero, ay, como las promesas intercambiadas durante la ceremonia siguen siéndonos esquivas, ninguna ley (conocida) de la física describe con suficiente solidez cómo se comportó el universo durante la breve luna de miel, antes de que su expansión obligara a lo muy grande y lo muy pequeño a separarse.

Al final de la era Planck, la gravedad se libró de las otras fuerzas de la naturaleza, todavía unificadas, y alcanzó una identidad independiente muy bien descrita por las teorías actuales. Cuando el universo envejeció y superó los  $10^{-35}$  segundos, continuó expandiéndose y enfriándose, y lo que quedaba de las antaño unificadas fuerzas se dividió entre la fuerza electrodébil y la fuerza nuclear fuerte. Más adelante, la fuerza electrodébil se escindió entre las fuerzas electromagnética y nuclear débil, lo que dejó al descubierto cuatro fuerzas familiares y diferenciadas: la fuerza débil que controla la desintegración radiactiva, la fuerza fuerte que une las partículas de cada núcleo atómico, la fuerza electromagnética que

mantiene juntos a los átomos en las moléculas, y la gravedad que sujeta la materia en grandes cantidades. Para cuando el universo hubo envejecido hasta superar la billonésima de segundo de vida, sus fuerzas transformadas, junto con otros episodios críticos, ya habían conferido al cosmos sus propiedades fundamentales, cada una digna de su propio libro.

Mientras transcurría el tiempo durante la primera billonésima de segundo, la interacción de la materia y la energía continuó sin cesar. Poco antes, durante, y después de que las fuerzas electrodébil y fuerte se hubieran dividido, el universo contenía un hervidero de quarks, leptones y sus hermanos de antimateria, amén de bosones, las partículas que permiten a las otras relacionarse entre sí. Por lo que sabemos actualmente, ninguna de estas familias de partículas puede dividirse en nada más pequeño o más básico. Aun siendo fundamentales, cada familia de partículas cuenta con varias especies. Los fotones, incluidos los que constituyen la luz visible, pertenecen a la familia de los bosones. Los leptones más familiares para los no físicos son los electrones y (quizá) los neutrinos; y los quarks más familiares son... bueno, no hay quarks familiares, pues en la vida corriente siempre encontramos a los quarks unidos en partículas como los protones y los neutrones. A cada especie de quark se le ha asignado un nombre abstracto que no tiene una verdadera finalidad filológica, filosófica ni pedagógica salvo la de distinguirlo de los demás: «arriba» y «abajo», «extraño» y «encantado», «superior» e «inferior».

A propósito, *bosón* recibe el nombre del físico indio Satyendranath Bose. La palabra *leptón* procede del griego *leptos*, que significa ‘ligero’ o ‘pequeño’. *Quark*, por su parte, tiene un origen literario y mucho más imaginativo. El físico norteamericano Murray Gell-Mann, que en 1964 propuso la existencia de los quarks, y que después pensó que la familia de los quarks sólo contaba con tres miembros, sacó el nombre de una escurridiza frase del *Finnegans Wake* de James Joyce: «¡Tres quarks para Muster Mark!». Los quarks pueden reivindicar una ventaja: todos sus nombres son sencillos; algo que los químicos, los biólogos y los geólogos parecen incapaces de lograr al bautizar sus cosas.

Los quarks son extravagantes. A diferencia de los protones, que tienen una carga eléctrica de +1, o los electrones, con una carga de -1, los quarks poseen cargas fraccionarias que se expresan en unidades de 1/3. Y a excepción de las condiciones más extremas, nunca cogeremos a un quark solo: siempre estará firmemente agarrado a uno o dos quarks más. De hecho, la fuerza que mantiene a dos de ellos (o más) juntos *aumenta* al intentar separarlos, como si los sujetara una especie de goma elástica subnuclear, que se rompe si los separamos lo suficiente. La energía almacenada en la goma estirada emplaza ahora a  $E = mc^2$  a crear una nuevo quark en cada extremo y nos deja de nuevo donde empezamos.

Durante la era quark-leptón en la primera billonésima de segundo del cosmos, el universo tenía una densidad suficiente para que la separación promedio entre quarks libres compitiera con la separación entre quarks pegados. En esas condiciones, como las lealtades entre

quarks adyacentes no podían establecerse de forma clara, se movían con libertad entre sí. La detección experimental de este estado de la materia, denominado como es lógico «sopa de quarks», fue dada a conocer en 2002 por un equipo de físicos de los Laboratorios Nacionales Brookhaven, en Long Island.

La combinación de observación y teoría sugiere que un episodio del universo más temprano, quizá durante una de las divisiones entre distintas clases de fuerza, dotó al cosmos de una extraordinaria asimetría, en la cual las partículas de materia superaban en número a las de antimateria sólo en una milmillonésima parte aproximadamente, una diferencia que nos permite existir en la actualidad. Esta minúscula discrepancia en cuanto a la población apenas habría sido percibida entre la continua creación, destrucción y nueva creación de quarks y anti quarks, electrones y antielectrones (más conocidos como positrones) o neutrinos y antineutrinos. En esa era, lo extravagante —el ligero predominio de la materia sobre la antimateria— tuvo muchas oportunidades de encontrar otras partículas con las que aniquilarse, lo mismo que les pasó a estas.

Pero no por mucho más tiempo. Mientras el universo seguía expandiéndose y enfriándose, su temperatura descendió deprisa por debajo de 1 billón de grados Kelvin. Había pasado una millonésima de segundo desde el principio, pero este universo tibio ya no tenía una temperatura ni una densidad suficientes para cocinar quarks. Todos los quarks buscaron enseguida parejas de baile, lo que creó una familia nueva y permanente de partículas pesadas denominadas «hadrones» (del griego *hadros*, que significa 'denso'). Esta transición



de quark a hadrón generó rápidamente protones y neutrones así como otras clases de partículas pesadas, menos conocidas, compuestas todas de diversas combinaciones de quarks. La ligera asimetría materia-antimateria de la sopa de quarks-leptones pasaba ahora a los hadrones, con unas consecuencias insólitas.

Mientras el universo se enfriaba, fue disminuyendo continuamente la cantidad de energía disponible para la creación espontánea de partículas. Durante la era de los hadrones, los fotones ya no podían recurrir a  $E = mc^2$  para fabricar pares quark-anti quark: su  $E$  no podía cubrir la  $mc^2$  de los pares. Además, los fotones surgidos de todas las destrucciones restantes seguían perdiendo energía en un universo en continua expansión, por lo que a la larga su energía cayó por debajo del umbral requerido para crear pares hadrón-antihadrón. Cada mil millones de aniquilaciones dejaba una estela de mil millones de fotones, y sólo sobrevivía un hadrón, testimonio mudo del diminuto exceso de la materia respecto a la antimateria en el universo temprano. Al final, estos hadrones solitarios se lo pasarían todo lo bien que puede pasárselo la materia: se convertirían en la fuente de las galaxias, las estrellas, los planetas y las personas.

Sin el desequilibrio de mil millones + 1 respecto a unos simples mil millones entre partículas de materia y antimateria, toda la masa del universo (salvo la materia oscura, cuya forma sigue siendo desconocida) habría quedado destruida antes de que hubiera transcurrido el primer segundo del universo, con lo que habríamos tenido un cosmos en el que habríamos visto (si hubiéramos existido) fotones y *nada más*; el escenario primordial de «hágase la luz».

A estas alturas, ha pasado un segundo de tiempo.

A mil millones de grados, el universo sigue siendo muy caliente, y aún es capaz de cocinar electrones, que, junto con sus homólogos positrones (antimateria), continúan apareciendo y desapareciendo. Sin embargo, el universo —que se expande y se enfría continuamente— tiene los días (en realidad, segundos) contados. Lo que antes fue cierto para los hadrones es cierto ahora para los electrones y los positrones: se destruyen unos a otros, y sólo surge un electrón entre mil millones, único superviviente del pacto suicida entre materia y antimateria. Los otros electrones y positrones han muerto para inundar el universo con un mar mayor de fotones.

Concluida la era de la aniquilación de electrones-positrones, el cosmos ha «congelado» en la existencia un electrón por cada protón. Mientras el cosmos sigue enfriándose —la temperatura ya ha bajado de los 100 millones de grados—, sus protones se fusionan con otros protones y con neutrones, formando núcleos atómicos e incubando un universo en el que el 90% de estos núcleos son de hidrógeno y el 10% de helio, junto con cifras relativamente minúsculas de núcleos de deuterio, tritio y litio.

Ya han pasado dos minutos desde el principio.

Durante otros trescientos ochenta mil años no le pasan demasiadas cosas a nuestra sopa de núcleos de hidrógeno y de helio, electrones y fotones. A lo largo de estos centenares de milenios, la temperatura cósmica permanece lo bastante caliente para que los electrones deambulen libres entre los fotones, golpeándolos de un lado a otro.

Como detallaremos en breve en el capítulo 3, esta libertad finaliza bruscamente cuando la temperatura del universo desciende por debajo de los 3000 grados Kelvin (aproximadamente la mitad que en la superficie del Sol). En ese momento, todos los electrones adquieren órbitas alrededor de los núcleos, con lo que se forman átomos. El matrimonio de los electrones con los núcleos deja a los recién constituidos átomos dentro de un omnipresente baño de fotones de luz visible, lo cual completa la historia de cómo aparecieron las partículas y los átomos en el universo primigenio.

Mientras el universo continúa expandiéndose, sus fotones siguen perdiendo energía. En la actualidad, dondequiera que miren los astrofísicos, observan una huella digital cósmica de fotones de microondas a una temperatura de 2,73 grados, lo que representa una disminución de mil veces en la energía de los fotones desde que comenzaron a formarse los átomos. Los patrones de los fotones en el cielo —la cantidad exacta de energía que llega desde distintas direcciones— conservan un recuerdo de la distribución cósmica de la materia justo antes de la formación de los átomos. Partiendo de estos patrones, los astrofísicos pueden obtener datos importantes, entre ellos la edad y la forma del universo. Aunque ahora los átomos son parte de la vida cotidiana, a la ecuación de Einstein todavía le queda mucho trabajo por hacer: en los aceleradores de partículas, donde se crean, como rutina, pares de partículas materia-antimateria partiendo de campos de energía; en el núcleo del Sol, donde 4,4 millones de toneladas de materia se convierten cada segundo en energía; y en los núcleos de todas las demás estrellas.

$E = mc^2$  también logra aplicarse cerca de los agujeros negros, justo más allá de sus horizontes de sucesos, donde los pares partícula-antipartícula pueden existir de pronto a costa de la formidable energía gravitatoria del agujero negro. En 1975, al describir los *high jinks*, el cosmólogo británico Stephen Hawking demostró que toda la masa de un agujero negro podía evaporarse lentamente mediante ese mecanismo. En otras palabras, los agujeros negros no son negros del todo. El fenómeno se conoce como «radiación de Hawking» y sirve como recordatorio de la ininterrumpida fecundidad de la ecuación más famosa de Einstein.

Pero ¿qué pasó *antes* de toda esa furia cósmica? ¿Qué pasó antes del principio? Los astrofísicos no tenemos ni idea. Mejor dicho, nuestras ideas más creativas tienen poca base, o ninguna, en la ciencia experimental. Sin embargo, una persona con fe religiosa tiende a afirmar, a menudo con un dejo de petulancia, que algo debió de iniciarlo todo: una fuerza superior a las demás, una fuente de la que surge el resto de cosas. Un activador fundamental. En la mente de una persona así ese algo es, lógicamente, Dios, cuya naturaleza varía de un creyente a otro, pero que siempre corre con la responsabilidad de poner la pelota a rodar.

Pero y ¿si el universo estuvo siempre ahí, en un estado o condición aún por identificar, un multiverso, por ejemplo, en el que todo lo que denominamos universo equivale tan sólo a una diminuta burbuja en un mar de espuma? Y ¿si el universo, como sus partículas, empezó a existir sin más, a partir de nada que podamos ver?

Por lo general, estas réplicas no satisfacen a nadie. En cualquier caso, nos recuerdan que la ignorancia bien informada propicia el estado natural de la mente para los investigadores en las siempre cambiantes fronteras del conocimiento. Las personas que creen que lo saben todo nunca han buscado ni se han encontrado con los lindes entre lo conocido y lo desconocido en el cosmos. Y ahí reside una dicotomía fascinante. «El universo siempre estuvo» no merece ningún respeto como respuesta legítima a la pregunta de qué había ahí antes del principio; sin embargo, para muchas personas religiosas, «Dios estuvo siempre» es la respuesta obvia y satisfactoria a qué había ahí antes de Dios.

Al margen de dónde se posicionen cada uno, participar en la búsqueda por descubrir dónde y cómo empezó todo puede provocar cierto fervor emocional; como si el hecho de conocer nuestros inicios nos otorgara cierta forma de fraternidad con lo que viene después, o acaso de gobernanza sobre ello. Así pues, lo que es válido para la vida misma es válido para el universo: saber de dónde venimos no es menos importante que saber adónde vamos.

## Capítulo 2

### La antimateria importa

Los físicos de las partículas han ganado la batalla por conseguir la jerga más peculiar, si bien divertida, de todas las ciencias físicas. ¿Dónde más podríamos encontrar un bosón vector neutro intercambiado entre un muón negativo y un neutrino muón? ¿O un intercambio de gluones que uniese un quark extraño y un quark encantado? ¿Y dónde, si no, podríamos encontrar squarks, fotinos y gravitinos? Junto a esas partículas al parecer incontables con nombres raros, los físicos de las partículas han de enfrentarse a un universo paralelo de antipartículas, conocidas en su conjunto como «antimateria». Pese a su continua presencia en los relatos de ciencia ficción, la antimateria es real. Y, como cabe suponer, tras el contacto con la materia corriente, tiende a destruirse.

El universo deja ver un curioso romance entre las antipartículas y las partículas. Pueden nacer juntas a partir de energía pura, y aniquilarse al reconvertir su masa combinada de nuevo en energía. En 1932, el físico norteamericano Carl David Anderson descubrió el antielectrón, el equivalente de antimateria, con carga positiva, del electrón, con carga negativa. Desde entonces, los físicos de partículas han fabricado rutinariamente antipartículas de toda clase en los aceleradores, pero hasta hace poco no han ensamblado antipartículas en átomos enteros. Desde 1996, un grupo internacional dirigido por Walter Oelert, del Instituto de Investigación en Física Nuclear de Jülich, Alemania, ha creado átomos de

antihidrógeno, en el que un antielectrón gira alegre alrededor de un antiprotón. Para obtener estos primeros antiátomos, los físicos se valieron del enorme acelerador de partículas operado por la Organización Europea para la Investigación Nuclear (mejor conocida por su acrónimo francés, CERN), ubicado en Ginebra, Suiza, donde se han producido numerosas e importantes contribuciones a la física de las partículas.

Los físicos utilizan un método de creación simple: cogen un grupo de antielectrones y otro de antiprotones, los juntan a una temperatura y una densidad adecuadas, y aguardan a que se combinen y formen átomos. Durante su primera tanda de experimentos, el equipo de Oelert generó nueve átomos de antihidrógeno. Sin embargo, en un mundo dominado por la materia corriente, la vida como átomo de antimateria es precaria. Los átomos de antihidrógeno sobrevivieron menos de 40 nanosegundos (40 milmillonésimas de segundo) antes de destruirse con átomos comunes.

El descubrimiento del antielectrón fue uno de los grandes triunfos de la física teórica, pues su existencia había sido pronosticada sólo unos años antes por el físico británico Paul A. M. Dirac.

Para describir la materia en las escalas de menor tamaño —las de las partículas atómicas y subatómicas—, en la década de 1920 los físicos crearon una nueva rama de la física para explicar los resultados de sus experimentos con esas partículas. Mediante reglas recién establecidas —conocidas en la actualidad como teoría cuántica—, partiendo de una segunda solución a su ecuación, Dirac postuló que un electrón fantasma del «otro lado» podía de vez en cuando aparecer

de repente en el mundo como un electrón corriente, dejando un vacío o agujero en el mar de energías negativas. Aunque Dirac esperaba explicar los protones así, otros físicos sugirieron que ese agujero se revelaría a sí mismo experimentalmente como un antielectrón con carga positiva, que ha acabado recibiendo el nombre de «positrón» debido a esa carga eléctrica. La detección de positrones reales confirmó la percepción básica de Dirac y determinó que la antimateria era digna de tanto respeto como la materia.

Las ecuaciones con soluciones dobles no son raras. Un ejemplo de lo más simple responde a la pregunta de qué número multiplicado por sí mismo da igual a nueve. ¿Es 3 o  $-3$ ? La respuesta es ambos, naturalmente, pues  $3 \times 3 = 9$  y  $-3 \times -3 = 9$ . Los físicos no pueden garantizar que todas las soluciones de una ecuación correspondan a sucesos del mundo real, pero si un modelo matemático de un fenómeno físico es correcto, manipular sus ecuaciones puede ser tan útil como manipular el universo entero (y algo más fácil). Como pasa con Dirac y la antimateria, estas medidas a menudo conducen a predicciones verificables. Si las predicciones resultan incorrectas, se descarta la teoría. No obstante, con independencia del resultado físico, un modelo matemático garantiza que las conclusiones que podamos extraer son a la vez lógicas e internamente coherentes.

Las partículas subatómicas poseen muchos rasgos mensurables, de los cuales la masa y la carga eléctrica se cuentan entre los más destacados. Excepto la masa, que es siempre la misma para la partícula y para su antipartícula, las propiedades específicas de cada tipo de antipartícula serán siempre exactamente opuestas a las de la



partícula a la que coloca el prefijo *anti*-. Por ejemplo, el positrón tiene la misma masa que el electrón, pero el positrón tiene una unidad de carga positiva mientras que la unidad de carga del electrón es negativa. Del mismo modo, el antiprotón es la antipartícula de carga opuesta del protón.

Aunque parezca mentira, el neutrón sin carga tiene también una antipartícula, que recibe el nombre —como cabía imaginar— de «antineutrón». Un antineutrón tiene una carga nula opuesta con respecto al neutrón corriente. Esta magia aritmética deriva del particular terceto de partículas con carga fraccionaria (los quarks) que constituyen los neutrones. Los tres quarks que componen un neutrón tienen cargas de  $-1/3$ ,  $-1/3$  y  $+2/3$ , mientras que las del antineutrón son  $1/3$ ,  $1/3$  y  $-2/3$ . Cada conjunto de tres cargas de quark suma una carga neta, cero, aunque los correspondientes componentes tengan cargas opuestas.

La antimateria puede empezar a existir de la nada. Si los fotones de rayos gamma tienen una energía lo bastante alta, pueden transformarse en pares electrón-positrón, con lo que convierten toda esa energía en una pequeña cantidad de materia, en un proceso que satisface la famosa ecuación de Einstein  $E = mc^2$ .

En el lenguaje de la interpretación original de Dirac, el fotón de rayos gamma expulsaba un electrón del ámbito de las energías negativas, lo que creaba un electrón corriente y un agujero de electrón. También puede darse el proceso inverso. Si una partícula y una antipartícula chocan, se destruirán rellenando el agujero y emitiendo rayos

gamma. Los rayos gamma son la clase de radiación que debemos evitar.

Si conseguimos de alguna manera fabricar en casa un pegote de antipartículas, estamos en una situación delicada. El almacenamiento se convierte al punto en un problema, pues las antipartículas se destruirán con cualquier bolsa convencional o de la compra (sea de papel o de plástico) en la que decidamos guardarlas o transportarlas. Un mecanismo de almacenamiento más ingenioso supone atrapar las antipartículas cargadas en los confines de un campo magnético fuerte, donde son repelidas por «paredes» magnéticas invisibles, aunque muy efectivas. Si incrustamos el campo magnético en un vacío, podemos hacer que las antipartículas estén a salvo de la destrucción con la materia normal. Este equivalente magnético de una botella será también la bolsa de elección cada vez que debamos manipular otros materiales hostiles a los recipientes, como los gases ardientes a 100 millones de grados implicados en experimentos (controlados) de fusión nuclear. El principal problema de almacenamiento se presenta después de que hayamos creado antiátomos enteros, pues estos, como los átomos, normalmente no rebotan en una pared magnética. Sería más atinado mantener los positrones y los antiprotones en botellas magnéticas separadas hasta poder juntarlos.

Generar antimateria requiere al menos tanta energía como podamos recuperar cuando aquella se destruye con materia para volver a ser energía. A menos que tuviéramos un tanque entero de combustible de antimateria antes del lanzamiento, un motor antimateria

autogenerador absorbería lentamente energía de la nave espacial. Quizá las películas y la serie de televisión de *Star Trek* plasmaron ese hecho, pero, si no me falla la memoria, el capitán Kirk pedía continuamente «más potencia» a la propulsión materia-antimateria, y Scotty le contestaba siempre «los motores no responden».

Aunque los físicos esperan que los átomos de hidrógeno y antihidrógeno se comporten igual, todavía no han verificado esta predicción de manera experimental, sobre todo debido a la dificultad que les supone mantener vivos los átomos de antihidrógeno, más que por el hecho de que se aniquilen de inmediato con protones y electrones. Les gustaría confirmar que la conducta detallada de un positrón ligado a un antiprotón en un átomo de antihidrógeno obedece a todas las leyes de la teoría cuántica, y que la gravedad de un antiátomo se comporta exactamente como cabe esperar en los átomos corrientes. ¿Puede un antiátomo producir antigravidad (repelente) en vez de gravedad normal (atractiva)? Toda la teoría apunta a lo segundo, pero si lo primero resultara correcto, ofrecería nuevas y asombrosas percepciones de la naturaleza. En las escalas atómicas, la fuerza de la gravedad entre dos partículas cualesquiera es inconmensurablemente pequeña. Son las fuerzas electromagnéticas y nucleares las que dominan la conducta de estas partículas minúsculas al ser ambas muy superiores a la gravedad. Para evaluar la antigravidad, necesitaríamos suficientes antiátomos para fabricar objetos de tamaño corriente y poder así medir sus propiedades generales y compararlas con la materia corriente. Si las bolas de billar (y, por supuesto, la mesa y los tacos) estuvieran hechas

de antimateria, ¿podríamos distinguir una partida de antipool de una partida de pool? ¿Caería una bola anti ocho en el agujero del rincón exactamente igual que una bola ocho normal? ¿Girarían los anti planetas alrededor de una anti estrella igual como giran los planetas normales alrededor de las estrellas normales?

Desde el punto de vista filosófico es sensato, y concuerda con todas las predicciones de la física moderna, suponer que las propiedades generales de la antimateria resultarán idénticas a las de la materia corriente —gravedad normal, choques normales, luz normal, etcétera—. Por desgracia, esto significa que si una antigalaxia se dirigiese hacia nosotros, a un choque con la Vía Láctea, sería indistinguible de una galaxia corriente hasta que fuera demasiado tarde para hacer nada al respecto. Sin embargo, este fatídico destino no puede ser común actualmente en el universo porque si, por ejemplo, una anti estrella individual se destruyese con una estrella corriente individual, la transformación de su materia y antimateria en energía de rayos gamma sería rápida, violenta y total. Si dos estrellas con una masa parecida a la del Sol (cada una con  $10^{57}$  partículas) fueran a chocar con nuestra galaxia, su fusión produciría un objeto tan luminoso que temporalmente produciría más energía que todas las estrellas de cien millones de galaxias y nos dejaría definitivamente fritos. No tenemos pruebas convincentes de que un episodio así haya llegado a ocurrir en algún lugar del universo. Así pues, por lo que sabemos, el universo está dominado por la materia corriente, y así ha sido desde los primeros minutos posteriores al Big Bang. Por tanto, la destrucción total mediante colisiones de materia

y antimateria no tiene por qué figurar entre nuestras principales preocupaciones relativas a la seguridad del próximo viaje intergaláctico.

Con todo, actualmente el universo parece inquietantemente desequilibrado. Esperamos que las partículas y las antipartículas existan en igual número, pero nos encontramos con un cosmos dominado por las partículas corrientes, que parecen la mar de felices sin sus antipartículas. ¿El desequilibrio se explica mediante ciertas bolsas ocultas de antimateria en el universo? Durante el universo temprano, ¿se violó alguna ley de la física (o regía alguna ley física desconocida), lo cual decantó para siempre el equilibrio a favor de la materia con respecto a la antimateria? Tal vez no conozcamos nunca las respuestas a estas preguntas, pero de momento, si en nuestro jardín aparece un alienígena que extiende un apéndice como gesto de saludo, mejor tirarle la bola ocho antes de hacernos demasiado amigos. Si el apéndice y la bola explotan, seguramente el extraterrestre constaba de antimateria. (No vamos a entretenernos aquí en cómo él y los suyos reaccionarán ante este resultado ni en lo que la explosión nos hará a nosotros). Y si no sucede nada adverso, podemos proceder tranquilamente a conducir al nuevo amigo ante el jefe.

### **Capítulo 3**

#### **Hágase la luz**

En la época en que la edad del universo era sólo de una fracción de segundo; la temperatura, de un billón de despiadados grados, y el resplandor, inconcebible, el punto principal de la agenda del universo era la expansión. A cada momento, el universo se hacía más grande a medida que se generaba más espacio (cuesta imaginarlo, pero aquí la evidencia es más elocuente que el sentido común). Al expandirse, se enfriaba y oscurecía. Durante centenares de milenios, la materia y la energía cohabitaron en una especie de sopa espesa en la que rápidos electrones dispersaban continuamente fotones de luz de un lado a otro.

En aquel tiempo, si nuestra misión hubiera sido ver a través del universo, no habríamos podido hacerlo. Cualquier fotón que nos entrase en el ojo nos habría hecho rebotar, sólo nanosegundos o picosegundos antes, electrones en pleno rostro. Habríamos visto sólo una niebla resplandeciente en todas direcciones, y el conjunto del entorno —luminoso, translúcido, de color blanco rojizo— habría sido casi tan brillante como la superficie del Sol.

A medida que se producía la expansión, iba disminuyendo la energía transportada por cada fotón. A la larga, más o menos cuando el joven universo cumplió trescientos ochenta mil años, la temperatura disminuyó por debajo de los 3.000 grados, con el resultado de que protones y núcleos de helio podían capturar electrones de manera permanente, con lo cual introducían átomos en el universo. En eras

anteriores, cada fotón había tenido energía suficiente para descomponer un átomo recién formado, pero ahora los fotones habían perdido esta capacidad gracias a la expansión cósmica. Con menos electrones libres para jorobarlo todo, los fotones podían por fin correr por el espacio sin chocar con nada. Fue entonces cuando el universo se volvió transparente, se disipó la niebla y se liberó una radiación cósmica de fondo de luz visible.

Esta radiación cósmica de fondo ha persistido hasta hoy; resto de luz de un universo temprano deslumbrante, abrasador. Se trata de un omnipresente baño de fotones que actúan como ondas y también como partículas. La longitud de onda de cada fotón equivale a la separación entre una de sus crestas de serpenteante ola y la siguiente —distancia que podemos medir con una regla si nos hacemos con un fotón—. En el vacío, todos los fotones se desplazan a la misma velocidad, 300.000 kilómetros por segundo (denominada, como es lógico, «velocidad de la luz»); de modo que los fotones con la longitud de onda más corta tienen más crestas que pasan cada segundo por un punto determinado. Así pues, los fotones de longitud de onda más corta se mueven más en un intervalo dado de tiempo, por lo que tienen una frecuencia mayor —más movimientos por segundo—. La frecuencia de cada fotón aporta una medida directa de su energía: cuanto mayor sea la frecuencia, más energía transporta.

Mientras el cosmos se enfriaba, los fotones perdían energía en el universo en expansión. Los fotones nacidos en las partes de rayos gamma y rayos X del espectro se transformaron en fotones ultravioleta, de luz visible e infrarrojos. A medida que aumentaba su

longitud de onda, se volvían más fríos y menos energéticos, pero sin dejar de ser nunca fotones. En la actualidad, trece mil setecientos millones de años después del comienzo, los fotones de la radiación cósmica de fondo se han desplazado hacia abajo en el espectro para volverse microondas. Por eso, los astrofísicos llaman a eso «radiación cósmica de microondas» (*cosmic microwave background*) o CMB (por sus siglas en inglés); aunque el nombre que más se ha mantenido es el de «radiación cósmica de fondo» (*cosmic background radiation*) o CBR (por sus siglas en inglés). Dentro de cien mil millones de años, cuando el universo se haya expandido y enfriado un poco más, los astrofísicos futuros describirán la CBR como «radiación cósmica de ondas de radio».

La temperatura del universo disminuye a medida que aumenta su tamaño. Es una cuestión física. Cuando distintas partes del universo se distancian, la longitud de onda de los fotones de la CBR debe crecer: el cosmos estira estas ondas en la tela elástica del espacio y el tiempo. Como la energía de cada fotón varía en proporción inversa a su longitud de onda, los fotones en movimiento libre perderán la mitad de su energía original cada vez que el cosmos duplique su tamaño.

Todos los objetos con temperatura por encima del cero absoluto irradiarán fotones en todas las partes del espectro. Pero esta radiación siempre alcanza un valor máximo en algún punto. El rendimiento energético máximo de una bombilla doméstica se sitúa en la parte infrarroja del espectro, que detectamos como calor en la piel. Las bombillas también emiten mucha luz visible, desde luego,



de lo contrario no las compraríamos. Así pues, no sólo vemos la lámpara, sino que notamos también su radiación.

El rendimiento máximo de la radiación cósmica de fondo se produce en una longitud de onda de aproximadamente un milímetro, justo en la parte de microondas del espectro. Las interferencias que oímos en un *walkie-talkie* proceden de un baño ambiental de microondas, un pequeño porcentaje de las cuales corresponden a la CBR. El resto del «ruido» viene del Sol, los móviles, las pistolas de radar de la policía, etcétera. Además de alcanzar su nivel máximo en la región de microondas, la CBR contiene también algunas ondas de radio (que le permiten contaminar las señales de radio con base terrestre) y un número pequeñísimo de fotones con una energía superior a la de las microondas.

George Gamow, físico norteamericano de origen ucraniano, y sus colegas predijeron la existencia de la CBR en la década de 1940, y consolidaron sus esfuerzos en un artículo de 1948 que aplicaba las leyes entonces conocidas de la física a las extrañas condiciones del universo temprano. Los cimientos de sus ideas procedían del trabajo de 1927 de Georges Edouard Lemaître, astrónomo y jesuita belga, actualmente considerado el «padre» de la cosmología del Big Bang. Sin embargo, dos físicos norteamericanos, Ralph Alpher y Robert Herman, que habían colaborado anteriormente con Gamow, fueron los primeros en calcular cuál debía ser la temperatura de la radiación cósmica de fondo.

En retrospectiva, Alpher, Gamow y Herman hacían lo que ahora parece un razonamiento relativamente simple —que nosotros ya

hemos hecho—: el tejido del espacio-tiempo era más pequeño ayer de lo que es hoy, y como era más pequeño, la física básica requiere que fuera más caliente. Así pues, los físicos atrasaron el reloj para imaginar la época que hemos descrito, el período en que el universo era tan caliente que todos sus núcleos atómicos estaban al descubierto porque las colisiones de los fotones desprendían y soltaban electrones, que acababan deambulando libres por el espacio. Alpher y Herman conjeturaron que, en tales circunstancias, los fotones no habrían podido correr sin interrupción por el universo como hacen hoy. El actual recorrido libre de los fotones requiere que el cosmos se enfriara lo suficiente para que los electrones se acomodaran en órbitas alrededor de los núcleos atómicos. Esto formó átomos completos y permitió a la luz viajar sin impedimentos.

Aunque Gamow tuvo la percepción clave de que el universo temprano debió de ser mucho más caliente que el actual, Alpher y Herman fueron los primeros en calcular cuál sería hoy la temperatura: 5 grados Kelvin. Sí, obtuvieron una cifra equivocada (en realidad, la CBR tiene una temperatura de 2,73 grados Kelvin). De todos modos, esos tres tipos llevaron a cabo una extrapolación satisfactoria hasta las profundidades de eras cósmicas desaparecidas hace tiempo —una de las proezas más fabulosas de la historia de la ciencia—. Coger un poco de física atómica básica de una mesa del laboratorio y deducir de ella el fenómeno en mayor escala jamás medido —la historia de temperaturas del universo— se puede considerar cuanto menos alucinante. Tras evaluar ese logro, J. Richard Gott III, astrofísico de

la Universidad de Princeton, en *Los viajes en el tiempo y el universo de Einstein* escribió lo siguiente:

*Predecir que existía la radiación y obtener luego su temperatura correcta con un margen de error del doble fue un logro extraordinario; algo así como predecir que un platillo volante de 15 metros de diámetro aterrizará en el jardín de la Casa Blanca y que luego aparezca realmente uno de 8 metros.*

Cuando Gamow, Alpher y Herman hicieron sus predicciones, los físicos aún no estaban seguros de cómo había empezado el universo. En 1948, el mismo año en que se conoció el trabajo de Alpher y Herman, apareció una teoría rival «de la creación continua» del universo en dos artículos publicados en Inglaterra, uno escrito conjuntamente por el matemático Hermann Bondi y el astrofísico Thomas Gold, y el otro por el cosmólogo Fred Hoyle. La teoría de la creación continua requiere que el universo, aunque en expansión, haya tenido siempre el mismo aspecto, hipótesis de una simplicidad sumamente atractiva. Sin embargo, como está expandiéndose, y como un universo en creación continua no habría sido más caliente ni más denso ayer que hoy, el escenario Bondi-Gold-Hoyle sostenía que se forma continuamente materia justo al ritmo adecuado para mantener una densidad promedio constante en el cosmos en expansión. En contraste, la teoría del Big Bang (bautizada así con desdén por Fred Hoyle) requiere que toda la materia empiece a existir en un instante, lo que para algunos es más satisfactorio desde el punto de vista emocional. Obsérvese que la teoría de la creación

continua coge el problema del origen del universo y lo lanza hacia atrás a una distancia infinita en el tiempo, lo cual resulta muy conveniente para quienes preferirían no examinar este peliagudo problema.

La predicción de la radiación cósmica de fondo suponía una seria advertencia a los teóricos de la creación continua. La existencia de la CBR demostraría con claridad que el universo había sido antaño muy diferente —mucho más caliente y pequeño— de como es en la actualidad. Por tanto, las primeras observaciones directas de la CBR pusieron los primeros clavos en el ataúd de la teoría de la creación continua (aunque Fred Hoyle jamás aceptó del todo que la CBR refutase su elegante teoría, llegando al extremo de intentar demostrar que la radiación se debía a otras causas). La CBR fue descubierta en 1964, de forma inadvertida y casual, por Arno Penzias y Robert Wilson en los Laboratorios Bell Telephone (Bell Labs, para abreviar) de Murray Hill, Nueva Jersey. Poco más de una década después, Wilson y Penzias recibieron el Premio Nobel por su duro trabajo y su buena suerte.

¿Qué fue lo que condujo a Penzias y Wilson hasta su Premio Nobel? A principios de la década de 1960, todos los físicos sabían sobre las microondas, pero casi nadie había creado la capacidad de detectar señales débiles en la porción de microondas del espectro. Por entonces, la mayor parte de la comunicación sin hilos (por ejemplo, receptores, detectores y transmisores) dependía de las ondas de radio, que tienen una longitud de onda mayor que las microondas. Para estas, los científicos necesitaban un detector de longitudes de

onda más cortas y una antena sensible para captarlas. Bell Labs tenía una, una antena descomunal con forma de cuerno capaz de detectar microondas con tanta eficacia como cualquier aparato de la Tierra.

Si vamos a enviar o recibir una señal de algún tipo, no queremos que otras señales la contaminen. Como Penzias y Wilson intentaban abrir un nuevo canal de comunicación para Bell Labs, querían precisar cuánta interferencia contaminadora «de fondo» experimentarían esas señales —del Sol, del centro de la galaxia, de fuentes terrestres, de donde fuera—. Por tanto, emprendieron una medición estándar, importante y totalmente inocente, a fin de establecer la facilidad con que podían detectar señales de microondas. Aunque Penzias y Wilson tenían cierta formación en astronomía, no eran cosmólogos, sino tecno-físicos que estudiaban microondas, ajenos a las predicciones de Gamow, Alpher y Herman. Lo que decididamente *no* estaban buscando era la radiación cósmica de microondas.

Así pues, llevaron a cabo el experimento y corrigieron sus datos para todas las fuentes de interferencia conocidas. Sin embargo, en la señal observaron ruido de fondo que no desaparecía y no sabían cómo eliminarlo. El ruido parecía venir de todas las direcciones por encima del horizonte y no cambiaba con el tiempo. Finalmente, miraron dentro del cuerno gigante. Había un nido de palomas, que dejaban por todas partes una sustancia blanca dieléctrica (caca de paloma). Aquello debió de ser desesperante para Penzias y Wilson. ¿Podían los excrementos —se preguntaban— ser los responsables del ruido de fondo? Lo limpiaron todo y, como era de esperar, el ruido disminuyó un poco. Pero seguía sin desaparecer. El artículo que publicaron en

1965 en *The Astrophysical Journal* hace referencia al persistente enigma de una inexplicable «temperatura excesiva de la antena» más que al descubrimiento astronómico del siglo.

Mientras Penzias y Wilson restregaban cagadas de pájaro de su antena, un equipo de físicos de la Universidad de Princeton dirigido por Robert H. Dicke estaba construyendo un detector diseñado expresamente para observar la CBR pronosticada por Gamow, Alpher y Herman. No obstante, como los profesores carecían de los recursos de Bell Labs, su trabajo marchó más despacio. En cuanto Dicke y sus colegas se enteraron de los resultados de Penzias y Wilson, supieron que se les habían adelantado. El grupo de Princeton sabía exactamente qué era «la temperatura excesiva de la antena». Todo cuadraba con la teoría: la temperatura, el hecho de que la señal procedía de todas direcciones en cantidades iguales, y que eso no estaba relacionado, en el tiempo, con la rotación de la Tierra ni con su posición en la órbita alrededor del Sol.

\* \* \* \*

Pero ¿por qué iba a aceptar nadie esa interpretación? Por buenas razones. Como los fotones tardan tiempo en llegar a nosotros desde zonas lejanas del cosmos, cada vez que miramos el espacio miramos inevitablemente hacia atrás en el tiempo. Esto significa que si los habitantes inteligentes de una galaxia muy alejada midieron por sí mismos la temperatura de la radiación cósmica de fondo, mucho antes de que consiguiéramos hacerlo nosotros, seguramente descubrieron que esa temperatura era superior a 2,73 grados Kelvin

porque ellos habrían habitado el universo cuando este era más joven, más pequeño y más caliente de lo que es en la actualidad.

¿Es posible verificar una afirmación tan atrevida? Pues sí. Ocurre que el compuesto de carbono y nitrógeno denominado «cianógeno» —muy conocido entre los condenados a la pena capital por ser el ingrediente activo del gas administrado por sus verdugos— se excita con la exposición a las microondas. Si las microondas son más calientes que las de la CBR, excitarán la molécula con algo más de eficacia que nuestras microondas. Por tanto, los compuestos de cianógeno actúan como un termómetro cósmico. Cuando los observamos en galaxias lejanas, y por tanto más jóvenes, los vemos bañados en un fondo cósmico más caliente que el cianógeno de nuestra galaxia de la Vía Láctea. En otras palabras, esas galaxias deberían vivir vidas más agitadas que nosotros. Y así es. El espectro del cianógeno en las galaxias lejanas pone de manifiesto que las microondas tienen justo la temperatura que cabe esperar en esas épocas cósmicas más tempranas.

Flipante. No se puede inventar algo así.

Para los astrofísicos, la CBR supone mucho más que una fuente de pruebas directas de un universo temprano caliente y, en consecuencia, del modelo del Big Bang. Resulta que los detalles de los fotones que componen la CBR llegan a nosotros cargados de información sobre el cosmos tanto antes como después de que el universo se volviera transparente. Hemos señalado que, hasta ese momento, unos trescientos ochenta mil años después del Big Bang, el universo era opaco, por lo que no habríamos podido presenciar

materia fabricando formas aunque hubiéramos estado sentados en primera fila. No habríamos visto dónde comenzaron a formarse los cúmulos de galaxias. Antes de que nadie, en alguna parte, pudiera ver algo que mereciese la pena ser visto, los fotones tuvieron que adquirir la capacidad de desplazarse, libres de obstáculos, por todo el universo. A su debido tiempo, cada fotón inició su viaje a través del cosmos en el punto en el que chocó contra el último electrón que se interpuso en su camino. A medida que iban escapando cada vez más fotones sin ser desviados por electrones (gracias a que estos se unían a núcleos para constituir átomos), fueron creando una cáscara de fotones en expansión que los astrofísicos denominan «la superficie de la última dispersión». Esta cáscara, que se formó durante un período de unos cien mil años, marca la época en que nacieron casi todos los átomos del cosmos.

Por entonces, ya había comenzado a fusionarse la materia de grandes regiones del universo. Cuando se acumula la materia, aumenta la gravedad, con lo cual se junta cada vez más materia. Estas regiones abundantes en materia sembraron la formación de supercúmulos de galaxias mientras que otras quedaron relativamente vacías. Los últimos fotones dispersados por electrones en las regiones de fusión desarrollaron un espectro diferente, algo más frío, mientras se salían del campo gravitatorio cada vez más fuerte, que les robaba un poco de energía.

De hecho, la CBR muestra puntos que son ligeramente más calientes o más fríos que la media, por lo general en torno a una cienmilésima de grado. Estos puntos fríos y calientes señalan las estructuras más



tempranas del cosmos, las primeras agrupaciones de materia. Conocemos el aspecto de la materia hoy porque vemos galaxias, cúmulos de galaxias y supercúmulos de galaxias. Para averiguar cómo surgieron esos sistemas, investigamos la radiación cósmica de fondo, un extraordinario vestigio del pasado remoto que todavía llena el universo entero. Estudiar los patrones en la CBR equivale a una especie de frenología cósmica: podemos interpretar los bultos en el «cráneo» del universo joven y de ellos deducir la conducta no sólo de un bebé, sino también de un adulto.

Mediante otras observaciones de los universos local y lejano, a partir de la CBR los astrónomos son capaces de determinar toda suerte de propiedades cósmicas fundamentales. Si, por ejemplo, comparamos la distribución de tamaños y temperaturas de las áreas ligeramente más calientes y frías, podemos inferir la fuerza de la gravedad en el universo temprano y, en consecuencia, el ritmo al que se acumuló la materia. De ahí podemos deducir cuánta materia corriente, materia oscura y energía oscura contiene el universo (los porcentajes son 4, 23 y 73, respectivamente). Partiendo de esto, es fácil saber si el universo se expandirá eternamente y si la expansión aminorará la marcha o acelerará a medida que pase el tiempo.

La materia corriente es de la que está formado todo. Ejerce gravedad y puede absorber, emitir y, por lo demás, interactuar con la luz. Como veremos en el capítulo 4, la materia oscura es una sustancia de naturaleza desconocida que produce gravedad, pero no interactúa con la luz de ninguna manera conocida. Y la energía oscura, como explicaremos en el capítulo 5, provoca una aceleración de la

expansión cósmica, lo que obliga al universo a expandirse más deprisa de lo que lo haría en caso contrario. Ahora el examen frenológico dice que los cosmólogos entienden cómo se comportó el universo temprano, pero también que la mayor parte del universo, entonces y ahora, consta de cosas de las que no tenemos ni idea. Pese a la existencia de profundas áreas de ignorancia, en la actualidad la cosmología tiene una base como nunca la había tenido antes. La CBR lleva la huella de un portal por el que en otro tiempo pasamos todos.

\* \* \* \*

El descubrimiento de la radiación cósmica de microondas añadió una precisión nueva a la cosmología al verificar la conclusión, originariamente derivada de observaciones de galaxias lejanas, de que el universo lleva miles de millones de años expandiéndose. Fue el preciso y detallado mapa de la CBR —mapa elaborado primero para pequeños trozos de cielo mediante instrumentos transportados en globo y un telescopio en el polo sur, y luego para el cielo entero mediante un satélite denominado sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)— el que garantizó a la cosmología un sitio en la mesa de la ciencia experimental. Oiremos hablar mucho más acerca de la WMAP, cuyos primeros resultados aparecieron en 2003, antes de acabar nuestro relato cosmológico.

Los cosmólogos tienen un ego enorme. ¿Cómo, si no, habrían tenido la audacia de deducir lo que creó el universo? Pero la nueva era de la cosmología observacional quizás exija una postura más modesta, y menos temeraria, entre sus practicantes. Cada nueva observación, cada dato, puede ser bueno o malo para nuestras teorías. Por una

parte, las observaciones proporcionan un fundamento esencial para la cosmología, un fundamento que muchas otras ciencias dan por sentado porque pueden realizar muchas en el laboratorio. Por otra parte, casi seguro que los datos nuevos zanján algunos de los embustes ideados por los teóricos cuando carecían de las observaciones que supondrían la aprobación o el rechazo.

Ninguna ciencia alcanza la madurez sin datos precisos. La cosmología ha llegado a ser una ciencia de precisión.

## Capítulo 4

### Hágase la obscuridad

La gravedad, la más familiar de las fuerzas de la naturaleza, nos ofrece al mismo tiempo los mejores fenómenos naturales y los menos conocidos. Le tocó a la mente de Isaac Newton, la más brillante e influyente del milenio, darse cuenta de que la misteriosa «acción a distancia» de la gravedad surge de los efectos naturales de cada trocito de materia, y que las fuerzas de atracción entre dos objetos cualesquiera pueden describirse mediante una sencilla ecuación algebraica. Le tocó a la mente de Albert Einstein —la más brillante e influyente del siglo XX— demostrar que podemos describir con más precisión la acción a distancia de la gravedad como un pandeo en el tejido del espacio-tiempo, producido por cualquier combinación de materia y energía. Einstein demostró que la teoría de Newton requería algunas modificaciones para describir la gravedad con exactitud — para predecir, por ejemplo, la cantidad de rayos de luz que se curvarán al pasar por un objeto sólido—. Aunque las ecuaciones de Einstein son más elaboradas que las de Newton, aquellas dan perfecta cabida a la materia que hemos llegado a conocer y amar. La materia que podemos ver, tocar, sentir y de vez en cuando saborear. No sé quién es el siguiente en la secuencia de genios, pero llevamos más de medio siglo esperando a alguien que nos cuente por qué el grueso de las fuerzas gravitatorias que hemos medido en el universo surge de sustancias que nunca hemos visto, tocado, sentido ni saboreado. Quizá sea que el exceso de gravedad no procede de la

materia en absoluto, sino que emana de alguna otra cosa conceptual. En cualquier caso, no tenemos pistas. Actualmente no estamos más cerca de una respuesta que cuando ese problema de la «masa perdida» fue identificado en 1933 por astrónomos que calculaban las velocidades de las galaxias cuya gravedad afecta a sus vecinos próximos, ni que cuando fue analizado en detalle en 1937 por el pintoresco astrofísico búlgaro-suizo-norteamericano Fritz Zwicky, que durante más de cuarenta años dio clases en el Instituto de Tecnología de California, combinando sus trascendentales percepciones del cosmos con originales medios de expresión y una admirable capacidad para suscitar el antagonismo de sus colegas.

Zwicky estudió el movimiento de las galaxias en un cúmulo colosal situado mucho más allá de las estrellas locales de la Vía Láctea que perfilan la constelación de Coma Berenices («cabellera de Berenice», reina egipcia de la Antigüedad). El cúmulo de Coma, como lo llaman los expertos, es un conjunto aislado y muy poblado de galaxias situado a unos trescientos millones de años luz de la Tierra. Sus muchos miles de galaxias describen órbitas alrededor del centro del cúmulo, moviéndose en todas direcciones como abejas en torno a su colmena. Mediante los movimientos de unas cuantas docenas de galaxias como trazadores del campo gravitatorio que une el cúmulo entero, Zwicky descubrió que su velocidad promedio era elevadísima. Como las fuerzas gravitatorias mayores provocan velocidades superiores en los objetos que atraen, Zwicky dedujo una masa enorme para el cúmulo de Coma. Si sumamos todas las masas estimadas de sus galaxias, Coma se cuenta entre los cúmulos

mayores y más masivos del universo. Aun así, no contiene suficiente materia visible que explique las velocidades observadas en sus galaxias integrantes. Parece que la materia se ha perdido.

Si aplicamos la ley de la gravedad de Newton y presuponemos que el cúmulo no existe en un estado extraño de expansión ni de colapso, podemos calcular cuál debería ser la velocidad media característica de sus galaxias. Lo único que necesitamos es el tamaño del cúmulo y una estimación de su masa total: la masa, actuando a lo largo de distancias caracterizadas por el tamaño del cúmulo, determina la rapidez con que las galaxias deben de moverse para no caer en el centro del cúmulo ni escapar del mismo totalmente.

En un cálculo similar, como demostró Newton, podemos obtener la velocidad a la que cada planeta —según su distancia concreta del Sol— debe moverse en su órbita. Lejos de ser mágicas, estas velocidades satisfacen la circunstancia gravitatoria en la que se encuentra cada planeta. Si el Sol adquiere más masa de repente, la Tierra y todo cuanto constituye el sistema solar necesitarían velocidades superiores para permanecer en sus órbitas actuales. Con demasiada velocidad, sin embargo, la gravedad del Sol será insuficiente para mantener la órbita de todos. Si la velocidad orbital de la Tierra fuera mayor que la raíz cuadrada del doble de su velocidad actual, nuestro planeta alcanzaría una «velocidad de escape» y, como cabe suponer, escaparía del sistema solar. Podemos aplicar el mismo razonamiento a objetos mucho más grandes, como nuestra galaxia de la Vía Láctea, en la que las estrellas describen órbitas que responden a la gravedad de todas las demás estrellas, o

a cúmulos de galaxias, donde cada una de estas notas asimismo la gravedad de todas las demás galaxias. Como escribió una vez Einstein (en el alemán original suena más contundente) en honor de Isaac Newton:

*Mira las estrellas, y aprende de ellas.  
Todos debemos honrar al Maestro,  
cada cual por su camino, sin un sonido,  
siguiendo por siempre las huellas de Newton.*

Cuando examinamos el cúmulo de Coma, como hiciera Zwicky en la década de 1930, observamos que todas las galaxias que lo integran se mueven a una velocidad superior a la de escape del cúmulo, pero sólo si establecemos esa velocidad partiendo de la suma de todas las masas de las galaxias una a una, que estimamos a partir de su luminosidad. Por tanto, el cúmulo debería romperse enseguida, dejando apenas un rastro de su existencia de colmena tras haber transcurrido sólo unos cuantos cientos de millones de años, quizá mil millones. No obstante, el cúmulo tiene más de diez mil millones de años de vida, casi tantos como el propio universo. Y así nació lo que sigue siendo el misterio más antiguo de la astronomía.

A lo largo de las décadas que siguieron al trabajo de Zwicky, en otros cúmulos de galaxias surgió el mismo problema. De modo que no podía echársele la culpa a Coma. ¿A quién le echamos la culpa, entonces? ¿A Newton? No, sus teorías llevaban más de doscientos cincuenta años siendo examinados y habían superado todas las pruebas. ¿A Einstein? No. La extraordinaria gravedad de los cúmulos

de galaxias no aumenta lo suficiente para requerir el martillo de la teoría de la relatividad general, con sólo dos décadas de vida cuando Zwicky llevó a cabo sus investigaciones. Quizá la «masa perdida» necesaria para unir las galaxias del cúmulo de Coma existe efectivamente, pero en alguna forma invisible, desconocida. Durante cierto tiempo, los astrónomos dieron al problema de la masa perdida el nombre de «problema de la luz perdida», pues la masa había sido deducida claramente del exceso de gravedad. En la actualidad, con mejores mediciones de las masas de los cúmulos de galaxias, los astrónomos utilizan la expresión «materia oscura», aunque «gravedad oscura» sería un término más preciso.

El problema de la materia oscura asomó su invisible cabeza por segunda vez. En 1976, Vera Rubin, astrofísica de la Institución Carnegie de Washington, descubrió una similar anomalía de «masa perdida» en las propias galaxias en espiral. Mientras estudiaba las velocidades a las que las estrellas giran alrededor de sus centros galácticos, Rubin observó lo que se había imaginado: dentro del disco visible de cada galaxia, las estrellas más alejadas del centro se mueven a velocidades superiores a las de las más cercanas. Las estrellas más lejanas tienen más materia (estrellas y gas) entre ellas y el centro de la galaxia, lo que exige una velocidad superior para mantener la órbita. Más allá del disco luminoso de la galaxia, sin embargo, aún encontramos algunas nubes de gas aisladas y unas cuantas estrellas brillantes. Utilizando estos objetos como trazadores del campo gravitatorio «exterior» a la galaxia, donde la materia visible ya no se suma al total, Rubin descubrió que sus velocidades orbitales,



que habrían debido de bajar con el aumento de la distancia allá donde Cristo perdió los clavos, de hecho seguían siendo altas.

Estos volúmenes de espacio en gran parte vacíos —las zonas rurales de cada galaxia— contienen demasiada poca materia visible para explicar las velocidades orbitales de los trazadores. Rubin pensó acertadamente que debía de haber cierta forma de materia oscura en esas regiones singulares, situadas mucho más allá del borde visible de cada galaxia en espiral. En realidad, la materia oscura forma una especie de halo alrededor de toda la galaxia.

Este problema del halo existe ante nuestras propias narices, en la galaxia de la Vía Láctea. De una galaxia a otra y de un cúmulo a otro, la discrepancia entre la masa de los objetos visibles y la masa total del sistema oscila entre un factor de dos o tres y factores de muchos cientos. En el conjunto del universo, el factor promedio gira en torno a seis. Es decir, la materia oscura cósmica tiene una masa unas seis veces superior a la de toda la materia visible.

Durante los últimos veinticinco años, nuevos estudios han puesto de manifiesto que la mayor parte de la materia oscura no puede consistir en materia corriente no luminosa. Esta conclusión se basa en dos razonamientos. Primero, podemos eliminar casi con certeza todos los candidatos conocidos verosímiles, como los sospechosos en una rueda policial de reconocimiento. ¿Podría la materia oscura residir en agujeros negros? No, creemos que habríamos detectado estos numerosos agujeros partiendo de sus efectos gravitatorios en estrellas cercanas. Y ¿en nubes oscuras? No, estas absorberían o, si no, interactuarían con luz de estrellas de detrás, cosa que no hace la

materia oscura verdadera. Y ¿en planetas interestelares (o intergalácticos), asteroides y cometas, que no producen luz propia? Cuesta creer que el universo fabrique seis veces más de masa en los planetas que en las estrellas. Ello supondría la existencia de seis mil planetas Júpiter por cada estrella de la galaxia o, aún peor, dos millones de Tierras. En nuestro sistema solar, por ejemplo, todo lo que no es el Sol equivale a un mísero 0,2% de la masa solar.

Así pues, por lo que podemos saber, la materia oscura no consiste simplemente en materia que resulta ser oscura, sino que es algo totalmente distinto. La materia oscura ejerce gravedad conforme a las mismas reglas de la materia corriente, pero apenas hace nada que nos permita detectarla. Al no saber lo que es, en este análisis estamos atados de pies y manos, desde luego. Las dificultades para detectar materia oscura, íntimamente conectada con las dificultades para percibir lo que podría ser, plantean la siguiente cuestión: si toda la materia tiene masa, y toda la masa tiene gravedad, ¿toda la gravedad tiene materia? No lo sabemos. El término «materia oscura» presupone la existencia de un tipo de materia que tiene gravedad y que todavía no comprendemos. Aunque quizá lo que no comprendemos es la gravedad. Para estudiar la materia oscura, más allá de deducir su existencia, los astrofísicos se proponen actualmente averiguar dónde se acumula en el espacio. Si existiese sólo en los bordes exteriores de los cúmulos de galaxias, por ejemplo, las velocidades de las galaxias no evidenciarían problema alguno con dicha materia, pues las velocidades y las trayectorias de aquellas responden solamente a fuentes de gravedad interior de sus órbitas. Si la materia oscura

ocupara sólo los centros de los cúmulos, la serie de velocidades medidas desde el centro del cúmulo hasta el borde respondería sólo a materia corriente. Sin embargo, las velocidades de las galaxias en los cúmulos revelan que la materia oscura impregna todo el volumen ocupado por las galaxias en órbita. De hecho, las ubicaciones de la materia corriente y la oscura coinciden aproximadamente. Hace unos años, un equipo dirigido por el astrofísico norteamericano J. Anthony Tyson, a la sazón en Bell Labs y ahora en UC Davis (uno de nosotros lo llama «el primo Tony», aunque no hay ninguna relación familiar), elaboró el primer mapa detallado de la distribución de la gravedad de la materia oscura dentro de un cúmulo colosal de galaxias y alrededor del mismo. Dondequiera que veamos galaxias grandes, observamos asimismo una mayor concentración de materia oscura dentro del cúmulo. También se cumple lo contrario: dicha materia escasea en regiones sin galaxias visibles.

\* \* \* \*

Esta discrepancia entre materia oscura y corriente varía bastante de un entorno astrofísico a otro, pero donde llega a ser más acusada es en las entidades grandes, como las galaxias y los cúmulos galácticos. En los objetos más pequeños, como las lunas y los planetas, no se advierte discrepancia. Por ejemplo, la gravedad en la superficie de la Tierra se puede explicar totalmente mediante lo que tenemos bajo los pies. Así, si uno pesa más de la cuenta en la Tierra, que no eche la culpa a la materia oscura, que tampoco guarda ninguna relación con la órbita de la Luna alrededor de la Tierra ni con el movimiento de los planetas alrededor del Sol. No obstante, sí la necesitamos para

explicar los movimientos de las estrellas alrededor del centro de la galaxia.

En la escala galáctica, ¿funciona un tipo distinto de física gravitatoria? Seguramente no. Lo más probable es que la materia oscura consista en materia cuya naturaleza todavía no hemos descubierto, y que se acumula de manera más difusa que la materia corriente. De lo contrario, observaríamos que uno de cada seis trozos de materia oscura lleva pegado un trozo de materia corriente. Por lo que sabemos, las cosas no son así.

Aun a riesgo de resultar deprimente, a veces los astrofísicos sostienen que toda la materia que hemos llegado a conocer y amar en el universo —los componentes de las estrellas, los planetas y la vida— consiste en simples boyas que flotan en un inmenso mar cósmico de algo que no parece nada.

Pero y ¿si esta conclusión fuera totalmente errónea? Cuando da la impresión de que nada funciona, cabe entender que algunos científicos, con sobradas razones, pongan en entredicho las leyes fundamentales de la física que subyacen a las suposiciones hechas por quienes pretenden comprender el universo.

A principios de la década de 1980, el físico israelí Mordehai Milgrom, del Instituto Weizmann de Ciencia de Rehovot, Israel, propuso un cambio en las leyes de la gravedad de Newton, teoría actualmente conocida como «dinámica newtoniana modificada» (MOND, por sus siglas en inglés). Aceptando el hecho de que la dinámica newtoniana estándar funciona satisfactoriamente en escalas inferiores a las de las galaxias, Milgrom sugería que Newton necesitaba algo de ayuda

para describir los efectos de la gravedad a distancias de la magnitud de las galaxias y los cúmulos de galaxias, donde las estrellas individuales y las agrupaciones de estrellas están tan separadas que ejercen unas sobre otras una fuerza gravitatoria relativamente pequeña. Milgrom añadió otro término a la ecuación de Newton, expresamente ideado para cobrar vida a distancias astronómicas. Aunque inventó la MOND como herramienta computacional, no descartó la posibilidad de que su teoría pudiera remitir a un nuevo fenómeno de la naturaleza.

La MOND ha tenido un éxito limitado. La teoría puede dar cuenta del movimiento de objetos aislados en los tramos exteriores de muchas galaxias en espiral, pero plantea más preguntas que respuestas. La MOND no consigue predecir de manera fiable la dinámica de configuraciones más complejas, como el movimiento de galaxias en sistemas binarios y múltiples. Además, el detallado mapa de la radiación cósmica de fondo producida por el satélite WMAP en 2003 permitió a los cosmólogos aislar y medir la influencia de la materia oscura en el universo temprano. Como estos resultados parecen corresponder a un modelo coherente del cosmos basado en teorías convencionales de la gravedad, la MOND ha perdido muchos partidarios.

Durante el primer medio millón de años posteriores al Big Bang, un simple instante en los catorce mil millones de años de historia cósmica, la materia del universo ya había comenzado a fusionarse en los grumos que acabarían siendo los cúmulos y los supercúmulos de galaxias. Pero el cosmos estaba expandiéndose desde el principio, y

durante el siguiente medio millón de años duplicaría su tamaño. Así pues, el universo responde a dos fenómenos que compiten entre sí: la gravedad quiere que el material se coagule, pero la expansión quiere diluirlo. Si hacemos el cálculo, deducimos enseguida que la gravedad de la materia corriente no podía ganar esta batalla por sí sola. Necesitaba la ayuda de la materia oscura, sin la cual nosotros viviríamos —en realidad no viviríamos— en un universo sin estructura: nada de cúmulos, galaxias, estrellas, planetas ni personas. ¿Cuánta gravedad de la materia oscura necesitaba? Seis veces la aportada por la propia materia corriente. Este análisis no deja margen para los pequeños términos correctores de la MOND en las leyes de Newton: no nos dice qué es la materia oscura, sino sólo que sus efectos son reales y que, por mucho que lo intentemos, no podemos atribuir el mérito a la materia corriente.

La materia oscura desempeña otro papel clave en el universo. Para valorar todo lo que la materia oscura ha hecho por nosotros, remontémonos hasta un par de minutos después del Big Bang, cuando el universo era todavía tan tremendamente caliente y denso que los núcleos de hidrógeno (protones) podían fusionarse. Este crisol del cosmos temprano transformó el hidrógeno en helio, junto con cantidades ínfimas de litio, además de una cantidad aún menor de deuterio, una versión más pesada del núcleo de hidrógeno, con un neutrón añadido al protón. Esta mezcla de núcleos proporciona otra huella dactilar cósmica del Big Bang, un vestigio que nos permite reconstruir lo que pasó cuando el cosmos tenía sólo unos minutos de vida. En la creación de esta huella dactilar, el principal impulsor fue

la fuerte fuerza nuclear —la que mantiene unidos los protones y los neutrones en el núcleo—, no la gravedad, una fuerza tan débil que adquiere importancia sólo cuando las partículas se ensamblan por billones.

Para cuando la temperatura descendió por debajo de un valor umbral, la fusión nuclear en el conjunto del universo había fabricado un núcleo de helio por cada diez núcleos de hidrógeno. El universo también había convertido aproximadamente una milésima parte de su materia corriente en núcleos de litio, y dos cienmilésimas partes en deuterio. Si la materia oscura no incluyera algo de sustancia no interactuante sino que constara de materia oscura corriente —materia con privilegios de fusión normal—, al contener seis veces más partículas que la materia corriente en los minúsculos volúmenes del universo temprano, su presencia habría incrementado espectacularmente el ritmo de fusión del hidrógeno. El resultado habría sido una perceptible superproducción de helio, en comparación con la cantidad observada, y el nacimiento de un universo notablemente distinto de este que habitamos.

El helio tiene un núcleo duro, relativamente fácil de hacer, pero difícilísimo de fusionar con otros núcleos. Como las estrellas han seguido fabricando en sus núcleos helio a partir de hidrógeno —mientras se destruye relativamente poco helio mediante la más avanzada fusión nuclear—, cabría suponer que los lugares donde encontramos las menores cantidades de helio en el universo no contuvieran menos helio que el que el universo producía durante sus primeros minutos de vida. En efecto, las galaxias de cuyas estrellas

se han procesado mínimamente los ingredientes revelan que uno de cada diez de sus átomos consta de helio, precisamente lo que era de esperar del Big Bang a pelo del cosmos, toda vez que la materia oscura a la sazón presente no participó en la fusión nuclear que creó los núcleos.

\* \* \* \*

De modo que la materia oscura es amiga nuestra. Sin embargo, es comprensible que los astrofísicos se sientan incómodos cada vez que han de basar sus cálculos en conceptos que no entienden, si bien no sería la primera vez. Los astrofísicos midieron la producción de energía del Sol, por ejemplo, mucho antes de que nadie supiera que la responsable era la fusión termonuclear. En el siglo XIX, antes de la introducción de la mecánica cuántica y el descubrimiento de otras cuestiones importantes sobre el comportamiento de la materia en sus escalas menores, la fusión ni siquiera existía como concepto.

Algunos escépticos implacables podrían comparar la materia oscura actual con el hipotético —y ahora extinto— «éter», propuesto siglos atrás como el medio ingrávido y transparente a través del cual se movía la luz. Durante muchos años, hasta un famoso experimento de 1887 realizado en Cleveland por Albert Michelson y Edward Morley, los físicos dieron por sentado que el éter existía, aun sin tener la menor prueba de ello. Conocida su condición de onda, se creía que la luz necesitaba un medio por el que desplazarse, igual que las ondas sonoras se mueven por el aire. No obstante, a la luz se la ve muy contenta viajando por el vacío del espacio, sin medio de soporte alguno. A diferencia de las ondas sonoras, sin embargo, que sí



consisten en vibraciones del aire, las ondas lumínicas se propagan solas.

De todos modos, la ignorancia sobre la materia oscura difiere en aspectos esenciales de la ignorancia que suponía defender la existencia del éter. Mientras el éter equivalía a un contenedor de nuestro conocimiento incompleto, la existencia de la materia oscura no deriva de la mera suposición, sino de los efectos observados de su gravedad en la materia visible. No nos inventamos la materia oscura de la nada, sino que deducimos su existencia a partir de hechos observacionales. La materia oscura es tan real como los más de cien planetas descubiertos en órbitas alrededor de estrellas distintas del Sol —casi todos detectados sólo gracias a su influencia gravitatoria en sus estrellas anfitrionas—. Lo peor que podría pasar es que los físicos (u otras personas de percepción profunda) descubrieran que la materia oscura no consta en absoluto de materia, sino de otra cosa contra la que no pudieran argumentar nada. ¿Podría ser la materia oscura la manifestación de fuerzas de otra dimensión? ¿O de un universo paralelo que se cruza con el nuestro? Aun así, nada de ello cambiaría la satisfactoria invocación de la gravedad de la materia oscura en las ecuaciones que utilizamos para entender la formación y la evolución del universo.

Algunos escépticos despiadados tal vez dirían que «ver es creer». Un enfoque vital de este tipo funciona bien en muchos empeños, por ejemplo, en la ingeniería mecánica, en la pesca o cuando uno sale con alguien. Al parecer, también es bueno para los residentes en Missouri. Pero no contribuye a la buena ciencia. La ciencia no

consiste sólo en ver, sino que incluye también medir; a ser posible con algo distinto de los propios ojos, que están inextricablemente unidos al equipaje del cerebro: ideas preconcebidas, nociones posconcebidas, imaginación no comprobada con referencia a otros datos y el sesgo.

Tras oponer resistencia a diversos intentos de detectarla directamente en la Tierra a lo largo de tres cuartos de siglo, la materia oscura se ha convertido en una especie de test de Rorschach del investigador. Según algunos físicos de las partículas, ha de consistir en cierta clase fantasmagórica de partículas no descubiertas que interactúan con la materia a través de la gravedad; pero por lo demás se relacionan con la materia o la luz sólo débilmente o nada en absoluto. Aunque suena estrambótico, la sugerencia tiene precedentes. Por ejemplo, se sabe que los neutrinos existen, si bien apenas interactúan con la luz y la materia corrientes. Los neutrinos del Sol —dos neutrinos por cada núcleo de helio fabricado en el centro solar— se desplazan por el vacío del espacio casi a la velocidad de la luz, pero luego pasan por la Tierra como si no existiesen. La cuenta: día y noche, cien mil millones de neutrinos por segundo procedentes del Sol entran y salen de cada pulgada cuadrada de nuestro cuerpo. Pero a los neutrinos es posible pararlos. Muy de vez en cuando interactúan con la materia mediante la fuerza nuclear débil de la naturaleza. Y si podemos parar una partícula, podemos detectarla. Comparemos el esquivo comportamiento de los neutrinos con el del Hombre Invisible (en su fase invisible), tan buen candidato para la materia oscura como cualquier otro. El Hombre Invisible podría

cruzar puertas y paredes como si no estuvieran ahí. Aun estando dotado de esa facultad, ¿por qué no atraviesa simplemente el suelo y cae al sótano?

Si somos capaces de construir suficientes detectores sensibles, las partículas de materia oscura del físico de las partículas se evidenciarán mediante interacciones conocidas. O acaso revelen su presencia gracias a fuerzas distintas de la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil y el electromagnetismo. Estas tres fuerzas (además de la gravedad) median en todas las interacciones de todas las partículas conocidas. Así que las opciones están claras. Las partículas de materia oscura o bien deben aguardar a que las descubramos y controlemos una nueva fuerza o clase de fuerzas mediante las cuales interaccionen, o bien interaccionan por medio de fuerzas normales, pero con una debilidad asombrosa.

Los teóricos de la MOND no ven partículas exóticas en su test de Rorschach. Para ellos, lo que hay que arreglar es la gravedad, no las partículas. Y así crearon la dinámica newtoniana modificada, un intento atrevido que parece haber fracasado, pero que sin duda ha sido el precursor de otros esfuerzos por cambiar nuestra idea de la gravedad más que el censo de partículas subatómicas.

Otros físicos buscan lo que denominan «teoría del todo» (TOE, por sus siglas en inglés). En un derivado de una versión, nuestro universo se encuentra cerca de un universo paralelo, con el que interactuamos sólo mediante la gravedad. Nunca nos tropezaremos con materia alguna de este otro universo, pero quizá notemos su «tirón» cuando entra en las dimensiones espaciales del nuestro. Imaginemos un

universo fantasma justo al lado, cuya existencia se nos revela sólo gracias a la gravedad. Suena exótico e increíble, pero probablemente no más que las primeras sugerencias de que la Tierra daba vueltas alrededor del Sol o de que nuestra galaxia no era la única del universo.

\* \* \* \*

Así pues, los efectos de la materia oscura son reales. Simplemente no sabemos qué es. Por lo visto, no interacciona mediante la fuerza fuerte, por lo que no puede fabricar núcleos. Tampoco se ha observado que interactúe mediante la fuerza nuclear débil, algo que hacen incluso los escurridizos neutrinos. No parece interactuar con la fuerza electromagnética, por lo que no fabrica moléculas, y tampoco absorbe, emite, refleja ni dispersa la luz. No obstante, sí ejerce gravedad, a la que la materia corriente también responde. Y ya está. Tras todos estos años de investigaciones, los astrofísicos no han visto que haga nada más.

Ciertos mapas detallados de la radiación cósmica de fondo han puesto de manifiesto que la materia oscura debió de existir durante los primeros trescientos ochenta mil años del universo. También hoy necesitamos materia oscura en nuestra galaxia, y en los cúmulos de galaxias, para explicar los movimientos de los objetos que contienen. Pero, por lo que sabemos, nuestra ignorancia aún no ha frustrado ni desbaratado la marcha de la astrofísica. Simplemente llevamos la materia oscura con nosotros como un amigo extraño, y recurrimos a ella donde y cuando el universo así nos lo requiere.

En lo que esperamos que sea un futuro no muy lejano, seguirá la diversión en la medida que aprendamos a explotar la materia oscura; en cuanto averigüemos de qué está hecha. Imaginemos juguetes invisibles, coches que pasan unos a través de otros o aviones super sigilosos. En la historia de los descubrimientos científicos crípticos e insondables abundan los ejemplos de personas inteligentes que resolvieron la manera de sacar provecho de esos conocimientos para su propio beneficio o por el bien de la vida en la Tierra.

## Capítulo 5

### Hágase más oscuridad

Actualmente sabemos que el cosmos tiene un lado claro y otro oscuro. El lado claro abarca todos los objetos celestiales familiares: las estrellas, que se agrupan por millones en las galaxias, así como los planetas y los desechos cósmicos más pequeños que acaso no produzcan luz visible, pero que sí emiten otras formas de radiación electromagnética, como los infrarrojos o las ondas de radio.

Hemos descubierto que el lado oscuro del universo comprende la desconcertante materia oscura, detectada gracias a su influencia gravitatoria en la materia visible, pero, por lo demás, de forma y composición totalmente desconocidas. Una cantidad moderada de esta materia oscura acaso sea materia corriente que permanece invisible porque no produce radiación detectable. Sin embargo, como se destacó en el capítulo anterior, la mayor parte de la materia oscura consta de materia no corriente, cuya naturaleza continúa siéndonos esquiva (a excepción de su fuerza gravitatoria en la materia que podemos ver).

Más allá de todas las cuestiones concernientes a la materia oscura, el lado oscuro del universo presenta otro aspecto completamente distinto, que no radica en ninguna clase de materia, sino en el espacio propiamente dicho. Debemos este concepto, junto a los asombrosos resultados que conlleva, al padre de la cosmología moderna, que no es otro que Albert Einstein.

Hace noventa años, mientras las recién perfeccionadas ametralladoras de la Primera Guerra Mundial masacraban a los soldados a millares, a unos centenares de kilómetros al oeste, Albert Einstein estaba en su despacho de Berlín, reflexionando sobre el universo. Al comienzo de la guerra, Einstein y un colega hicieron circular entre sus compañeros un manifiesto antibelicista; a sus firmas añadieron otras dos. Esto le distinguió de los demás científicos, la mayoría de los cuales había firmado un llamamiento a ayudar a Alemania en su esfuerzo bélico, y echó a perder la carrera de su colega. Sin embargo, la atractiva personalidad de Einstein y su fama científica le permitieron mantener el respeto de sus compañeros. Y siguió esforzándose por encontrar ecuaciones capaces de describir el cosmos con precisión.

Antes de terminada la guerra, Einstein había logrado un gran éxito, posiblemente el mayor de todos. En noviembre de 1915, elaboró su teoría de la relatividad general, que describe cómo interactúan el espacio y la materia: la materia le dice al espacio cómo curvarse, y el espacio le dice a la materia cómo moverse. Para sustituir la misteriosa «acción a distancia» de Isaac Newton, Einstein consideraba la gravedad como un pandeo local en el tejido del espacio. El Sol, por ejemplo, crea una especie de abolladura, de espacio curvo máximamente perceptible a distancias próximas al mismo. Los planetas tienden a acercarse a dicha abolladura, pero gracias a su inercia no caen dentro. En vez de ello, describen órbitas alrededor del Sol que los mantienen a una distancia casi constante de la abolladura en el espacio. Al cabo de unas semanas de publicada la teoría, el físico

Karl Schwarzschild, eludiendo los horrores cotidianos en el ejército alemán (que poco después le provocaron una enfermedad mortal), se valió del concepto de Einstein para demostrar que un objeto con una gravedad lo bastante fuerte crea una «singularidad» en el espacio. En una singularidad así, el espacio se curva totalmente en torno a un objeto e impide que nada, luz incluida, abandone sus inmediaciones. En la actualidad, a estos objetos los llamamos «agujeros negros».

La teoría de la relatividad general condujo a Einstein a la ecuación clave que había estado buscando, la que vincula el contenido del espacio a su comportamiento global. Tras estudiar esta ecuación en la intimidad de su despacho y crear mentalmente modelos del cosmos, Einstein casi descubre la expansión del universo una docena de años antes de que fuera revelada por las observaciones de Edwin Hubble.

La ecuación básica de Einstein predice que, en un universo en el que la materia tiene una distribución aproximadamente uniforme, el espacio no puede ser estático. El cosmos no puede simplemente «estar ahí», como insiste nuestra intuición en que debería ser y como todas las observaciones astronómicas habían dado a entender hasta ese momento. En vez de ello, la totalidad del espacio debe estar siempre expandiéndose o contrayéndose: el espacio ha de comportarse un poco como la superficie de un globo que se hincha o se deshinch, pero no como la de un globo de tamaño constante.

Esto preocupaba a Einstein. Por una vez, ese audaz teórico, que recelaba de la autoridad y nunca había dudado en oponerse a los conceptos físicos convencionales, tenía la impresión de haber ido



demasiado lejos. Ninguna observación astronómica sugería la idea de un universo en expansión, pues los astrónomos sólo habían documentado los movimientos de estrellas próximas y aún no habían determinado las tremendas distancias que nos separan de lo que ahora denominamos «galaxias». En vez de anunciar al mundo que el universo debe de expandirse o de contraerse, Einstein volvió a su ecuación en busca de una manera de inmovilizar el cosmos.

Encontró una enseguida. Su ecuación básica dejaba margen para un término con un valor constante, pero desconocido, que representa la cantidad de energía contenida en cada centímetro cúbico de espacio vacío. Como nada sugería que ese término constante debiera tener un valor u otro, en su primer momento Einstein lo consideró igual a cero. Entonces publicó un artículo científico para demostrar que si ese término, que más adelante los cosmólogos denominarían «constante cosmológica», tuviera un valor concreto, el espacio sería estático. Entonces la teoría ya no estaría reñida con observaciones del universo, y Einstein podría considerar válida su ecuación.

Esta solución se topó con graves dificultades. En 1922, un matemático ruso llamado Alexander Friedmann demostró que el universo estático de Einstein sería inestable, como un lápiz apoyado en la punta. Cualquier onda o alteración haría que el espacio se expandiera o se contrajera. Al principio, Einstein dijo que Friedmann se equivocaba, pero luego, en una típica demostración de generosidad, publicó un artículo en el que retiraba esa afirmación y decía que, después de todo, Friedmann estaba en lo cierto. Al terminar la década de 1920, a Einstein le encantó enterarse, por el

descubrimiento de Hubble, de que el universo está expandiéndose. Según los recuerdos de George Gamow, Einstein declaró que la constante cosmológica era su «mayor metedura de pata». A excepción de algunos cosmólogos que siguieron recurriendo a una constante cosmológica distinta de cero (con un valor diferente del utilizado por Einstein) para explicar ciertas observaciones desconcertantes, la mayoría de las cuales más adelante resultaron ser incorrectas, los científicos de todo el mundo suspiraron aliviados al ver que al espacio no le hacía falta esa constante.

O eso creían, al menos. La gran historia cosmológica de finales del siglo XX, la sorpresa que puso el mundo de la cosmología patas arriba, residía en el sensacional descubrimiento, anunciado en 1998, de que el universo sí tiene una constante cosmológica distinta de cero. El espacio vacío contiene efectivamente energía, denominada «energía oscura», y posee características muy poco comunes que determinan el futuro del universo entero.

\* \* \* \*

Para comprender, y quizás incluso creer, estas afirmaciones espectaculares, hemos de seguir los debates cruciales de los cosmólogos durante los setenta años siguientes al descubrimiento del universo en expansión por parte de Hubble. La ecuación fundamental de Einstein deja margen a la posibilidad de que el espacio tenga curvatura, descrita matemáticamente como positiva, cero o negativa. La curvatura cero define el «espacio plano», aquel que nuestra mente insiste en considerar como única posibilidad, que se extiende hasta el infinito en todas las direcciones, como la superficie de una pizarra

ilimitada. En cambio, un espacio curvado positivamente corresponde, por analogía, a la superficie de una esfera, un espacio bidimensional cuya curvatura podemos ver utilizando la tercera dimensión. Obsérvese que el centro de la esfera, el punto que parece permanecer estacionario mientras la superficie bidimensional se expande o se contrae, reside en esta tercera dimensión y no aparece en ningún lugar de la superficie que representa todo el espacio.

Igual que todas las superficies curvadas positivamente incluyen sólo una cantidad finita de área, todos los espacios curvados positivamente contienen sólo una cantidad finita de volumen. Un cosmos con curvatura positiva tiene la propiedad de que, si abandonamos la Tierra durante el tiempo suficiente, al final regresaremos al punto de partida, como Magallanes tras circunnavegar el globo. A diferencia de las superficies esféricas con curvatura positiva, los espacios curvados negativamente se extienden hasta el infinito, aunque no sean planos. Una superficie bidimensional con curvatura negativa se parece a la superficie de una silla de montar infinitamente grande: se curva «hacia arriba» en una dirección (de delante atrás) y «hacia abajo» en la otra (de lado a lado).

\* \* \* \*

Si la constante cosmológica es igual a cero, podemos describir las propiedades globales del universo con sólo dos números. Uno, denominado «constante de Hubble», mide el ritmo al que el universo está expandiéndose en la actualidad; el otro, la curvatura del espacio. En la segunda mitad del siglo XX, casi todos los cosmólogos creían que la constante cosmológica era cero, y consideraban que su

principal objetivo de investigación era calcular el ritmo de expansión cósmica y la curvatura del espacio.

Es posible obtener ambos números partiendo de mediciones precisas de las velocidades a las que estos objetos situados a diferentes distancias se alejan de nosotros. La tendencia general entre la distancia y la velocidad —el ritmo al que la velocidad de retroceso de las galaxias aumenta con el aumento de la distancia— produce la constante de Hubble, mientras que pequeñas desviaciones de esta tendencia general, que aparecen sólo cuando observamos objetos alejadísimos de nosotros, revelan la curvatura del espacio. Siempre que los astrónomos observan objetos situados a muchos miles de millones de años luz de la Vía Láctea, miran tan atrás en el tiempo que ven el cosmos no como es ahora sino como era cuando había transcurrido un tiempo brevísimo desde el Big Bang. Las observaciones de galaxias localizadas a cinco mil millones de años luz o más de la Vía Láctea permiten a los cosmólogos reconstruir una parte significativa de la historia del universo en expansión. En concreto, pueden ver cómo ha cambiado con el tiempo el ritmo expansivo, que es la clave para determinar la curvatura del espacio. Este enfoque funciona, al menos en principio, porque el grado de curvatura del espacio origina diferencias sutiles en el ritmo al que la expansión universal ha cambiado a lo largo de miles de millones de años.

En la práctica, los astrofísicos seguían siendo incapaces de resolver este problema, pues no sabían hacer estimaciones lo bastante fiables de las distancias a cúmulos de galaxias situados a muchos miles de

millares de años luz de la Tierra. No obstante, tenían otra bala en la recámara. Si podían calcular la densidad promedio de toda la materia del universo —es decir, el número promedio de gramos de material por centímetro cúbico de espacio—, podrían comparar este número con la «densidad crítica», valor pronosticado por las ecuaciones de Einstein que predicen el universo en expansión. La densidad crítica establece la densidad exacta requerida para un universo con curvatura cero. Si la densidad real está por encima de ese valor, la curvatura es positiva. En tal caso, suponiendo que la constante cosmológica sea igual a cero, a la larga el cosmos dejará de expandirse y empezará a contraerse. Si, en cambio, la densidad real es exactamente igual a la densidad crítica o está por debajo, el universo se expandirá eternamente. La igualdad exacta entre los valores reales y los valores críticos de la densidad se produce en un cosmos con curvatura cero, mientras que en un universo con curvatura negativa la densidad real es inferior a la densidad crítica. A mediados de la década de 1990, los cosmólogos sabían que, incluso después de incluir toda la materia oscura que habían detectado (a partir de su influencia gravitatoria en la materia visible), la densidad total de materia en el universo equivalía aproximadamente a una cuarta parte de la densidad crítica. Este resultado no parece precisamente pasmoso, aunque sí da a entender que el cosmos no dejará nunca de expandirse y que el espacio en el que vivimos todos debe de tener una curvatura negativa. No obstante, esto dolió a los cosmólogos de orientación más teórica, pues habían llegado a creer que el espacio tendría curvatura cero.

\* \* \* \*

Esta creencia se basaba en el «modelo inflacionario» del universo, así llamado (como es lógico) en una época en que se disparaban los índices de precios al consumo. En 1979, Alan Guth, un físico que trabajaba en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, California, conjeturó que, en los primeros momentos, el cosmos se expandió a un ritmo increíblemente elevado; tanto que diferentes trozos de materia se alejaron unos de otros acelerando, alcanzando velocidades muy superiores a la de la luz. Pero ¿no decía la teoría de la relatividad especial de Einstein que la velocidad de la luz era un límite universal de velocidad para todo movimiento? No exactamente. El límite de Einstein se aplica sólo a objetos que se mueven en el espacio, no a la expansión del espacio mismo. Durante la era de la inflación, que duró aproximadamente sólo desde  $10^{-37}$  segundos a  $10^{-34}$  segundos tras el Big Bang, el cosmos aumentó de tamaño  $10^{50}$  veces.

¿Qué provocó esta enorme expansión cósmica? La hipótesis de Guth era que todo el espacio debió de experimentar una transición de fase, algo análogo a lo que pasa cuando el agua líquida se congela y se transforma enseguida en hielo. Tras algunos retoques cruciales por parte de colegas suyos de la Unión Soviética, el Reino Unido y los Estados Unidos, la idea de Guth llegó a ser tan atractiva que durante dos décadas ha dominado los modelos teóricos del universo más temprano.

¿Por qué la inflación resulta una teoría tan atractiva? La era de la inflación explica por qué el universo, en sus propiedades globales, parece lo mismo en cualquier dirección: todo lo que vemos (y

muchísimo más que eso) inflado desde una diminuta región del espacio, convirtiendo sus propiedades locales en otras de carácter universal. En la teoría se acumulan otras ventajas —en las que aquí no vamos a detenernos—, al menos para quienes crean mentalmente modelos del universo. En todo caso, sí vale la pena destacar un rasgo adicional. El modelo inflacionario hace una predicción sencilla y verificable: el espacio del universo debe ser plano, sin curvatura positiva ni negativa, sólo plano tal como lo imagina nuestra intuición. Según esta teoría, la condición de universo plano surge de la enorme expansión producida durante la era inflacionaria. Imaginémonos, por analogía, en la superficie de un globo, y dejemos que este multiplique su tamaño en un factor del que perdemos la cuenta de los ceros. Tras esta expansión, la parte de la superficie del globo que vemos será plana como una crep. Así, también debería serlo todo el espacio que aspiramos a medir algún día, si el modelo inflacionario describe de veras el universo real.

Sin embargo, la densidad total de la materia equivale sólo a una cuarta parte de la cantidad requerida para que el espacio sea plano. En las décadas de 1980 y 1990, muchos cosmólogos con mentalidad teórica creían que, como el modelo inflacionario debía de ser válido, a la larga los datos nuevos cerrarían la «brecha de masa» cósmica, la diferencia entre la densidad total de materia, que apuntaba a un universo con curvatura negativa, y la densidad crítica, al parecer necesaria para alcanzar un cosmos con espacio plano. Esas creencias los impulsaron a avanzar con optimismo, incluso mientras muchos cosmólogos de orientación observacional se burlaban de aquella

excesiva dependencia del análisis teórico. Y de pronto cesaron las burlas.

En 1998, dos equipos rivales de astrónomos anunciaron nuevas observaciones que daban a entender la existencia de una constante cosmológica distinta de cero; no (desde luego) el mismo número propuesto por Einstein para mantener el universo estático, sino otro valor, muy diferente, según el cual el universo se expandirá eternamente a un ritmo cada vez mayor.

Si los teóricos hubieran sugerido esto para otro modelo del universo, el mundo no habría notado mucho su esfuerzo ni lo habría recordado por mucho tiempo. Aquí, sin embargo, expertos acreditados en la observación del universo real habían recelado unos de otros, habían verificado las actividades sospechosas de sus rivales y descubierto que coincidían en los datos y su interpretación. Los resultados observacionales no sólo daban a entender una constante cosmológica distinta de cero, sino que asignaban a esa constante un valor gracias al cual el espacio era plano.

¿Cómo? ¿La constante cosmológica aplana el espacio? ¿Significa esto que, como la Reina Roja de *Alicia en el País de las Maravillas*, cada uno puede creer en seis cosas imposibles antes de desayunar? En todo caso, una reflexión más madura quizá nos convenza de que, si el espacio aparentemente vacío contiene en efecto energía (!), esta ha de aportar masa al cosmos, precisamente lo que nos dice la famosa ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ . Si tenemos cierta  $E$ , podemos concebirla como una cantidad correspondiente de  $m$ , igual a  $E$  dividida por  $c^2$ . Entonces la densidad total debe ser igual a la suma



de la densidad aportada por la materia más la densidad aportada por la energía.

La nueva densidad total es lo que debemos comparar con la densidad crítica. Si las dos son iguales, el espacio ha de ser plano. Esto satisfaría la predicción del modelo inflacionario del espacio plano, pues no importa si la densidad total en el espacio surge de la densidad de la materia, de la materia equivalente proporcionada por la energía en el espacio vacío o de una combinación de ambas.

\* \* \* \*

Los datos clave que sugerían una constante cosmológica distinta de cero, y por tanto la existencia de energía oscura, procedían de observaciones astronómicas de un tipo concreto de estrella en explosión, o supernova, que experimenta una muerte espectacular en explosiones colosales. Estas supernovas, denominadas Tipo Ia o SN Ia, difieren de otros tipos, que se producen cuando los núcleos de estrellas masivas se colapsan tras agotar todas las posibilidades de generar más energía mediante fusión nuclear. Por contraste, las SN Ia deben su origen a estrellas enanas blancas pertenecientes a sistemas estelares binarios. Dos estrellas que casualmente nacen cerca una de otra se pasarán la vida describiendo órbitas simultáneas alrededor de su centro común de masa. Si una tiene más masa que la otra, cruzará más deprisa la flor de la vida, y en la mayoría de los casos perderá luego sus capas externas de gas, de modo que su núcleo se mostrará ante el cosmos como una «enana blanca» degenerada, empequeñecida, un objeto no más grande que la Tierra, pero con tanta masa como el Sol. Los físicos denominan «degenerada»

a la materia de las enanas blancas porque tiene tanta densidad — más de cien mil veces superior a la del hierro o del oro— que los efectos de la mecánica cuántica actúan en la materia a granel, lo cual impide que ceda bajo sus enormes fuerzas auto-gravitatorias.

Una enana blanca en órbita mutua con una estrella compañera envejecida atrae material gaseoso que escapa de la estrella. Esta materia, todavía relativamente rica en oxígeno, se acumula en la enana y cada vez se vuelve más densa y caliente. Por último, cuando la temperatura aumenta hasta 10 millones de grados, toda la estrella se inflama en la fusión nuclear. La explosión resultante —similar, en concepto, a una bomba de hidrógeno, pero billones de veces más violenta— destruye por completo la enana blanca y genera una supernova Tipo Ia.

Las SN Ia han resultado especialmente útiles para los astrónomos al tener dos cualidades separadas. Primero, producen las explosiones de supernovas más luminosas del cosmos, visibles a miles de millones de años luz. Segundo, la naturaleza establece el límite de masa máxima que puede tener una enana blanca, igual a 1,4 veces la masa del Sol. La materia puede acumularse en la superficie de una enana sólo hasta que la masa de esta alcanza ese valor restrictivo. En ese punto, la fusión nuclear revienta la enana blanca, y el bombazo llega a objetos con la misma masa y la misma composición, desparramados por todo el universo. Como consecuencia de ello, todas estas supernovas enanas blancas alcanzan casi la misma producción energética máxima, y se desvanecen casi al mismo ritmo tras lograr su máxima luminosidad.

Estos atributos dobles permiten a las SN Ia proporcionar a los astrónomos «velas estándar» muy luminosas, fácilmente reconocibles, objetos de los que se sabe que producen la misma energía dondequiera que aparezcan. La distancia a las supernovas afecta a su luminosidad cuando las observamos, por supuesto. Dos SN Ia, vistas en dos galaxias remotas, parecerá que alcanzan la misma luminosidad máxima sólo si están a la misma distancia de nosotros. Si una se halla al doble de distancia, conseguirá sólo una cuarta parte de la luminosidad aparente máxima de la otra, pues la luminosidad con la que un objeto se muestra ante nosotros disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia.

Una vez que los astrónomos aprendieron a reconocer las supernovas Tipo Ia partiendo del estudio detallado del espectro de luz de cada uno de esos objetos, contaron con la llave de oro con la que resolver el enigma de determinar distancias precisas. Después de medir (con otros medios) las distancias a las SN Ia más próximas, podían calcular distancias mucho mayores a las otras supernovas Tipo Ia simplemente comparando la luminosidad de los objetos relativamente cercanos y lejanos.

Durante la década de 1990, dos equipos de especialistas en supernovas, uno de Harvard y otro de la Universidad de California, Berkeley, perfeccionaron esta técnica al descubrir el modo de compensar las diferencias pequeñas, aunque reales, entre las SN Ia, que las supernovas nos revelan mediante los detalles de sus espectros. Si querían utilizar esta llave recién forjada para resolver las distancias respecto a las supernovas remotas, los investigadores

necesitaban un telescopio capaz de observar galaxias lejanas con precisión exquisita; y lo encontraron en el Telescopio Espacial Hubble, renovado en 1993 para corregir su espejo principal, que al no haber sido pulido correctamente tenía una forma defectuosa. Los expertos en supernovas usaron telescopios terrestres para descubrir montones de SN Ia en galaxias a miles de millones de años luz de la Vía Láctea. A continuación, instalaron el Telescopio Hubble, al que pudieron asignar sólo una fracción pequeña del tiempo total de observación, para estudiar con detalle esas supernovas recién descubiertas.

A medida que la década de 1990 tocaba a su fin, los dos equipos de observadores de supernovas compitieron a fondo para conseguir un nuevo y ampliado «diagrama de Hubble», el gráfico cosmológico clave que representa distancias de galaxias frente a las velocidades a las que aquellas se alejan de nosotros. Los astrofísicos calculan estas velocidades gracias al efecto Doppler (descrito en el capítulo 13), que modifica los colores de la luz de las galaxias en pequeñas magnitudes que dependen de las velocidades a las que las galaxias se retiran.

La distancia y la velocidad de retroceso de cada galaxia especifican un punto en el diagrama de Hubble. En galaxias relativamente cercanas, estos puntos marchan hacia arriba a la vez, pues una galaxia dos veces más lejos de nosotros que otra retrocede dos veces más rápido. La proporcionalidad directa entre las distancias y las velocidades de retroceso de las galaxias tiene su expresión algebraica en la ley de Hubble, la simple ecuación que describe el comportamiento básico del universo:  $v = H_0 \times d$ . Aquí  $v$  es la velocidad

de retroceso,  $d$  la distancia, y  $H_0$  una constante universal denominada «constante de Hubble», que describe el universo entero en un momento determinado. Los observadores alienígenas de todo el universo que estudien el cosmos catorce mil millones de años después del Big Bang descubrirán galaxias alejándose a velocidades que siguen la ley de Hubble, y todos derivarán el mismo valor para la constante de Hubble, aunque seguramente le darán otro nombre. Este supuesto de democracia cósmica subyace a toda la cosmología moderna. No podemos demostrar que el cosmos entero siga este principio democrático. Quizá, mucho más allá del horizonte más lejano de nuestra visión, el cosmos se comporta de forma muy distinta de la que conocemos. Sin embargo, los cosmólogos rechazan este enfoque, al menos en lo relativo al universo observable. En este caso,  $v = H_0 \times d$  representa la ley universal.

Con el tiempo, no obstante, el valor de la constante de Hubble puede cambiar y efectivamente cambia. Un nuevo y mejorado diagrama, ampliado para incluir galaxias situadas a miles de millones de años luz, revela no sólo el valor de la constante de Hubble  $H_0$  actual (expresada en la pendiente de la línea que recorre los puntos correspondientes a las distancias y las velocidades de retroceso de las galaxias), sino también la manera en que el ritmo actual de expansión del universo difiere del de hace miles de millones de años. Esto último se pondría de manifiesto gracias a los detalles de los tramos superiores del gráfico, cuyos puntos describen las galaxias más remotas jamás observadas. Así pues, un diagrama de Hubble que se extendiera a distancias de muchos miles de millones de años luz

reflejaría la historia de la expansión cósmica, expresada en su cambiante ritmo.

En su esfuerzo por alcanzar este objetivo, la comunidad de astrofísicos dio con un filón de buena fortuna al contar con dos equipos de observadores de supernovas en competencia. Los resultados de las supernovas, anunciados en febrero de 1998, causaron tal impacto que ningún grupo individual pudo superar el escepticismo natural de los cosmólogos ante el hundimiento de sus muy aceptados modelos del universo. Los dos equipos de observadores dirigieron su escepticismo más que nada uno a otro, y buscaron errores en los datos o la interpretación del adversario. Cuando declararon satisfechos —pese a sus humanos prejuicios— que sus competidores eran meticulosos y competentes, el mundo cosmológico no tuvo más remedio que aceptar, bien que con cierta contención, la noticia llegada desde las fronteras del espacio.

¿Cuál era la noticia? Pues que las SN Ia más lejanas resultaban ser algo más débiles de lo esperado. Esto da a entender que las supernovas están un tanto más lejos de donde deberían estar, lo cual a su vez pone de manifiesto que algo impulsó al universo a expandirse un poco más rápido de lo que habría sido preceptivo. ¿Qué provocó esta expansión adicional? El principal culpable que encaja con los hechos es la energía oscura que acecha en el espacio vacío, energía cuya existencia corresponde a un valor distinto de cero para la constante cosmológica. Al calcular la cantidad mediante la cual las lejanas supernovas eran más débiles de lo esperado, los dos equipos habían medido la forma y el destino del universo.

\* \* \* \*

Cuando los dos equipos de supernovas llegaron a un consenso, el cosmos resultó ser plano. Para entenderlo, hemos de pelearnos un poco con el griego. Un universo con una constante cosmológica distinta de cero requiere un número adicional para describir el cosmos. A la constante de Hubble, que escribimos como  $H_0$  para indicar su valor en el momento presente, y a la densidad promedio de la materia, que por sí sola determina la curvatura del espacio si la constante cosmológica es cero, debemos añadir ahora la densidad equivalente proporcionada por la energía oscura, que, en virtud de la fórmula de Einstein  $E = mc^2$ , debe de poseer el equivalente de masa ( $m$ ) porque tiene energía ( $E$ ). Los cosmólogos expresan las densidades de la materia y la energía oscura con los símbolos  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$ , donde  $\Omega$  (letra griega mayúscula omega) es la proporción entre la densidad cósmica y la densidad crítica.  $\Omega_M$  simboliza la proporción entre la densidad promedio de toda la materia del universo y la densidad crítica, mientras que  $\Omega_\Lambda$  representa la relación entre la densidad equivalente proporcionada por la energía oscura y la densidad crítica. Aquí  $\Lambda$  (mayúscula griega lambda) es la constante cosmológica. En un universo plano, con una curvatura cero del espacio, la suma de  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  siempre es igual a 1, pues la densidad total (de la materia real más la materia equivalente proporcionada por la energía oscura) es exactamente igual a la densidad crítica.

Las observaciones de las lejanas supernovas Tipo Ia miden la diferencia entre  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$ . La materia tiende a ralentizar la expansión del universo mientras que la gravedad tira de todo hacia todo. Cuanto

mayor sea la densidad de la materia, más enlentecerá las cosas ese tirón. No obstante, la energía oscura hace algo totalmente distinto. A diferencia de los trozos de materia, cuya atracción mutua aminora el ritmo de la expansión cósmica, la energía oscura tiene una propiedad curiosa: hace que el espacio se expanda, por lo que acelera la expansión. A medida que se expande el espacio, se crea más energía oscura, de modo que el universo en expansión representa el «nada por nada», la barra libre primordial. La nueva energía oscura hace que el cosmos se expanda aún más deprisa, de modo que la barra libre sigue creciendo a medida que pasa el tiempo. El valor de  $\Omega_\Lambda$  es una medida del tamaño de la constante cosmológica y nos da la magnitud de los medios expansionistas de la energía oscura. Cuando los astrónomos calcularon la relación entre distancias de galaxias y sus velocidades de retroceso, observaron el resultado de la lucha entre la gravedad que tiraba de las cosas y la energía oscura que las separaba. Tras las mediciones se supo que  $\Omega_\Lambda - \Omega_M = 0,46, \pm 0,03$ . Como los astrónomos ya habían determinado que el valor de  $\Omega_M$  gira en torno a 0,25, este resultado establece que  $\Omega_\Lambda$  es aproximadamente 0,71. Entonces, la suma de  $\Omega_\Lambda$  y  $\Omega_M$  asciende a 0,96, casi el total previsto por el modelo inflacionario. Algunos resultados recientes han pulido estos valores y acercado la suma aún más a uno.

A pesar del acuerdo entre los dos grupos de expertos en supernovas, ciertos cosmólogos seguían mostrándose prudentes. No pasa cada día que un científico abandone una creencia arraigada, como la convicción de que la constante cosmológica debiera ser cero, y la sustituya por otra llamativamente distinta, como la conclusión de que



la energía oscura llena cada centímetro cúbico de espacio vacío. Casi todos los escépticos que habían seguido los pormenores de las posibilidades cosmológicas se declararon por fin convencidos tras haber asimilado nuevas observaciones procedentes de un satélite diseñado y accionado para observar la radiación cósmica de fondo con precisión inaudita. Este satélite, el importantísimo WMAP descrito en el capítulo 3, comenzó a efectuar observaciones útiles en 2002, y a principios de 2003 había acumulado suficientes datos para que los cosmólogos elaborasen un mapa del cielo entero, visto en las microondas que acarrean casi toda la radiación cósmica de fondo. Aunque ciertas observaciones anteriores habían revelado que los resultados básicos derivaban de este mapa, sólo habían observado pequeñas porciones del cielo o con mucho menos detalle. El mapa del cielo entero del WMAP supuso el remate del esfuerzo cartográfico y ha establecido, de una vez para siempre, los rasgos más importantes de la radiación cósmica de fondo.

El aspecto más llamativo y significativo de este mapa, como ocurrió también con las observaciones desde el globo y con el predecesor del WMAP, el satélite COBE (Cosmic Background Explorer, Explorador de radiación cósmica de fondo), reside en la casi ausencia de características especiales. No aparece ninguna diferencia mensurable en la intensidad de la radiación cósmica de fondo procedente de las diferentes direcciones hasta que en las mediciones alcanzamos una precisión de aproximadamente una parte por mil. Incluso entonces, las únicas diferencias discernibles parecen de una intensidad ligeramente superior, centradas en una dirección concreta, que se

corresponde con una intensidad ligeramente inferior, centrada en la dirección opuesta. Estas diferencias surgen del movimiento de nuestra galaxia de la Vía Láctea entre las galaxias vecinas. El efecto Doppler hace que recibamos una radiación algo más fuerte desde la dirección de este movimiento, no porque dicha radiación sea realmente más fuerte, sino porque nuestro movimiento hacia la radiación cósmica de fondo (CBR) aumenta levemente las energías de los fotones que detectamos.

En cuanto hemos compensado el efecto Doppler, la radiación cósmica de fondo parece totalmente homogénea, hasta que alcancemos un nivel de precisión aún mayor de aproximadamente una parte por cien mil. En dicho nivel, aparecen desviaciones minúsculas de la homogeneidad total. Estas rastrean ubicaciones desde las que la CBR llega con una intensidad algo mayor o algo menor. Como hemos señalado antes, las diferencias en cuanto a intensidad marcan las direcciones en las que la materia era o bien un poco más densa y más caliente, o bien un poco más fría y más ligera, que el valor promedio trescientos ochenta mil años después del Big Bang. El satélite COBE fue el primero en ver esas diferencias; los instrumentos aeroportados en globo y las observaciones del polo sur mejoraron las mediciones; y, a continuación, el satélite WMAP aportó una precisión todavía mayor al inspeccionar el universo entero, lo que permitió a los cosmólogos construir un mapa detallado de la intensidad de la radiación cósmica de fondo, observada con una resolución angular sin precedentes de aproximadamente un grado.

Los cosmólogos están de veras interesados en las minúsculas desviaciones de la homogeneidad reveladas por el COBE y el WMAP. En primer lugar, estas ponen de manifiesto las semillas de la estructura del universo en el momento en que la radiación cósmica de fondo dejó de interactuar con la materia. Las regiones se mostraban algo más densas que la media en ese momento en que gozaron de una ventaja de salida hacia nuevas contracciones, y han ganado la competición por adquirir la máxima materia mediante la gravedad. Así pues, el principal resultado del nuevo mapa de la intensidad de la CBR en distintas direcciones supone la verificación de las teorías de los cosmólogos sobre cómo las inmensas diferencias en densidad de un lugar a otro, en el conjunto del cosmos que vemos ahora, deben su existencia a diferencias pequeñísimas en la densidad unos cientos de miles de años después del Big Bang.

No obstante, los cosmólogos pueden utilizar sus nuevas observaciones de la radiación cósmica de fondo para percibir otro hecho aún más básico. Los detalles del mapa de la intensidad de la CBR en distintos puntos ponen de relieve la curvatura del espacio propiamente dicho. Este asombroso resultado se basa en que dicha curvatura afecta al modo en que lo recorre la radiación. Si, por ejemplo, el espacio tiene una curvatura positiva, cuando vemos la radiación cósmica de fondo, estamos prácticamente en la misma situación que un observador que, desde el polo norte, mira a lo largo de la superficie de la Tierra para estudiar la radiación producida cerca del ecuador. Como las líneas de longitud convergen hacia el polo, la

fuente de radiación parece abarcar un ángulo más pequeño que si el espacio fuera plano.

Para comprender cómo afecta la curvatura del espacio a la magnitud angular de los rasgos en la radiación cósmica de fondo, imaginemos la época en que la radiación dejó por fin de interactuar con la materia. En esa época, las mayores desviaciones de la homogeneidad que pudieran existir en el universo tenían un tamaño que los cosmólogos pueden calcular: la edad del universo de entonces multiplicada por la velocidad de la luz —unos 380 000 años luz de un extremo a otro—. Esto supone la distancia máxima en la que las partículas pueden haberse afectado mutuamente para generar alguna irregularidad. A distancias mayores, las «noticias» de otras partículas aún no habrían llegado, por lo que no cabría echarles la culpa de desviación alguna de la homogeneidad.

Estas desviaciones máximas, ¿qué magnitud angular abarcarían ahora en el cielo? Esto depende de la curvatura del espacio, que podemos determinar sumando  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$ . Cuanto más se acerca la suma a uno, más se acercará a cero la curvatura del espacio, y mayor será la magnitud angular que observamos para las desviaciones máximas de la homogeneidad en la CBR. Esta curvatura del espacio depende sólo de la suma de las dos  $\Omega$ , pues ambos tipos de densidad curvan el espacio de la misma manera. Por tanto, las observaciones de la radiación cósmica de fondo ofrecen una medición directa de  $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ , en contraste con las observaciones de supernovas, que calculan la diferencia entre  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$ .

Los datos del WMAP ponen de manifiesto que las mayores desviaciones de la homogeneidad en la CBR abarcan un ángulo de aproximadamente un grado, lo que supone que  $\Omega_M + \Omega_\Lambda$  tiene un valor de 1,02 más/menos 0,02. Así pues, dentro de los límites de la precisión experimental, podemos llegar a la conclusión de que  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ , y que el espacio es plano. El resultado de las observaciones de SN Ia lejanas se puede expresar como  $\Omega_\Lambda - \Omega_M = 0,46$ . Si combinamos este resultado con la conclusión de que  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ , vemos que  $\Omega_M = 0,27$  y  $\Omega_\Lambda = 0,73$ , con un margen de error porcentual pequeño en cada número. Como ya se ha señalado, se trata de las mejores estimaciones actuales de los astrofísicos para los valores de estos dos parámetros cósmicos clave, según los cuales la materia —tanto la corriente como la oscura— proporciona el 27% de la densidad total de energía del universo, y la energía oscura, el 73%. (Si preferimos pensar en el equivalente energético de la masa,  $E/c^2$ , entonces la energía oscura suministra el 73% de toda la masa).

Los cosmólogos saben desde hace tiempo que, si el universo tiene una constante cosmológica distinta de cero, la influencia relativa de la materia y la energía oscura debe de cambiar apreciablemente a medida que pasa el tiempo. Por otro lado, un universo plano va a ser plano siempre, desde su origen en el Big Bang hasta el futuro infinito que nos aguarda. Como en un universo plano la suma de  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  es siempre igual a uno, si uno de los dos cambia, también debe variar el otro para compensar.

Durante las eras cósmicas inmediatamente posteriores al Big Bang, la energía oscura apenas produjo efecto alguno en el universo.

Entonces existía tan poco espacio, en comparación con las épocas que seguirían, que  $\Omega_\Lambda$  tenía un valor sólo un poco por encima de cero, mientras que  $\Omega_M$  era sólo un poquito inferior a uno. En aquellos períodos remotos, el universo se comportaba prácticamente como un cosmos sin una constante cosmológica. A medida que fue pasando el tiempo, sin embargo,  $\Omega_M$  disminuyó continuamente y  $\Omega_\Lambda$  aumentó con igual regularidad, con lo que la suma siguió siendo uno. A la larga, dentro de centenares de miles de millones de años,  $\Omega_M$  irá disminuyendo casi hasta cero y  $\Omega_\Lambda$  aumentará hasta llegar casi a la unidad. En consecuencia, la historia del espacio plano con una constante cosmológica distinta de cero conlleva una transición desde sus primeros años, cuando la energía oscura apenas importaba, a través del período «presente», cuando  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  tienen valores aproximadamente iguales, y hacia el infinitamente lejano futuro, cuando la materia se diseminará de manera tan difusa por el espacio que  $\Omega_M$  deberá buscar un tobogán infinitamente largo hacia cero, aunque la suma de las dos  $\Omega$  siga siendo igual a uno.

La deducción observacional de cuánta masa existe en los cúmulos de galaxias da ahora a  $\Omega_M$  un valor de aproximadamente 0,25, mientras que las observaciones de la CBR y las supernovas remotas suponen un valor próximo a 0,27. Dentro de los límites de la precisión experimental, los dos valores coinciden. Si el universo en el que vivimos tiene efectivamente una constante cosmológica distinta de cero, y si esta constante es responsable (junto con la materia) de generar el universo plano previsto por el modelo inflacionario, la constante cosmológica tendrá un valor en virtud del cual  $\Omega_\Lambda$  será algo

superior a 0,7, dos veces y media el valor de  $\Omega_M$ . En otras palabras, ahora  $\Omega_\Lambda$  deberá hacer la mayor parte del trabajo para que  $\Omega_M + \Omega_\Lambda$  sea igual a uno. Esto significa que ya hemos superado la era cósmica en que la materia y la constante cosmológica contribuían por igual (cada una con un 0,5) al mantenimiento de la condición plana del espacio.

En menos de una década, la explosión doble de las supernovas Tipo Ia y la radiación cósmica de fondo ha cambiado el estatus de la energía oscura: de ser una idea genial a la que Einstein dio vueltas en otro tiempo a ser un hecho cósmico. A menos que una gran cantidad de observaciones acaben demostrando que se ha malinterpretado, o es inexacto o directamente erróneo, debemos aceptar el resultado de que el universo nunca se contraerá ni se reciclará a sí mismo. El futuro parece más bien sombrío: dentro de cien mil millones de años, cuando la mayoría de las estrellas se hayan apagado, casi todas las galaxias habrán desaparecido de nuestro horizonte de visibilidad.

Para entonces, la Vía Láctea se habrá fusionado con sus vecinos más cercanos y habrá creado una galaxia gigante en el quinto pino. Nuestro cielo nocturno contendrá estrellas (muertas y vivas) describiendo órbitas y nada más, lo que legará a los astrofísicos futuros un universo cruel. Sin galaxias para rastrear la expansión cósmica, llegarán a la equivocada conclusión, como hiciera Einstein, de que vivimos en un universo estático. La constante cosmológica y su energía oscura habrán desarrollado el universo hasta un punto en el que no es posible calcularlas, ni siquiera soñar con ellas.

Disfrutemos de la cosmología mientras podamos.



## Capítulo 6

### ¿Un universo o muchos?

A principios de 1998, el descubrimiento de que vivimos en un universo acelerado, con un ritmo de expansión cada vez mayor, conmocionó el mundo de la cosmología con el primer anuncio de observaciones de supernovas que evidenciaban esa aceleración. Ahora que el universo acelerado se ha visto confirmado por observaciones detalladas de la radiación cósmica de fondo, y que los cosmólogos han tenido varios años para forcejear con las consecuencias de una expansión cósmica acelerada, han surgido dos grandes preguntas para martirizar su existencia y alegrarles los sueños: ¿qué impulsa al universo a acelerar? y ¿por qué esta aceleración tiene el valor particular que ahora caracteriza al cosmos? La sencilla respuesta a la primera pregunta atribuye toda la responsabilidad de la aceleración a la existencia de la energía oscura o, lo que viene a ser lo mismo, a una constante cosmológica distinta de cero. La cantidad de aceleración depende directamente de la cantidad de energía oscura por centímetro cúbico: más energía supone más aceleración. Así pues, si los cosmólogos pudieran explicar sólo de dónde viene la energía oscura, y por qué existe en la proporción que la encontramos actualmente, podrían afirmar haber descubierto un secreto fundamental del universo: la explicación de la «barra libre» cósmica, la energía del espacio vacío que impulsa continuamente al cosmos hacia una expansión eterna, cada vez más rápida, y un futuro lejano de grandes cantidades de espacio,

cantidades proporcionalmente enormes de energía oscura y casi nada de materia por año luz cúbico.

¿Qué da origen a la materia oscura? Desde los profundos ámbitos de la física de las partículas, los cosmólogos pueden dar una respuesta: si confiamos en lo aprendido gracias a la teoría cuántica de la materia y la energía, la energía oscura surge de episodios que deben de producirse en el espacio vacío. Toda la física de las partículas se basa en esta teoría, que ha sido verificada tan a menudo y con tal exactitud en el terreno microscópico que casi todos los físicos la dan por buena. Una parte integral de la teoría cuántica alude a que lo que denominamos «espacio vacío» es en realidad un hervidero de «partículas virtuales», que entran y salen de la existencia con tal rapidez que nunca podemos definir las directamente, sino sólo observar sus efectos. La continua aparición y desaparición de estas partículas virtuales, que quienes gustan de buenas frases en física denominan «fluctuaciones cuánticas del vacío», proporciona energía al espacio vacío. Además, los físicos de las partículas son capaces, sin gran dificultad, de calcular la cantidad de energía que reside en cada centímetro cúbico de vacío. La aplicación simple de la teoría cuántica a lo que llamamos «vacío» predice que las fluctuaciones cuánticas crearán energía oscura. Si contamos la historia desde esta perspectiva, la gran pregunta sobre la energía oscura parece ser la siguiente: ¿por qué tardaron tanto los cosmólogos en reconocer que esta energía ha de existir?

Por desgracia, los detalles de la situación real convierten esa pregunta en otra: ¿cómo es que los físicos de las partículas se equivocaron

tanto? Los cálculos de la cantidad de energía oscura que acecha en cada centímetro cúbico dan un valor aproximadamente  $10^{120}$  veces superior al hallado por los cosmólogos en observaciones de supernovas y en la radiación cósmica de fondo. En situaciones astronómicas fuera de lo común, los cálculos que se revelan correctos con un margen de error de 10 se suelen considerar al menos temporalmente aceptables, pero nadie puede esconder un factor de  $10^{120}$  bajo la alfombra, ni siquiera una Pollyanna<sup>2</sup> física. Si el espacio vacío real contuviese energía oscura en cantidades mínimamente parecidas a las propuestas por la física de las partículas, desde entonces el universo se habría hinchado hasta tener tanto volumen que nuestra cabeza jamás habría empezado a girar, pues una minúscula fracción de segundo habría bastado para extender la materia hasta una rarefacción inimaginable. La teoría y la observación coinciden en que el espacio vacío debe contener energía oscura, pero discrepan en 10 elevado a un billón en cuanto a la cantidad de esa energía. Ninguna analogía terrenal, ni siquiera de carácter cósmico, puede ilustrar con precisión esta discrepancia. La distancia a la galaxia más remota que conocemos supera el tamaño de un protón en un factor de  $10^{40}$ . E incluso este número enorme es sólo la raíz cúbica del factor en el que la teoría y la observación divergen actualmente con respecto al valor de la constante cosmológica.

---

<sup>2</sup> *Pollyanna* es una novela publicada en el año 1913. La historia cuenta lo que le sucede a una niña llamada Pollyanna, huérfana de padre y madre que es enviada a vivir con su estricta Tía Polly. Pollyanna, educada con optimismo por parte de su padre, usa el juego de encontrar el lado bueno de cualquier situación para alegrar la vida de todos.

Los cosmólogos y los físicos de las partículas saben desde hace tiempo que la teoría cuántica pronostica un valor inaceptablemente elevado para la energía oscura, pero en la época en que la constante cosmológica se consideraba cero esperaban encontrar alguna explicación que, de hecho, anulara términos positivos con negativos en la teoría y, en consecuencia, se las ingeniara para eliminar el problema. En cierta ocasión, una anulación similar resolvió la cuestión de cuánta energía aportan las partículas virtuales a las partículas que sí observamos. Ahora que la constante cosmológica resulta ser distinta de cero, las esperanzas de hallar una cancelación así parecen haber disminuido. Si la cancelación efectivamente existe, de algún modo ha de eliminar casi todo el valor teórico gigantesco que tenemos en la actualidad. De momento, al carecer de una buena explicación para la magnitud de la constante cosmológica, los cosmólogos deben seguir colaborando con los físicos de las partículas mientras procuran reconciliar teorías sobre la generación de energía oscura por parte del cosmos con el valor observado de la cantidad de energía oscura por centímetro cúbico.

Algunas de las mentes más preclaras implicadas en la cosmología y la física de las partículas han dirigido, sin éxito alguno, buena parte de su afán a la explicación de este valor observacional. Esto provoca indignación, y a veces ira, entre los teóricos, en parte porque saben que aguarda un premio Nobel —por no hablar de la inmensa alegría del descubrimiento— a quienes sean capaces de explicar lo que ha hecho la naturaleza para fabricar el espacio tal como lo vemos. No obstante, otro asunto aviva una intensa controversia al pedir a gritos

una explicación: ¿por qué la cantidad de energía oscura, calculada mediante su masa equivalente, es aproximadamente igual a la cantidad de energía aportada por toda la materia del universo?

Podemos reformular la pregunta en términos de las dos  $\Omega$  que utilizamos para medir la densidad de la materia y la densidad equivalente de energía oscura: ¿por qué  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  son aproximadamente iguales en vez de ser muchísimo mayor una que la otra? Durante los primeros mil millones de años posteriores al Big Bang,  $\Omega_M$  era casi exactamente igual a uno, mientras  $\Omega_\Lambda$  era básicamente cero. En aquella época,  $\Omega_M$  era primero millones, luego miles y finalmente centenares de veces superior a  $\Omega_\Lambda$ . En la actualidad, siendo  $\Omega_M = 0,27$  y  $\Omega_\Lambda = 0,73$ , los dos valores son más o menos iguales, si bien  $\Omega_\Lambda$  ya es bastante mayor que  $\Omega_M$ . En el futuro lejano, dentro de cincuenta mil millones de años,  $\Omega_\Lambda$  será centenares, luego miles, después millones y finalmente incluso miles de millones mayor que  $\Omega_M$ . Sólo durante la era cósmica comprendida entre tres mil millones y cincuenta mil millones de años posteriores al Big Bang se equiparan las dos cantidades siquiera de manera aproximada.

Para una mente simple, el intervalo entre tres mil millones y cincuenta mil millones de años abarca un período bastante prolongado. Entonces, ¿cuál es el problema? Desde una óptica astronómica, este lapso equivale a casi nada. Los astrónomos suelen abordar el tiempo con la función logarítmica, dividiéndolo en intervalos que aumentan en factores de 10. Primero el cosmos tenía cierta edad; luego se hizo diez veces mayor; luego diez veces más, y así sucesivamente hasta el infinito, lo que requiere un número infinito

de saltos de diez veces. Supongamos que empezamos a contar el tiempo en el momento más temprano posterior al Big Bang que tiene alguna importancia en la teoría cuántica,  $10^{-43}$  segundos. Como cada año contiene unos treinta millones ( $3 \times 10^7$ ) de segundos, necesitamos unos 60 factores de 10 para pasar de  $10^{-43}$  segundos a tres mil millones de años tras el Big Bang. En cambio, hace falta sólo un poco más que un factor individual de 10 para ir desde tres mil millones a cincuenta mil millones de años, único período en que  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  son aproximadamente iguales. Después de esto, un número infinito de factores de diez veces abre el camino al futuro infinito. Partiendo de esta perspectiva logarítmica, existe una probabilidad sólo pequeñísima de que estemos vivos en una situación cósmica en la que  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  tengan valores vagamente semejantes. Michael Turner, destacado cosmólogo norteamericano, denomina a este acertijo —la cuestión de por qué estamos vivos en el momento en que  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  son aproximadamente iguales— «problema de Nancy Kerrigan» en honor de la patinadora olímpica, que, tras sufrir una agresión del novio de su rival, dijo: «¿Por qué yo? ¿Por qué ahora?».

Pese a su incapacidad para calcular una constante cosmológica cuyo valor no se acerca ni mucho menos al medido, los cosmólogos sí tienen una respuesta al problema de Kerrigan, aunque difieren mucho en cuanto a su importancia y sus repercusiones. Unos la adoptan; otros la aceptan sólo a regañadientes; hay quienes bailan alrededor de ella; y aún otros la desdeñan. Esta explicación conecta el valor de la constante cosmológica con el hecho de que estamos aquí, vivos en un planeta que da vueltas a una estrella corriente de

una galaxia del montón. Como existimos —prosigue el razonamiento—, los parámetros que describen el cosmos, y en concreto el valor de la constante cosmológica, deben de tener valores que nos permitan existir.

Consideremos, por ejemplo, lo que pasaría en un universo con una constante cosmológica de valor muy superior al actual. Una cantidad mucho mayor de energía oscura haría que  $\Omega_\Lambda$  aumentara muy por encima de  $\Omega_M$ , no después de unos cincuenta mil millones de años sino después de sólo unos cuantos millones. Para entonces, en un cosmos dominado por los efectos aceleradores de la energía oscura, la materia se propagaría tan deprisa que no podrían formarse galaxias, estrellas ni planetas. Si damos por supuesto que el período de tiempo transcurrido desde la primera formación de grumos de materia hasta el origen y el desarrollo de la vida abarca al menos mil millones de años, podemos llegar a la conclusión de que nuestra existencia limita la constante cosmológica a un valor comprendido entre cero y unas cuantas veces su valor real, mientras descartamos la infinita gama de valores superiores.

Este razonamiento goza de más aceptación si presuponemos, como hacen muchos cosmólogos, que todo lo considerado «universo» pertenece a un multiverso mucho mayor, que contiene un número infinito de universos ninguno de los cuales interacciona con ningún otro; como en el concepto «multiverso» la situación global se incrusta en dimensiones superiores, el espacio de nuestro universo sigue siendo totalmente inaccesible a cualquier otro, y viceversa. Esta falta de interacciones —ni siquiera teóricamente posibles— sitúa la teoría

del multiverso en la categoría de hipótesis aparentemente no comprobables, y por tanto no verificables, al menos hasta que mentes más sabias descubran la manera de poner a prueba el modelo. En el multiverso, nacen universos nuevos en momentos completamente aleatorios, capaces de hincharse mediante inflación hasta constituir enormes volúmenes de espacio, y de hacerlo sin que ello afecte en lo más mínimo al infinito número de otros universos.

En el multiverso, cada universo nuevo nace con sus propias leyes físicas y su propio conjunto de parámetros cósmicos, incluidas las reglas que determinan la magnitud de la constante cosmológica. Muchos de estos otros universos tienen constantes cosmológicas muchísimo mayores que las nuestras, y enseguida aceleran hacia situaciones de densidad próxima a cero, inadecuadas para la vida. Sólo una fracción minúscula, acaso infinitesimal, de todos los universos del multiverso ofrece condiciones que posibilitan la vida, pues sólo esta fracción tiene parámetros que permiten a la materia organizarse en galaxias, estrellas y planetas y que estos objetos duren miles de millones de años.

A este enfoque para explicar el valor de la constante cosmológica, los cosmólogos lo llaman «principio antrópico», aunque «método» antrópico seguramente sería un nombre más apropiado. Este intento de explicar una cuestión crucial de la cosmología tiene un gran atractivo: la gente lo ama o lo odia, pero casi nunca se muestra neutral al respecto. Como pasa con muchas ideas interesantes, es posible retorcer el enfoque antrópico para que favorezca, o parezca favorecer, diversos edificios mentales teológicos y teleológicos. Según



ciertos fundamentalistas religiosos, el enfoque antrópico respalda sus creencias porque confiere a la humanidad un papel central: si nadie lo observara, el cosmos —al menos el cosmos que conocemos— no estaría aquí —no podría estar—; por lo tanto, un poder superior tiene que haber hecho las cosas para nosotros. Alguien contrario a esta conclusión señalaría que esto no es lo que implica realmente el enfoque antrópico; en un nivel teológico, este argumento a favor de la existencia de Dios seguramente supone el creador más derrochador que cupiera imaginar, alguien que fabricó innumerables universos para que pudiera surgir la vida sólo en un pequeñísimo sector de uno de ellos. ¿Por qué no saltarnos el intermediario y seguir los viejos mitos de la creación que se centran en la humanidad?

Por otro lado, si decidimos ver a Dios en todas partes, como hacía Spinoza, no podemos menos que admirar un multiverso que hace florecer universos sin parar. Como pasa con muchas noticias procedentes de la frontera de la ciencia, el concepto de multiverso y el enfoque antrópico se pueden doblar en diferentes direcciones para atender a las necesidades de sistemas de creencias particulares. Tal como están las cosas, para muchos cosmólogos ya cuesta lo suyo aceptar el multiverso para encima vincularlo a algún sistema de creencias. Stephen Hawking, que (como Isaac Newton antes) es titular de la cátedra Lucasiana de la Universidad de Cambridge, considera que el enfoque antrópico es una excelente solución del problema de Kerrigan. Stephen Weinberg, que ganó el premio Nobel por sus percepciones en física de las partículas, no es muy partidario de este planteamiento, pero se declara favorable al mismo, al menos de

momento, porque hasta la fecha no ha aparecido ninguna otra explicación razonable.

Quizá la historia acabe demostrando que, de momento, los cosmólogos están centrándose en el problema equivocado, equivocado en el sentido de que aún no lo conocemos lo bastante para abordarlo como es debido. A Weinberg le gusta la analogía con el intento de Johannes Kepler de explicar por qué el Sol tenía seis planetas (como creían entonces los astrónomos) y por qué estos se movían en esas órbitas concretas. Cuatrocientos años después de Kepler, los astrónomos todavía saben demasiado poco sobre el origen de los planetas para ser capaces de explicar el número exacto y las órbitas de la familia del Sol. Sí sabemos que la hipótesis de Kepler, según la cual el espaciado de las órbitas alrededor del Sol permite a uno de los cinco sólidos perfectos encajar exactamente entre cada par de órbitas contiguas, no tiene absolutamente ninguna validez, porque los sólidos no encajan especialmente bien y (aún más importante) porque no tenemos buenas razones para explicar por qué las órbitas de los planetas deben seguir una regla así. Quizá para las generaciones posteriores los cosmólogos actuales serán Keplers de nuestro tiempo que forcejean valientemente para explicar lo que sigue siendo inexplicable con los conocimientos actuales sobre el universo. No todo el mundo está a favor del enfoque antrópico. Algunos cosmólogos lo atacan calificándolo de derrotista, ahistórico (pues contradice numerosos ejemplos del éxito de la física a la hora de explicar, a la corta o a la larga, multitud de fenómenos antaño misteriosos) y peligroso (pues el planteamiento antrópico huele a

argumentos del diseño inteligente). Además, para muchos cosmólogos es inaceptable, como base para una teoría del universo, el supuesto de que vivimos en un multiverso con múltiples universos con los que no podemos interactuar, ni siquiera en teoría.

El debate sobre el principio antrópico pone de relieve el escepticismo que subyace al enfoque científico para conocer el cosmos. Una teoría que atrae a un científico, por regla general el que la ideó, puede parecerle ridícula o simplemente errónea a otro. Ambos saben que las teorías sobreviven y prosperan cuando otros colegas las consideran idóneas para explicar la mayoría de los datos observacionales. (Como señaló una vez un famoso científico, cuidado con las teorías que expliquen *todos* los datos: lo más probable es que algunos resulten erróneos).

El futuro tal vez no nos brinde una resolución rápida de este debate, pero seguramente suscitará otros intentos de explicar lo que vemos en el universo. Por ejemplo, Paul Steinhardt, de la Universidad de Princeton, que podría tomar algunas clases particulares sobre creación de nombres con gancho, ha elaborado un teórico «modelo ekpirótico» del cosmos en colaboración con Neil Turok, de la Universidad de Cambridge. Motivado por la sección de la física de las partículas denominada «teoría de cuerdas», Steinhardt imagina un universo con once dimensiones, la mayoría de las cuales están «compactadas» —más o menos dobladas como un calcetín—, de modo que ocupan sólo cantidades de espacio infinitesimales. Algunas de las dimensiones adicionales tienen un tamaño y una importancia reales, pero no podemos percibir las porque permanecemos

encerrados en las cuatro conocidas. Si suponemos que todo el espacio del universo llena una lámina fina e infinita (este modelo reduce las tres dimensiones espaciales a dos), podemos imaginar otra lámina, paralela, y luego figurarnos las dos acercándose y chocando. El choque produce el Big Bang, y cuando las láminas rebotan entre sí, la historia de cada una procede según pautas familiares, lo que da origen a las galaxias y las estrellas. A la larga, las dos láminas dejan de separarse y empiezan a acercarse de nuevo, lo que provoca otra colisión y otro Big Bang en cada lámina. Así pues, el universo tiene una historia cíclica, se repite a sí mismo —al menos en sus rasgos más generales— a intervalos de cientos de miles de millones de años. Como *ekpyrosis* significa en griego ‘conflagración’ (recordemos la más conocida palabra *pirómano*), el «universo ekpirótico» recuerda a cualquiera que tenga el griego en la punta de la lengua el gran incendio que dio lugar al cosmos conocido. Este modelo ekpirótico del universo tiene atractivo emocional e intelectual, aunque no el suficiente para conquistar el corazón y la mente de muchos compañeros cosmólogos de Steinhardt. En todo caso, todavía no. Algo vagamente parecido al modelo ekpirótico, si no el modelo mismo, acaso ofrezca algún día el avance que los cosmólogos esperan actualmente en sus intentos de explicar la energía oscura. Incluso quienes apoyan el enfoque antrópico difícilmente se cerrarían en banda a una nueva teoría que les brindase una buena explicación para la constante cosmológica sin recurrir a un número infinito de universos, de los cuales el nuestro resulta ser uno de los afortunados.

Como dijo una vez un personaje de cómic de R. Crumb: «¡En menudo mundo maravilloso y disparatado vivimos! ¡Uala!».

## Parte II

### El origen de las galaxias y la estructura cósmica

#### Contenido:

*Capítulo 7. Descubrir las galaxias*

*Capítulo 8. El origen de la estructura*

### Capítulo 7

#### Descubrir las galaxias

Hace dos siglos y medio, poco antes de que el astrónomo inglés *sir* William Herschel construyera el primer telescopio realmente grande del mundo, el universo conocido consistía en poco más que las estrellas, el Sol y la Luna, los planetas, unas cuantas lunas de Júpiter y Saturno, algunos objetos confusos y la galaxia que constituye una franja lechosa a través del cielo nocturno. De hecho, la palabra *galaxia* deriva del griego *galaktos*, 'leche'. El cielo también contenía los objetos confusos, denominados científicamente «nebulosas» por la palabra latina correspondiente a *nube*; eran objetos de forma indeterminada como la nebulosa del Cangrejo en la constelación de Tauro, y la nebulosa de Andrómeda, que parece vivir entre las estrellas de la constelación de Andrómeda.

El telescopio de Herschel tenía un espejo de 120 centímetros de ancho, un tamaño inaudito para 1789, el año de su construcción. Un complejo montaje de cuchillos de armadura para sostener y apuntalar el telescopio lo convertía en un instrumento desgarrado,

pero cuando apuntó al cielo, Herschel pudo ver enseguida las innumerables estrellas que componen la Vía Láctea. Con su telescopio de 120 centímetros, amén de otro más pequeño y manejable, Herschel y su hermana Caroline elaboraron el primer catálogo exhaustivo del «cielo profundo» correspondiente a las nebulosas del norte. *Sir John* —hijo de Herschel— continuó la tradición familiar: amplió la lista de objetos septentrionales de su padre y su tía y, durante una prolongada estancia en el cabo de Buena Esperanza, en el extremo meridional de África, catalogó unos mil setecientos objetos borrosos visibles sólo desde el hemisferio sur. En 1864, *sir John* creó una síntesis de los objetos conocidos del cielo profundo, *A General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* [Catálogo general de nebulosas y cúmulos de estrellas], que incluía más de cinco mil entradas.

A pesar de este gran conjunto de datos, nadie de la época conocía la verdadera identidad de las nebulosas, sus distancias respecto de la Tierra o las diferencias entre ellas. El catálogo de 1864 permitió clasificarlas desde el punto de vista morfológico —esto es, con arreglo a la forma—. En la tradición «pitamos lo que vemos» de los árbitros de béisbol (que alcanzaron su reconocimiento precisamente en la época en que se publicó el Catálogo general de Herschel), los astrónomos denominaban a las nebulosas en forma de espiral «nebulosas espirales»; a las que tenían una forma vagamente elíptica, «nebulosas elípticas»; y a las de formas irregulares —ni elípticas ni espirales—, «nebulosas irregulares». Por último, a las nebulosas que parecían pequeñas y redondas, como la imagen telescópica de un

planeta, las llamaban «nebulosas planetarias», algo que ha confundido siempre a los recién llegados a la astronomía.

Durante buena parte de su historia, la astronomía ha sido honesta y se ha valido de métodos descriptivos de investigación muy parecidos a los usados en botánica. Mediante sus crecientes compendios de estrellas y cosas borrosas, los astrónomos buscaban patrones y clasificaban objetos conforme a dichos patrones, lo cual era sin duda sensato. Desde la infancia, la mayoría de las personas clasifican las cosas de acuerdo con el aspecto y la forma sin que nadie se lo haya dicho. No obstante, este enfoque tiene sus limitaciones. Como muchos de aquellos objetos confusos abarcaban un espacio de aproximadamente el mismo tamaño que el cielo nocturno, los Herschel siempre dieron por supuesto que todas las nebulosas se hallaban más o menos a la misma distancia de la Tierra. Para ellos, someter todas las nebulosas a las mismas normas de clasificación era simplemente hacer ciencia buena, ecuánime.

El problema es que la suposición de que todas las nebulosas estaban a una distancia similar era un grave error. La naturaleza puede ser escurridiza, incluso artera. Algunas de las nebulosas clasificadas por los Herschel no están más lejos que las estrellas, por lo que son relativamente pequeñas (si un billón de kilómetros puede corresponder a algo «relativamente pequeño»). Otras están mucho más alejadas, por lo que, si en el cielo aparecen con el mismo tamaño, deben de ser mucho mayores que los objetos difusos relativamente próximos a nosotros.



La lección más importante de todo esto es que en algún momento hemos de dejar de obsesionarnos con el aspecto de algo y comenzar a preguntarnos qué es. Por suerte, a finales del siglo XIX, ciertos avances científicos y tecnológicos permitieron a los astrónomos hacer precisamente esto, ir más allá de clasificar simplemente el contenido del universo. Dicho cambio dio origen al nacimiento de la astrofísica, que sería la aplicación de las leyes de la física a situaciones astronómicas.

\* \* \* \*

En la misma época en que *sir* John Herschel publicó su inmenso catálogo de nebulosas, se sumó a la búsqueda un nuevo instrumento científico, el espectroscopio, cuya única misión era descomponer la luz en un arco iris de sus colores integrantes. Esos colores, y los rasgos incrustados en los mismos, revelan no sólo detalles sutiles de la composición química de la fuente de luz, sino también, debido a un fenómeno denominado «efecto Doppler», el movimiento de la fuente de luz hacia o desde la Tierra.

La espectroscopia reveló algo notable: las nebulosas espirales, que predominan fuera de la franja de la Vía Láctea, están casi todas alejándose de la Tierra, y a velocidades altísimas. En cambio, todas las nebulosas planetarias, así como casi todas las irregulares, están desplazándose a velocidades relativamente bajas —unas se nos acercan y otras se alejan—. ¿Había tenido lugar en el centro de la Vía Láctea alguna explosión catastrófica que había expulsado sólo a las nebulosas espirales? En tal caso, ¿por qué ninguna de ellas se quedaba atrás? ¿Íbamos a atrapar la catástrofe en un momento

determinado? Pese a ciertos avances fotográficos que consiguieron emulsiones más rápidas, lo cual permitía a los astrónomos medir los espectros de nebulosas cada vez menos iluminadas, el éxodo continuó y las preguntas siguieron sin respuesta.

La mayoría de los progresos en astronomía, como en las demás ciencias, se han visto impulsados por la introducción de tecnologías nuevas. Al iniciarse la década de 1920, apareció en escena otro instrumento clave: el formidable Telescopio Hooker de 250 centímetros del Observatorio del Monte Wilson, cerca de Pasadena, California. En 1923, el astrónomo norteamericano Edwin P. Hubble utilizó este telescopio —el más grande del mundo en esa época— para observar una variedad especial de estrella, una cefeida variable, en la nebulosa de Andrómeda. La luminosidad de las estrellas variables de cualquier tipo varía conforme a patrones bien conocidos; las cefeidas variables, llamadas así por el prototipo de la categoría, de la constelación de Cefeo, son sumamente luminosas y por tanto visibles a distancias enormes. Como la luminosidad varía en ciclos reconocibles, el observador paciente y persistente detectará cada vez más. Hubble descubrió en la Vía Láctea unas cuantas de estas cefeidas variables y calculó aproximadamente sus distancias; sin embargo, para su asombro, la cefeida que observó en Andrómeda estaba mucho menos iluminada que cualquiera de las otras.

La explicación más probable de esa poca luz era que la nueva cefeida variable, y la nebulosa de Andrómeda donde vive, se sitúan a una distancia muy superior a las de las cefeidas de la Vía Láctea. Hubble reparó en que eso situaba a la nebulosa de Andrómeda a tal distancia

que no podía estar de ningún modo entre las estrellas de la constelación de Andrómeda ni en ningún otro sitio de la Vía Láctea —y no habría podido ser expulsada, junto con todas sus hermanas espirales, durante un vertido de leche catastrófico.

Las consecuencias fueron impresionantes. El descubrimiento de Hubble puso de manifiesto que las nebulosas espirales son sistemas estelares enteros por derecho propio, enormes y repletos de estrellas como nuestra Vía Láctea. Usando la expresión del filósofo Immanuel Kant, Hubble había demostrado que fuera de nuestro sistema estelar debe de haber docenas de «universos isla», pues el objeto de Andrómeda simplemente encabezaba la lista de nebulosas espirales conocidas. En realidad, la nebulosa de Andrómeda era la *galaxia* de Andrómeda.

\* \* \* \*

En 1936, se habían identificado y fotografiado tantos universos isla con el Hooker y otros telescopios grandes que Hubble decidió probar también con la morfología. Sus análisis de tipos de galaxias se basaban en la suposición no verificada de que ciertas variaciones de una forma a otra entre galaxias suponen pasos evolutivos desde el nacimiento a la muerte. En su libro de 1936, *Real of the Nebulae*, Hubble clasificó las galaxias situando las distintas clases a lo largo de un diagrama con forma de diapasón musical, cuyo mango representa las galaxias elípticas, con elipses redondeadas en el extremo más alejado y elipses aplanadas en el punto en que se unen los dos dientes. A lo largo de un diente están las galaxias espirales corrientes: las más próximas al mango tienen sus brazos espirales

muy enrollados, mientras que las del extremo del diente tienen los brazos espirales cada vez menos enrollados. A lo largo del otro diente hay galaxias espirales cuya región central muestra una «barra» recta, pero por lo demás son semejantes a las espirales corrientes.

Hubble imaginó que las galaxias inician su existencia como elipses redondas y se vuelven cada vez más planas mientras siguen tomando forma, de tal modo que, en última instancia, se revela una estructura espiral que va desplegándose poco a poco con el paso del tiempo. Genial. Magnífico. Incluso elegante. Pero totalmente falso. En este esquema no sólo se omitían categorías enteras de galaxias irregulares, sino que más adelante los astrofísicos se enterarían de que las estrellas más viejas de cada galaxia tenían aproximadamente la misma edad, lo que daba a entender que todas las galaxias nacieron durante una era concreta de la historia del universo.

Durante tres décadas (con algunas oportunidades de investigación perdidas a causa de la Segunda Guerra Mundial), los astrónomos observaron y catalogaron galaxias —conforme al diagrama de diapasón de Hubble— como elípticas, espirales y espirales barradas, con algunas irregulares que se agruparon en un subconjunto pequeño, completamente fuera del gráfico debido a la rareza de las formas. De las galaxias elípticas cabría decir, como dijo Ronald Reagan de las secuoyas de California, que «vista una, vistas todas». Las galaxias elípticas se parecen entre sí en que no exhiben los patrones de brazos en espiral que caracterizan a las espirales y las espirales barradas ni las nubes gigantes de polvo y gas interestelar que dan origen a estrellas nuevas. En estas galaxias, la formación de

estrellas finalizó hace muchos miles de millones de años, tras dejar atrás grupos esféricos o elipsoidales de estrellas. Cada una de las galaxias elípticas mayores, como las espirales más grandes, contiene muchos centenares de miles de millones de estrellas —quizás incluso un billón o más— y tiene un diámetro próximo a cien mil años luz. A excepción de los astrónomos profesionales, nadie ha suspirado jamás ante los fantásticos patrones y las complejas historias de formación estelar de una galaxia elíptica por la excelente razón de que, al menos en comparación con las espirales, las elípticas presentan formas simples y una formación de estrellas sencilla: todas transformaron gas y polvo en estrellas hasta que ya no pudieron hacerlo más.

Por suerte, las espirales y las espirales barradas proporcionan una fascinación visual casi inexistente en el caso de las elípticas. La más impactante de todas las imágenes galácticas que podemos llegar a ver, toda la Vía Láctea contemplada desde fuera, nos conmueve el corazón y la mente tan pronto como nos las ingeniamos para enviar una cámara varios cientos de miles de años luz por encima o por debajo del plano central de nuestra galaxia. En la actualidad, cuando nuestras sondas espaciales más remotas han viajado una mil millonésima parte de esta distancia, el objetivo parece inalcanzable, y, de hecho, una sonda que pudiera llegar casi a la velocidad de la luz debería esperar mucho tiempo —un tiempo muy superior al actual período de historia registrada— para obtener el resultado deseado. Por el momento, los astrónomos deberán seguir cartografiando la Vía Láctea desde dentro, y esbozar el bosque galáctico delineando sus árboles estelares y nebulares. Estos esfuerzos revelan que nuestra

galaxia se parece muchísimo a nuestro vecino grande más cercano, la gran galaxia espiral de Andrómeda. Convenientemente situada a unos 2,4 millones de años luz, la galaxia de Andrómeda ha brindado un caudal de información enorme sobre los patrones estructurales básicos de las galaxias espirales, así como sobre los diferentes tipos de estrellas y su evolución. Como todas las estrellas de la galaxia de Andrómeda están a la misma distancia de nosotros (más/menos un porcentaje pequeño), los astrónomos saben que el brillo de las estrellas guarda correlación directa con su luminosidad, es decir, con la cantidad de energía que emiten por segundo. Este hecho, inasequible al estudiar objetos de la Vía Láctea, pero aplicable a todas las galaxias situadas más allá de la nuestra, ha permitido a los astrónomos extraer conclusiones clave sobre la evolución estelar con más facilidad que si se tratara de estrellas de la Vía Láctea. Dos galaxias satélite elípticas que describen órbitas alrededor de la galaxia de Andrómeda, cada una con una pequeña proporción del número de estrellas de la galaxia principal, han suministrado asimismo información importante sobre la vida de las estrellas y la estructura galáctica global de las galaxias elípticas. En una noche despejada lejos de las luces de la ciudad, un observador experto que sepa dónde mirar puede localizar el borroso perfil de la galaxia de Andrómeda —el objeto más lejano visible al ojo desnudo—, brillando con la luz que dejó en su viaje mientras nuestros antepasados vagaban por las gargantas de África en busca de raíces y bayas. Como pasa con la Vía Láctea, la galaxia de Andrómeda se ubica a medio camino de un diente del diagrama de diapasón de Hubble, pues

sus brazos en espiral no están especialmente apretados ni sueltos. Si las galaxias fueran animales de un zoo, habría una jaula dedicada a las elípticas, pero varias casetas para las espléndidas espirales. Estudiar una imagen del Telescopio Hubble de una de esas bestias, por lo general (en el caso de las más cercanas) vista desde diez o veinte millones de años luz, es entrar en un mundo visual tan rico en posibilidades, tan profundo respecto a la separación de la vida en la Tierra, tan complejo en cuanto a la estructura, que la mente no preparada acaso se tambalee o se ponga a la defensiva recordando a su dueño que nada de eso puede adelgazar los muslos o curar un hueso roto.

Las irregulares, las huérfanas del sistema galáctico, comprenden aproximadamente el 10% de todas las galaxias, con el resto dividido entre espirales y elípticas (las espirales son mucho más numerosas). En contraste con las elípticas, las galaxias irregulares contienen por lo general una proporción de gas y polvo superior a la de las espirales, y ofrecen los lugares más animados de formación de estrellas en curso. La Vía Láctea tiene dos grandes galaxias satélite, ambas irregulares, llamadas de manera confusa «Nubes de Magallanes» porque los primeros hombres blancos que las vieron, marineros de la circunnavegación de la Tierra que hizo Magallanes en 1520, al principio creyeron estar contemplando jirones de nubes en el cielo. Ese honor fue para la expedición de Magallanes, porque las citadas nubes están tan cerca del polo sur celeste (el punto situado directamente encima del polo sur de la Tierra) que nunca se elevan por encima del horizonte para los observadores de las más pobladas

latitudes del norte, entre ellas las de Europa y la mayor parte de los Estados Unidos. Cada una de las Nubes de Magallanes contiene miles de millones de estrellas, aunque no los centenares de miles de millones que caracterizan la Vía Láctea y otras galaxias grandes, y exhibe inmensas regiones de formación de estrellas, en particular la «nebulosa de la Tarántula» de la Nube Grande de Magallanes. Esta galaxia tiene también el honor de haber dejado ver la supernova más cercana y luminosa aparecida en los tres últimos siglos, Supernova 1987A, que, para que su luz llegara a la Tierra en 1987, tendría que haber explotado hacia 160.000 a. C.

Hasta la década de 1960, los astrónomos se conformaban con clasificar casi todas las galaxias como espirales, espirales barradas, elípticas o irregulares. Tenían la razón de su parte, pues más del 99% de las galaxias encajan en alguna de estas categorías. (Con una clase de galaxias denominada «irregular», el resultado parece de una certeza absoluta). Sin embargo, durante esa década prodigiosa, un astrónomo norteamericano llamado Halton Arp llegó a ser el campeón de las galaxias que no encajaban en el esquema clasificatorio simple del diagrama de diapasón de Hubble, irregulares incluidas. Inspirándose en el «dadme vuestras cansadas, pobres y apiñadas masas»,<sup>3</sup> Arp utilizó el mayor telescopio del mundo, el Telescopio Hale de 450 centímetros del Observatorio Palomar, cerca de San Diego, California, para fotografiar trescientos treinta y ocho sistemas de aspecto desordenado. El *Atlas of Peculiar Galaxies*, de Arp, publicado

---

<sup>3</sup> Hace referencia a un poema de Emma Lazarus titulado «El Nuevo Coloso», muy conocido en Estados Unidos.



en 1966, llegó a ser un auténtico tesoro de oportunidades de investigación sobre lo que puede salir mal en el universo. Aunque las «galaxias peculiares» —definidas como galaxias con formas tan raras a las que ni siquiera el concepto «irregular» les hace justicia— constituyen sólo una exigua minoría de todas las galaxias, lo cierto es que transportan información importante sobre por qué puede pasarles algo malo. Resulta, por ejemplo, que muchas galaxias embarzosamente peculiares del atlas de Arp son los restos fusionados de dos galaxias antaño separadas que han chocado. Lo cual significa que esas galaxias «peculiares» no son ni mucho menos tipos diferentes de galaxias, como tampoco un Lexus hecho polvo es un nuevo tipo de coche.

\* \* \* \*

Para seguir la pista del despliegue de una colisión, necesitamos mucho más que lápiz y papel, pues cada estrella de ambos sistemas galácticos tiene su propia gravedad, que afecta al mismo tiempo a las demás estrellas de los dos sistemas. Resumiendo, lo que nos hace falta es un ordenador. Los choques de galaxias son dramas majestuosos, que tardan cientos de millones de años desde el principio hasta el final. Mediante una simulación por ordenador, podemos iniciar y detener a voluntad la colisión de dos galaxias, amén de tomar instantáneas tras diez, cincuenta o cien millones de años. Las cosas parecen distintas a cada momento. Y cuando acudimos al atlas de Arp — *voilà!* —, hay una fase temprana de una colisión y una fase tardía. Un golpe de refilón y un choque frontal.

Aunque las primeras simulaciones por ordenador se llevaron a cabo a principios de la década de 1960 (y aunque, en la década de 1940, el astrónomo sueco Erik Holmberg hizo un ingenioso intento de recrear un choque de galaxias en el tablero de una mesa usando la luz como equivalente de la gravedad), no fue hasta 1972 cuando Alar y Juri Toomre, hermanos que daban clase en el MIT, generaron el primer retrato convincente de una colisión «deliberadamente simple» entre dos galaxias espirales. El modelo de los Toomre ponía de manifiesto que las fuerzas de marea —diferencias de gravedad de un lugar a otro— destruyen realmente las galaxias. Cuando una galaxia se acerca a otra, la fuerza gravitatoria aumenta enseguida en los bordes principales del choque, extendiendo y combando ambas galaxias cuando se cruzan o cuando una pasa junto a la otra. Este episodio de extensión y pando da cuenta de casi todo lo peculiar en el atlas de galaxias peculiares de Arp.

¿De qué otro modo pueden, las simulaciones por ordenador, ayudarnos a entender las galaxias? El diapasón de Hubble distingue entre galaxias espirales «normales» y espirales con una barra densa de estrellas en su centro. Las simulaciones ponen de manifiesto que esta barra podría ser un rasgo transitorio, no la marca distintiva de una especie galáctica diferente. Los observadores contemporáneos de espirales barradas quizás están simplemente captando estas galaxias durante una fase que desaparecerá dentro de unos cien millones de años. No obstante, como no podemos andar por ahí el suficiente tiempo para ver desaparecer la barra en la vida real, hemos de verla

llegar y marcharse en un ordenador, donde pueden desplegarse mil millones de años en cuestión de minutos.

\* \* \* \*

Las galaxias peculiares de Arp resultaron ser la punta del iceberg, un mundo extraño de no-exactamente galaxias cuyos contornos empezaron a distinguir los astrónomos en la década de 1960 y a entender unas décadas después. Antes de poder evaluar este emergente zoo galáctico, hemos de reanudar la historia de la evolución cósmica donde la dejamos. Debemos examinar el origen de todas las galaxias —normales, normales tempranas, irregulares, peculiares y exóticas alucinantes— para ver cómo nacieron y cómo la suerte en el sorteo nos ha dejado en nuestra ubicación relativamente tranquila del espacio, a la deriva en la periferia de una galaxia espiral gigante, a unos 30.000 años luz de su centro y a 20.000 años luz de su difuso borde exterior. Gracias al orden general de las cosas en una galaxia espiral —que se impuso primero en las nubes de gas que más adelante dieron origen a las estrellas—, nuestro Sol se mueve siguiendo una órbita casi circular alrededor del centro de la Vía Láctea, de modo que tarda doscientos cuarenta millones de años (lo que a veces recibe el nombre de «año cósmico») en cada viaje. En la actualidad, veinte órbitas después de su nacimiento, el Sol debería valer para otras aproximadamente veinte órbitas antes de jubilarse. Entretanto, echemos un vistazo al lugar de donde vinieron las galaxias.

## Capítulo 8

### El origen de la estructura

Cuando estudiamos la historia de la materia del universo, remontándonos lo mejor que podemos a catorce mil millones de años, enseguida nos encontramos con una tendencia que pide a gritos una explicación. En el conjunto del cosmos, la materia se ha organizado sistemáticamente en estructuras. Desde su distribución casi homogénea poco después del Big Bang, la materia se ha aglutinado en todas las escalas de magnitud para producir gigantescos cúmulos y supercúmulos de galaxias, amén de galaxias individuales dentro de esos cúmulos, estrellas que se congregan por miles de millones en cada galaxia, y muy posiblemente objetos mucho más pequeños — planetas, sus satélites, asteroides y cometas— que giran alrededor de muchas, si no la mayoría, de esas estrellas.

Para entender el origen de los objetos que ahora componen el universo visible, debemos centrarnos en los mecanismos que convirtieron la materia antes difusa del universo en componentes muy estructurados. Una descripción completa de cómo surgieron las estructuras en el cosmos exige que fusionemos dos aspectos de la realidad cuya combinación actualmente nos es esquiva. Como hemos expuesto en capítulos anteriores, debemos considerar el modo en que la mecánica cuántica —que describe el comportamiento de las moléculas, los átomos y sus partículas integrantes— encaja en la teoría de la relatividad general —que describe cómo cantidades elevadísimas de materia y espacio se afectan mutuamente.

Los intentos de crear una sola teoría que uniese nuestros conocimientos sobre lo subatómicamente pequeño y lo astronómicamente grande empezaron con Einstein. Y han proseguido, con relativamente poco éxito, en la actualidad, y perdurarán en un futuro incierto hasta lograr la «gran unificación». Entre todas las cosas desconocidas que fastidian a los cosmólogos modernos, lo que más notan es la falta de una teoría que combine como es debido la mecánica cuántica con la relatividad general. Entretanto, estas ramas aparentemente inmiscibles de la física —la ciencia de lo pequeño y la ciencia de lo grande— pasan de nuestra ignorancia y coexisten con notable éxito en el universo, burlándose de nuestros intentos de captarlas como un todo coherente. Por lo visto, una galaxia con cien mil millones de estrellas no presta particular atención a la física de los átomos y las moléculas de los que se componen sus sistemas de estrellas y nubes de gases. Como tampoco lo hacen los aglomerados aún mayores de materia conocidos como cúmulos y supercúmulos de galaxias, con centenares, a veces miles, de galaxias en su interior. Sin embargo, estas inmensas estructuras del universo deben su existencia a fluctuaciones cuánticas infinitamente pequeñas producidas en el cosmos primigenio. Para comprender cómo surgieron estas estructuras, hemos de hacer todo lo que podamos en nuestro actual estado de ignorancia; esto es, pasar de los ámbitos minúsculos regidos por la mecánica cuántica —que tienen la clave del origen del universo— a aquellos tan grandes que la mecánica cuántica no desempeña en ellos

ningún papel y en los que la materia obedece a leyes establecidas por la relatividad general.

A tal fin, hemos de intentar explicar el universo cargado de estructuras que hoy vemos surgido de un cosmos casi sin rasgos distintivos tras el Big Bang. Cualquier tentativa de explicar el origen de la estructura debe también dar cuenta del cosmos en su estado actual. Pero incluso esta modesta tarea ha desconcertado a astrónomos y cosmólogos con una serie de salidas nulas y errores, que hemos acabado dejando atrás (o al menos eso esperamos con fervor) para situarnos bajo la brillante luz de una descripción correcta del universo.

Durante casi toda la historia de la cosmología moderna, los astrofísicos han dado por supuesto que la distribución de la materia en el universo se puede describir como homogénea a la vez que isotrópica. En un universo homogéneo, cada emplazamiento parece semejante a cualquier otro, como el contenido de un vaso de leche homogeneizada. Un universo isotrópico parece igual en todas direcciones desde cualquier punto dado del espacio y el tiempo. Estas dos descripciones quizá parezcan iguales, pero no lo son. Por ejemplo, las líneas de longitud en la Tierra no son homogéneas, pues están más separadas en unas regiones y más juntas en otras: son isotrópicas sólo en dos sitios, los polos norte y sur, donde convergen todas las líneas de longitud. Si nos encontramos en la «parte superior» o la «parte inferior» del mundo, la cuadrícula de longitudes nos parecerá igual, con independencia de lo mucho que giremos la cabeza a derecha o a izquierda. En un ejemplo más físico, situémonos

mentalmente en lo alto de una montaña perfecta, de forma cónica, e imaginemos que esta montaña es la única cosa que hay en el mundo. Desde esta posición, todas las imágenes de la superficie de la Tierra parecerán iguales. Pasaría lo mismo si viviéramos en el centro de una diana de tiro con arco, o si fuéramos una araña en el centro de su tela perfectamente tejida. En cada uno de estos casos, nuestra visión sería isotrópica, pero desde luego homogénea no.

Tenemos un ejemplo de patrón homogéneo, pero no isotrópico, en una pared de ladrillos rectangulares idénticos, colocados por un albañil según el método tradicional, superpuestos en parte unos sobre otros. En la escala de varios ladrillos adyacentes y su mortero, la pared será igual en todos sitios —ladrillos—, si bien diferentes líneas de visión a lo largo de la misma cruzarán el mortero de forma distinta, lo que echará por tierra cualquier reivindicación de isotropía. Curiosamente (para aquellos a los que les gustan las curiosidades), el análisis matemático nos dice que el espacio resultará homogéneo sólo si es isotrópico en todos lados. Según otro teorema formal de las matemáticas, si el espacio es isotrópico en sólo tres lugares, entonces debe ser isotrópico en todas partes. Y ¡algunos rechazamos las matemáticas por poco interesantes e improductivas!

Aunque los cosmólogos estaban estéticamente motivados para suponer la homogeneidad y la isotropía en el espacio, han acabado creyendo en esta suposición lo suficiente para establecerla como principio cosmológico fundamental. También podemos denominar esto «principio de mediocridad»: ¿por qué una parte del universo debe ser más interesante que otra? En las escalas más pequeñas del

tamaño y la distancia, comprobamos fácilmente la falsedad de esta afirmación. Vivimos en un planeta sólido con una densidad promedio de la materia cercana a los 5,5 gramos por centímetro cúbico. Nuestro Sol, una estrella típica, tiene una densidad promedio de aproximadamente 1,4 gramos por centímetro cúbico. No obstante, los espacios interplanetarios entre ambos tienen una densidad media bastante inferior —en un factor de unos mil millones de billones—. El espacio intergaláctico, que constituye la mayor parte del volumen del universo, contiene menos de un átomo en cada 10 metros cúbicos. Aquí la densidad promedio disminuye por debajo de la densidad del espacio interplanetario en otro factor de mil millones —lo suficiente para que nos sintamos bien ante la ocasional acusación de estar espesos.

A medida que los astrofísicos ampliaban sus horizontes, fueron viendo con claridad que una galaxia como la Vía Láctea consta de estrellas que flotan en un espacio interestelar casi vacío. Las galaxias se agrupan asimismo en cúmulos que contradicen el supuesto de homogeneidad e isotropía. Se mantenía la esperanza, sin embargo, de que cuando los astrofísicos representasen gráficamente materia visible en las escalas mayores, observaran que los cúmulos de galaxias exhibían una distribución homogénea e isotrópica. Para que exista homogeneidad e isotropía en una región concreta del espacio, esta ha de ser lo bastante grande para que no haya estructuras (o falta de estructuras) que formen parte de la misma de manera exclusiva. Si de esta región tomamos una muestra de bolas de melón, los requisitos de homogeneidad e isotropía dan a entender que las



propiedades globales de la región han de ser similares, en todos los aspectos, a las propiedades corrientes de cualquier cucharada de la misma magnitud. Vaya chasco si la mitad izquierda del universo tuviera un aspecto diferente del de la derecha.

Para encontrar un universo homogéneo e isotrópico, ¿cómo ha de ser de grande la región que examinemos? El planeta Tierra tiene un diámetro de 0,04 segundos luz. La órbita de Neptuno abarca 8 horas luz. Las estrellas de la galaxia de la Vía Láctea delinean un disco amplio y plano de unos 100 000 años luz de un lado a otro. Y el supercúmulo galáctico de Virgo, al que pertenece la Vía Láctea, se extiende hasta sesenta millones de años luz. Así, el codiciado volumen que puede darnos homogeneidad e isotropía ha de ser mayor que el supercúmulo de Virgo. Cuando los astrofísicos hacían estudios sobre la distribución de las galaxias en el espacio, descubrieron que incluso en esas escalas de tamaño, de hasta cien millones de años luz, el cosmos deja ver brechas enormes relativamente vacías, delimitadas por galaxias organizadas en láminas y filamentos que se cruzan. Lejos de parecer un hormiguero homogéneo y rebosante, la distribución de las galaxias en esta escala recuerda a una esponja vegetal.

Sin embargo, al final, los astrofísicos confeccionaron mapas aún mayores y encontraron las tan preciadas homogeneidad e isotropía. Resulta que el contenido de una cucharada de trescientos millones de años luz se parece efectivamente a otras del mismo tamaño, lo que satisface el largamente buscado criterio estético para el cosmos. Pero, como es lógico, en las escalas más pequeñas todo se ha aglutinado

en distribuciones de materia claramente homogéneas y no isotrópicas. Hace tres siglos, Isaac Newton se planteó la cuestión de cómo la materia adquiriría estructura. Su creativa mente adoptó con facilidad el concepto de universo isotrópico y homogéneo, pero de inmediato llamó la atención sobre un problema que no se nos habría ocurrido a casi nadie: ¿cómo podemos llegar a construir cualquier estructura en el universo sin que toda la materia del mismo se una para crear una masa gigantesca? Según Newton, como no observamos una masa así, el universo ha de ser infinito. En 1692, en una carta a Richard Bentley, director del Trinity College de la Universidad de Cambridge, sugería que

*si toda la materia del universo estuviera repartida uniformemente a través del firmamento, y cada partícula sufriera una gravedad innata hacia todas las demás, y si el espacio a través del cual está dispersa toda esa materia fuese finito, la materia situada en las regiones exteriores del espacio tendería, por su propia gravedad, a caer hacia la materia del interior, y en consecuencia acabaría en el centro del universo y formaría allí una enorme masa esférica. Pero si la materia estuviese dispuesta uniformemente en un espacio infinito, nunca podría converger hasta formar una sola masa; en cambio, parte de ella formaría una masa y parte de ella formaría otra, de modo que se crearían un número infinito de grandes masas, esparcidas a distancias enormes unas de otras a través de todo el espacio infinito.*

Newton suponía que su universo infinito debía de ser estático, esto es, que no se expandía ni se contraía. En el seno de ese universo, las fuerzas gravitatorias —la atracción que cada objeto con masa ejerce en los demás— «convocaban» a los objetos. Su conclusión sobre el papel fundamental de la gravedad en la creación de estructuras sigue siendo válido en la actualidad, aunque los cosmólogos afrontan una tarea de proporciones mucho mayores que la de Newton. Lejos de disfrutar de las ventajas de un universo estático, hemos de tener en cuenta el hecho de que el universo ha estado expandiéndose desde el Big Bang, y oponiéndose a cualquier tendencia de la materia a agruparse debido a la gravedad. El problema de superar la tendencia «anti-convocante» de la expansión cósmica se torna más serio cuando consideramos que el cosmos se expandió con la máxima rapidez poco después del Big Bang, época en que comenzaron a formarse las estructuras. A primera vista, no podríamos confiar más en la gravedad para formar objetos masivos partiendo de gas difuso de lo que podríamos confiar en usar una pala para mover pulgas de un lado a otro de un corral. Con todo, de alguna manera la gravedad ha funcionado.

En los primeros días del universo, el cosmos se expandió tan deprisa que, si el universo hubiera sido estrictamente homogéneo e isotrópico en todas las escalas de magnitud, la gravedad no habría tenido ninguna oportunidad de victoria. Hoy no habría galaxias, estrellas, planetas ni personas, sino sólo una distribución dispersa de átomos por todas las zonas del espacio —un cosmos gris y aburrido, desprovisto de admiradores y objetos de admiración—. Sin embargo,

el nuestro es un universo divertido y emocionante sólo porque aparecieron heterogeneidades y anisotropías durante esos momentos cósmicos más tempranos, que funcionaron como una especie de plato de sopa cósmico inicial para todas las concentraciones de materia y energía que surgirían más adelante. Sin esta ventaja, el universo en rápida expansión habría impedido que la gravedad reuniese materia para construir las familiares estructuras del mismo que hoy damos por sentadas.

¿Qué provocó estas desviaciones, las heterogeneidades y las anisotropías que procuran las semillas de todas las estructuras del cosmos? La respuesta nos llega del campo de la mecánica cuántica, inimaginable para Newton, pero inevitable si queremos entender de dónde venimos. La mecánica cuántica afirma que, en las escalas de tamaño menores, ninguna distribución de materia puede permanecer homogénea e isotrópica. Al contrario, a medida que la materia se convierte en una masa temblorosa de partículas que desaparecen y renacen, aparecen, desaparecen y reaparecen fluctuaciones aleatorias de distinta magnitud en la distribución de la misma. En un momento dado, ciertas regiones del espacio tendrán algunas partículas más, y por tanto una densidad algo mayor, que otras regiones. Partiendo de esta fantasía contra-intuitiva, poco realista, derivamos todo lo que existe. Las regiones ligeramente más densas tuvieron la oportunidad de atraer algunas partículas más gracias a la gravedad, y con el tiempo el cosmos convirtió esas regiones más densas en estructuras.

Al localizar el crecimiento de estructuras desde las épocas inmediatamente posteriores al Big Bang, podemos obtener percepciones de dos períodos clave de los que ya hemos hablado, la era de la inflación, cuando el universo se expandió a un ritmo pasmoso, y la era del desacoplamiento, unos trescientos ochenta mil años después del Big Bang, cuando la radiación cósmica de fondo dejó de interactuar con la materia.

La era inflacionaria duró desde  $10^{-37}$  a  $10^{-33}$  segundos tras el Big Bang. Durante ese período relativamente breve, el tejido del espacio y el tiempo se expandió más deprisa que la luz, aumentando, en una mil millonésima de billonésima de billonésima de segundo desde un tamaño cien mil millones de mil millones de veces menor que el de un protón hasta unos 10 centímetros. Sí, en otro tiempo el universo observable cabía en un pomelo. Pero ¿a qué se debió la inflación cósmica? Los cosmólogos han puesto nombre al culpable: una «fase de transición» que dejó a su paso una firma específica y observable en la radiación cósmica de fondo.

Las transiciones de fase no son exclusivas ni mucho menos de la cosmología; suelen producirse también en la intimidad de nuestra casa. Congelamos agua para obtener cubitos de hielo, o la hervimos para producir vapor. El agua azucarada hace crecer cristales de azúcar en un cordel colgando dentro de un líquido. Y la pegajosa masa se convierte en pastel al hornearla. Aquí se aprecia un patrón. En todos los casos, las cosas parecen muy distintas en cada lado de una transición de fase. Según el modelo inflacionario, cuando el universo era joven, el campo energético predominante atravesó una

transición de fase, una de las varias que se produjeron en aquella época. Ese episodio concreto no sólo catapultó la expansión temprana y rápida, sino que también impregnó el cosmos de un patrón específico fluctuante de regiones de densidad alta y baja. A continuación, esas fluctuaciones se congelaron en el tejido en expansión del espacio, lo que creó una especie de anteproyecto a partir del cual se formarían en última instancia las galaxias. Así pues, inspirándonos en Pooh-Bah, el personaje del *Mikado*, de Gilbert y Sullivan, que rastreó orgulloso su linaje hasta un «glóbulo atómico primordial», podemos asignar nuestros orígenes, y los inicios de todas las estructuras, a las fluctuaciones en una escala subnuclear que se produjeron durante la era inflacionaria.

¿Qué hecho podemos citar para respaldar esta atrevida afirmación? Como los astrofísicos no tienen modo de ver la fracción 0,000000000000 000000000000000000000000000001 del primer segundo del universo, se deciden por la siguiente mejor opción: usar la lógica científica para conectar esa época temprana con los momentos que pueden observar. Si la teoría inflacionaria es correcta, las fluctuaciones iniciales producidas durante esa era, inevitable resultado de la mecánica cuántica —según la cual pequeñas variaciones de un lugar a otro siempre surgirán en un líquido por lo demás homogéneo e isotrópico—, habrían tenido la oportunidad de volverse regiones de concentraciones altas y bajas de materia y energía. Cabe esperar que encontremos pruebas de dichas variaciones de un sitio a otro en la radiación cósmica de fondo, la cual

funciona como proscenio que separa la época actual de los primeros momentos del universo neonato y lo conecta con ellos.

Como ya hemos visto, la radiación cósmica de fondo consiste en los fotones generados durante los primeros minutos posteriores al Big Bang. Al principio de la historia del universo, estos fotones interaccionaban con la materia, chocando con tanta energía contra cualquier átomo que se formase que no podía existir ningún átomo por mucho tiempo. Sin embargo, la expansión en curso del universo robaba realmente los fotones de energía, por lo que a la larga, en el momento del desacoplamiento, ninguno de los fotones tuvo la energía suficiente para evitar que los electrones describiesen órbitas alrededor de protones y núcleos de helio. Desde esa época, trescientos ochenta mil años después del Big Bang, los átomos han persistido — a menos que los haya afectado alguna alteración local, como la radiación de una estrella próxima— mientras los fotones, cada uno con una cantidad cada vez menor de energía, siguen vagando por el universo, constituyendo en conjunto la radiación cósmica de fondo, o CBR.

Así pues, la CBR lleva consigo la marca de la historia, una instantánea de lo que era el universo en el momento del desacoplamiento. Los astrofísicos han aprendido a examinar esta instantánea con una precisión creciente. Primero está el simple hecho de que la CBR exista, de que su conocimiento básico de la historia del universo es correcto. Luego, tras años de mejorar sus capacidades para medir la radiación cósmica de fondo, los sofisticados instrumentos del globo y los satélites les proporcionaron un mapa de

las diminutas desviaciones de la CBR respecto de la homogeneidad. Este mapa ofrece el registro de las antaño minúsculas fluctuaciones cuya magnitud aumentó mientras el universo se expandía durante los primeros cientos de miles de años posteriores a la era de la inflación, y en el que luego, durante los siguientes mil millones de años o así, se produciría la distribución de materia a gran escala.

Por extraordinario que parezca, la CBR nos brinda los medios para cartografiar la huella del universo temprano desaparecido tiempo ha, y para localizar —hace catorce mil millones de años luz en todas direcciones— las regiones de densidad algo mayor que se transformarían en cúmulos y supercúmulos de galaxias. Las regiones con densidad superior a la media dejaron atrás algunos protones más que las regiones con densidades inferiores. A medida que el cosmos fue volviéndose transparente, gracias a la pérdida de energía que dejó a los fotones incapaces de interactuar con los átomos recién formados, cada fotón emprendió un viaje que lo llevaría lejos de su punto de origen. Los fotones de nuestras inmediaciones han viajado catorce mil millones de años luz en todas direcciones, lo que ha generado parte de la CBR que civilizaciones remotas en el extremo del universo visible quizás estén examinando incluso ahora, de modo que «sus» fotones, tras alcanzar nuestros instrumentos, nos revelan cómo eran las cosas hace tiempo y muy lejos, en la época en que las estructuras apenas habían comenzado a formarse.

Tras la primera detección de la radiación cósmica de fondo, en 1965, los astrofísicos estuvieron buscando anisotropías en la CBR durante más de un cuarto de siglo. Desde una perspectiva teórica,



necesitaban encontrarlas con urgencia, pues sin la existencia de anisotropías de la CBR en el nivel de unas cuantas partes de cien mil, su modelo básico de cómo aparecieron las estructuras perdería toda pretensión de validez. Sin las semillas de la materia que delatan, no contaríamos con explicación alguna de por qué existimos. Quiso la suerte que las anisotropías aparecieran en el momento previsto. En cuanto los cosmólogos hubieron creado instrumentos capaces de detectar anisotropías en el nivel apropiado, las encontraron, primero gracias al satélite COBE en 1992, y después con instrumentos mucho más precisos instalados en globos y en el satélite WMAP descrito en el capítulo 3. Las ínfimas fluctuaciones de un lugar a otro en las cantidades de fotones de microondas que forman la CBR, definida ahora con admirable precisión por el WMAP, expresan el registro de fluctuaciones cósmicas trescientos ochenta mil años después del Big Bang. La fluctuación típica se sitúa a sólo unas cuantas cienmilésimas de grado por encima o por debajo de la temperatura media de la radiación cósmica de fondo, por lo que detectarlas es como descubrir manchas de aceite casi imperceptibles en un estanque de 1 kilómetro de ancho debido a las cuales la combinación de agua y aceite es un poquito más densa que la media. Por pequeñas que fueran estas anisotropías, bastaron para ponerlo todo en marcha. En el mapa del WMAP de la radiación cósmica de fondo, los puntos calientes más grandes nos dicen dónde la gravedad superaría las tendencias disipadoras del universo en expansión y reuniría materia suficiente para fabricar supercúmulos. En la actualidad, estas regiones han crecido hasta contener mil galaxias, cada una con cien

mil millones de estrellas. Si sumamos la materia oscura de un supercúmulo así, la masa total asciende al equivalente de  $10^{16}$  soles. A la inversa, los puntos fríos más grandes, sin ventaja de inicio respecto al universo en expansión, evolucionaron hasta llegar casi a carecer de estructuras masivas. Los astrofísicos denominan a estas regiones simplemente «vacíos», término que cobra sentido si tenemos en cuenta que están rodeados por algo que no es un vacío. Así pues, los filamentos y las láminas gigantes de las galaxias que podemos localizar en el cielo no sólo forman cúmulos en sus intersecciones, sino que también ubican muros y otras formas geométricas que moldean las regiones vacías del cosmos.

Como es lógico, las galaxias no aparecieron sin más, totalmente formadas, a partir de concentraciones de materia algo más densa que la media. Desde trescientos ochenta mil años tras el Big Bang hasta unos doscientos millones de años después, la materia siguió acumulándose, pero en el universo no brillaba nada, pues las primeras estrellas aún no habían nacido. Durante esta era cósmica oscura, el universo contuvo sólo lo que había fabricado durante sus primeros minutos: hidrógeno, helio y trazas de litio. Sin elementos más pesados —carbono, nitrógeno, oxígeno, sodio, calcio u otros—, el cosmos no contenía ninguno de los átomos o moléculas ahora comunes que pueden absorber luz cuando una estrella empieza a brillar. Actualmente, en presencia de estos átomos y moléculas, la luz procedente de una estrella recién formada ejerce en aquellos una presión que rechaza cantidades masivas de gas que, si no, caerían en la estrella. Esta expulsión limita la masa máxima de estrellas recién

nacidas a menos de cien veces la masa del Sol. Sin embargo, cuando se formaron las primeras estrellas, a falta de átomos y moléculas que absorbieran luz estelar, el gas que caía constaba casi exclusivamente de hidrógeno y helio, lo que proporcionaba sólo una resistencia simbólica al *output* de las estrellas. Ello permitía a estas estrellas formarse con masas mucho mayores (centenares, quizás incluso miles, de veces la masa del Sol).

Las estrellas de masa elevada viven la vida en el carril rápido, y las más masivas en el más rápido de todos. Transforman su materia en energía a ritmos asombrosos mientras fabrican elementos pesados, y finalmente sufren una muerte joven y explosiva. Sus expectativas de vida ascienden apenas a unos cuantos millones de años, unas mil veces menos que el Sol. En la actualidad, no esperamos encontrar viva ninguna de las estrellas más masivas de esa era, pues las más tempranas se apagaron hace tiempo, y hoy, habiendo elementos más pesados comunes en todo el universo, no pueden formarse de ningún modo las estrellas de masa máxima de antaño. De hecho, no se ha llegado a observar ninguna de las gigantes de masa elevada. De todas formas, les atribuimos la responsabilidad de haber introducido en el universo casi todos los elementos familiares que ahora damos por sentados, entre ellos el carbono, el oxígeno, el nitrógeno, el silicio y el hierro. Llamémosle enriquecimiento. O contaminación. El caso es que las semillas de la vida comenzaron con la primera generación — desaparecida hace tiempo— de estrellas de masa elevada.

\* \* \* \*

Durante los primeros mil millones de años posteriores al momento de desacoplamiento, el colapso de raíz gravitatoria procedió con desenfreno mientras la gravedad juntaba materia en casi todas las escalas. Uno de los resultados naturales de la gravedad en funcionamiento fue la formación de agujeros negros supermasivos, cada uno con una masa millones o miles de millones de veces la del Sol. Los agujeros negros con esta cantidad de masa tienen aproximadamente el tamaño de la órbita de Neptuno y causan estragos en su entorno incipiente. Las nubes de gas atraídas hacia estos agujeros negros quieren adquirir velocidad, pero no pueden al haber demasiadas cosas en medio, por lo cual rozan y chocan contra cualquier cosa que se les ponga delante, descendiendo en una vorágine. Justo antes de que estas nubes desaparezcan para siempre, las colisiones en su materia super calentada irradian cantidades colosales de energía, miles de millones de veces la luminosidad del Sol, todo dentro del volumen de un sistema solar. Salen a borbotones gigantescos chorros de materia y radiación, que extienden cientos de miles de años luz por encima y por debajo del gas en remolino, mientras que la energía perfora y escapa de la chimenea de todas las maneras posibles. Cuando cae una nube, y otra describe órbitas a la espera, la luminosidad del sistema fluctúa, y se vuelve más brillante o más oscuro en cuestión de horas, días o semanas. Si resulta que los chorros vienen directamente hacia nosotros, el sistema parecerá incluso más luminoso, y más variable en cuanto a su *output*, que los casos en los que los chorros apuntan a un lado. Vistos desde cualquier distancia apreciable, todas estas combinaciones de

agujeros negros y materia que cae parecerán increíblemente pequeñas y luminosas en comparación con las galaxias que vemos en la actualidad. Lo que ha creado el universo —los objetos cuyo nacimiento acabamos de presenciar en teoría— son los cuásares.

Los cuásares fueron descubiertos a principios de la década de 1960, cuando los astrónomos empezaron a utilizar telescopios provistos de detectores sensibles a ámbitos invisibles de radiación, como las ondas de radio o los rayos X. Por tanto, sus retratos galácticos podrían incluir información sobre el aspecto de las galaxias en esas otras bandas del espectro electromagnético. Si combinamos esto con nuevas mejoras en las emulsiones fotográficas, de las profundidades del espacio surge un nuevo zoo de especies siderales, entre las cuales, las más destacadas son objetos que, en las fotos, parecen estrellas simples, pero —a diferencia de las estrellas— generan cantidades extraordinarias de ondas de radio. La descripción operativa de estos objetos es «fuente de radio cuasi estelar», término que se acortó enseguida para convertirse en «cuásar». Más destacadas aún que las emisiones de radio por parte de estos objetos eran sus distancias: como categoría, resultaron ser los objetos conocidos más lejanos del universo. El hecho de que los cuásares fueran tan pequeños y aún visibles a distancias tan enormes significaba que debían de constituir un tipo de objeto totalmente nuevo. ¿Hasta qué punto pequeño? No mayor que un sistema solar. ¿Hasta qué punto luminoso? Incluso los cuásares oscuros eclipsan nuestra galaxia corriente.

A principios de la década de 1970, los astrofísicos coincidían en que los agujeros negros supermasivos eran el motor de los cuásares, que

devoran gravitatoriamente todo lo que tienen a su alcance. El modelo de los agujeros negros puede dar cuenta de lo pequeños y brillantes que son los cuásares, pero no dice nada de la fuente alimentaria del agujero. Hubo que esperar a la década de 1980 para que los astrofísicos comenzasen a entender el entorno del cuásar, pues la tremenda luminosidad de sus regiones centrales impide la visión de sus mucho menos visibles entornos. A la larga, sin embargo, gracias a nuevas tecnologías que tapan la luz del centro, los astrofísicos pudieron detectar una pelusa que rodeaba algunos de los cuásares más oscuros. A medida que mejoraban las tecnologías y las tácticas de detección, cada cuásar revelaba pelusa; algunos, incluso una estructura en espiral. Resulta que los cuásares no son un nuevo tipo de objeto, sino más bien un nuevo tipo de núcleo galáctico.

\* \* \* \*

En abril de 1990, la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) lanzó uno de los instrumentos astronómicos más caros jamás construidos: el Telescopio Espacial Hubble. Con el tamaño de un autobús Greyhound y dirigido por órdenes enviadas desde la Tierra, el Telescopio Hubble podía beneficiarse de las órbitas descritas fuera de nuestra siempre borrosa atmósfera. En cuanto los astronautas hubieron instalado lentes para corregir los errores del espejo principal, el telescopio fue capaz de escudriñar regiones inexploradas de galaxias corrientes, incluidos sus centros. Tras mirar en esos centros, se observó que las estrellas se movían injustificadamente deprisa dada la gravedad deducida de la luz visible de otras estrellas de las inmediaciones. Esto... gravedad elevada, área

pequeña... será un agujero negro. Una galaxia tras otra —montones de ellas— contaban con estrellas sospechosamente rápidas en el núcleo. De hecho, cada vez que el Telescopio Espacial Hubble tenía una imagen clara del centro de una galaxia, ahí estaban.

En la actualidad parece probable que cada galaxia gigante albergue un agujero negro supermasivo, que habría podido servir de semilla gravitatoria alrededor de la cual se acumulara otra materia o acaso fuera fabricado después por materia que llegara a raudales desde regiones exteriores de la galaxia. Sin embargo, no todas las galaxias fueron cuásares en su juventud.

\* \* \* \*

La creciente lista de galaxias comunes de las que se conocía la presencia de un agujero negro en su centro comenzó a asombrar a los investigadores. ¿Un agujero negro supermasivo que no era un cuásar? ¿Un cuásar rodeado por una galaxia? Es inevitable pensar en un nuevo esquema del funcionamiento de las cosas. En este esquema, algunas galaxias inician su vida como cuásares. Para ser un cuásar, que en realidad sólo es el núcleo ardiente visible de una galaxia por lo demás corriente y moliente, el sistema debe tener no sólo un agujero negro masivo y hambriento, sino también un generoso suministro de gas en caída. Tan pronto el agujero negro supermasivo ha engullido todo el alimento disponible, tras dejar gas y estrellas sin comer en órbitas seguras y distantes, el cuásar simplemente se apaga. Y entonces tenemos una galaxia dócil con un agujero negro inactivo dormitando en su centro.

Los astrónomos han observado otras clases de objetos, clasificados como intermedios entre los cuásares y las galaxias normales, cuyas propiedades también dependen de la mala conducta de los agujeros negros supermasivos. En ciertas ocasiones, los torrentes de material que cae en el agujero negro central de una galaxia fluyen de manera lenta y constante. En otras, lo hacen de forma episódica. Estos sistemas pueblan la fauna de galaxias cuyos núcleos son activos, pero no feroces. Con los años, se han acumulado nombres para los diversos tipos: LINER (por *low-ionization nuclear emission-line regions*, regiones de líneas de emisión nuclear de baja ionización), galaxias Seyfert, galaxias N, blazares. Todos estos objetos reciben el nombre genérico de AGN, abreviación de los astrofísicos para las galaxias con núcleos «activos». A diferencia de los cuásares, que aparecen sólo en distancias enormes, las AGN aparecen tanto a grandes distancias como relativamente cerca. Esto sugiere que pertenecen a la variedad de galaxias que se portan mal. Como los cuásares consumieron toda su comida hace tiempo, los vemos sólo cuando retrocedemos mucho en el tiempo al observar lejanías espaciales. En contraste, las AGN tenían mucho menos apetito, por lo que algunas, transcurridos miles de millones de años, todavía disponen de comida.

Como clasificar las AGN sólo basándose en su aspecto visual nos brinda una historia incompleta, los astrofísicos las clasificaron en función de sus espectros y de la gama completa de sus emisiones electromagnéticas. Entre mediados y finales de la década de 1990, los investigadores mejoraron su modelo de los agujeros negros y



observaron que podían describir casi todas las bestias del zoo de las AGN calculando sólo unos cuantos parámetros: la masa del agujero negro del objeto, el ritmo al que está alimentándose, y nuestro ángulo de visión en el disco de adición y sus «chorros». Si, por ejemplo, miramos «por el cañón», exactamente a lo largo de la misma dirección que la de un chorro surgiendo de las inmediaciones de un agujero negro supermasivo, vemos un objeto mucho más brillante que si tenemos una visión lateral con un ángulo diferente. Ciertas variaciones en estos tres parámetros pueden explicar casi toda la impresionante diversidad observada por los astrofísicos, lo que les proporciona una grata «desespeciación» de tipos de galaxias y un mayor conocimiento de su formación y evolución. El hecho de que sólo unas cuantas variables puedan dar cuenta de tantas cosas — diferencias de forma, tamaño, luminosidad y color— supone un triunfo no anunciado de los astrofísicos de finales del siglo XX. Como hizo falta un montón de investigadores, de años y de tiempo de telescopio, no es una de estas cosas que salen en el telediario, pero no deja de ser un triunfo.

\* \* \* \*

De todos modos, no podemos llegar a la conclusión de que los agujeros negros supermasivos lo explican todo. Aunque tengan una masa millones o miles de millones de veces superior a la del Sol, no aportan casi nada en comparación con las masas de las galaxias en las que están incrustados (por lo general, una proporción muy inferior al 1% de la masa total de una galaxia grande). Si queremos dar cuenta de la existencia de la materia oscura, o de otras fuentes ocultas de

gravedad en el universo, estos agujeros negros son tan insignificantes que podemos pasarlos por alto. Pero si calculamos cuánta energía manejan —es decir, al computar la energía que liberan como parte de su formación—, descubrimos que los agujeros negros dominan la energética de la formación de las galaxias. Toda la energía de todas las órbitas de todas las estrellas y nubes de gas, que en última instancia componen una galaxia, es algo nimio en comparación con lo que fabricó el agujero negro. Sin los agujeros negros supermasivos acechando debajo, las galaxias tal como las conocemos quizá no se habrían formado nunca. El antaño luminoso, pero ahora invisible, agujero negro que se encuentra en el centro de cada galaxia gigante procura una conexión oculta, la explicación física de la aglomeración de materia en un sistema complejo de miles de millones de estrellas en órbita alrededor de un centro común.

La explicación más general de la formación de las galaxias recurre no sólo a la gravedad producida por los agujeros negros supermasivos, sino también a la gravedad en escenarios astronómicos más convencionales. ¿Qué fabricó los miles de millones de estrellas de una galaxia? También la gravedad, que produjo hasta cientos de miles de estrellas en una sola nube. La mayoría de las estrellas de una galaxia nacieron en el seno de «asociaciones» relativamente sueltas. Las regiones más compactas de nacimiento estelar siguen siendo «cúmulos de estrellas» identificables, en los cuales las integrantes describen órbitas alrededor del centro, recorriendo su camino por el espacio en un *ballet* cósmico coreografiado por las fuerzas de la gravedad de las otras estrellas del cúmulo, mientras que los propios

cúmulos siguen enormes trayectorias en torno al centro de la galaxia, a salvo del destructivo poder del agujero negro central.

Dentro de un cúmulo, las estrellas se desplazan conforme a un amplio abanico de velocidades, algunas tan rápidas que corren peligro de salirse totalmente del sistema. De hecho, esto pasa de vez en cuando, cuando ciertas estrellas veloces se libran de la gravedad del cúmulo para vagar a su aire por la galaxia. Estas estrellas libres, junto con los «cúmulos globulares de estrellas» cada uno de los cuales contiene centenares de miles de ellas, se suman a las que forman los halos esféricos de galaxias. Inicialmente luminosos, pero en la actualidad carentes de sus estrellas de corta vida más brillantes, los halos galácticos son los objetos visibles más viejos, con certificados de nacimiento que se remontan a la formación de las propias galaxias. Últimos en colapsarse, y por tanto últimos en convertirse en estrellas, el gas y el polvo que nos encontramos se ven arrastrados e inmovilizados en el plano galáctico. En las galaxias elípticas no existe un plano así, y todo su gas ya se ha convertido en estrellas. Las galaxias espirales, sin embargo, presentan distribuciones muy aplanadas de materia, caracterizadas por un plano central en el cual se forman las estrellas más jóvenes y brillantes en patrones en espiral, testimonio de grandes ondas vibratorias de gas alternativamente denso y enrarecido que dan vueltas alrededor del centro galáctico. Como los malvaviscos calientes que se pegan al entrar en contacto, todo el gas de una galaxia espiral que no participó con rapidez en la fabricación de cúmulos de estrellas ha caído hacia el plano galáctico, se ha pegado a sí mismo y ha creado un disco de

materia que produce estrellas poco a poco. Durante los últimos miles de millones de años, y durante los próximos miles de millones, seguirán formándose estrellas en galaxias espirales, cada generación con más elementos pesados que la siguiente. Estos elementos pesados (según los astrofísicos, todos los elementos más pesados que el helio) han sido lanzados al espacio interestelar mediante flujos desde estrellas envejecidas o como restos explosivos de estrellas de masa elevada, una especie de supernova. Su existencia vuelve la galaxia —y por tanto el universo— aún más agradable para la química de la vida tal como la conocemos.

\* \* \* \*

Hemos esbozado el nacimiento de una galaxia espiral clásica, en una secuencia evolutiva que se ha representado decenas de miles de millones de veces, y que ha situado las galaxias en muchísimas disposiciones diferentes: en cúmulos, en largos filamentos y cadenas, y en láminas.

Como al contemplar el espacio miramos hacia atrás en el tiempo, tenemos la capacidad de estudiar las galaxias no únicamente como son ahora, sino que, sólo con levantar la vista, también podemos estudiar cómo eran hace miles de millones de años. El problema de llevar este concepto a la realidad observacional reside en el hecho de que las galaxias situadas a miles de millones de años luz se nos muestran como objetos sumamente pequeños y oscuros, por lo que ni siquiera los mejores telescopios pueden establecer su contorno. No obstante, en los últimos años los astrofísicos han realizado importantes progresos al respecto. El principal avance se produjo en

1995, cuando Robert Williams, a la sazón director del Instituto de Ciencia Telescópica Espacial de la Universidad Johns Hopkins, dispuso el Telescopio Hubble de tal manera que apuntara hacia una sola dirección en el espacio, cerca de la Osa Mayor, durante diez días. Williams tiene todo el mérito, pues el Comité de Asignación de Tiempo, que selecciona las propuestas de observación más atractivas del telescopio, consideró que la de Williams no merecía la pena. Al fin y al cabo, la región que quería estudiar había sido elegida adrede por no tener nada interesante que mirar, por lo que era un trozo de cielo gris y aburrido. Como consecuencia de ello, ningún proyecto en marcha podría beneficiarse directamente de tanto tiempo de observación del muy solicitado telescopio. Por suerte, como director del Instituto de Ciencia Telescópica Espacial, Williams tenía derecho a la asignación de un pequeño porcentaje del total —su «tiempo discrecional de director»—, e invirtió su influencia en lo que llegó a conocerse como Campo Profundo del Hubble, una de las fotografías astronómicas más famosas jamás tomadas.

La exposición de diez días, realizada casualmente durante la paralización gubernamental de 1995, produjo la imagen más estudiada de la historia de la astronomía. Tachonado de galaxias y objetos de tipo galáctico, el campo profundo ofrece un palimpsesto cósmico en el que objetos a distintas distancias de la Vía Láctea han estampado sus momentáneas firmas de luz en distintos momentos. En el campo profundo, vemos objetos tal como eran, pongamos, hace mil trescientos, tres mil seiscientos, cinco mil setecientos u ocho mil doscientos millones de años, con la época de cada objeto determinada

por su distancia respecto de nosotros. Centenares de astrónomos han aprovechado la profusión de datos de esta imagen para obtener información nueva sobre cómo han evolucionado las galaxias con el tiempo y cuál era su aspecto poco después de formarse. En 1998, el telescopio obtuvo una imagen complementaria, el Campo Profundo Sur del Hubble, tras dedicar diez días de observación a otro pedazo de cielo en la dirección opuesta a la del primer campo profundo, en el hemisferio sur celeste. La comparación de las dos imágenes permitió a los astrónomos asegurarse de que los resultados del primer campo no representaban una anomalía (por ejemplo, si las dos imágenes hubieran sido idénticas en cada detalle, o estadísticamente distintas entre sí en todos los aspectos, habríamos podido deducir que era cosa del diablo), amén de perfeccionar sus conclusiones sobre cómo se forman los distintos tipos de galaxias. Tras una satisfactoria misión de servicio, en la que el Telescopio Hubble fue equipado con detectores aún mejores (más sensibles), el Instituto de Ciencia Telescópica Espacial ya no pudo resistir más y, en 2004, autorizó el Campo Ultra Profundo del Hubble, que dejó al descubierto el cosmos cada vez más lejano.

Por desgracia, las fases más tempranas de la formación de las galaxias, que nos serían reveladas por objetos situados a las distancias máximas, sobrepasan incluso los mejores esfuerzos del Telescopio Hubble, sobre todo porque la expansión cósmica ha desplazado casi toda su radiación a la región infrarroja, inaccesible a los instrumentos del telescopio. Para estas galaxias más remotas, los astrónomos aguardan el diseño, la construcción, el lanzamiento y el

funcionamiento satisfactorio del sucesor del Hubble, el Telescopio Espacial James Webb (JWST, por sus siglas en inglés), que toma el nombre del director de la NASA durante la era Apolo. (Dicen las malas lenguas que se escogió este nombre, y no otro en honor de algún científico famoso, para garantizar la pervivencia del proyecto del telescopio, pues lo contrario habría supuesto la pérdida de un importante legado oficial).

El JWST tendrá un espejo más grande que el del Hubble, ideado para desplegarse como una intrincada flor mecánica que se abre en el espacio a fin de procurar una superficie reflectante mucho mayor que cualquier otra que encaje dentro de uno de nuestros cohetes. El nuevo telescopio espacial también poseerá un juego de instrumentos muy superiores a los del Telescopio Hubble, que fueron diseñados originariamente durante la década de 1960, fabricados durante la de 1970, lanzados en 1990, y que —pese a que se actualizaron de manera considerable durante la década de 1990— todavía carecen de capacidades esenciales como la de detectar radiación infrarroja. Algo de esta capacidad existe ahora en el Telescopio Infrarrojo Spitzer (SIRTF, por sus siglas en inglés), lanzado en 2003, que describe órbitas alrededor del Sol mucho más lejos de la Tierra que el Hubble, con lo que evita interferencias de las grandes cantidades de radiación infrarroja emitida por nuestro planeta. Para lograr este objetivo, el JWST tendrá asimismo una órbita mucho más lejana de la Tierra que el Telescopio Hubble, por lo cual será eternamente inaccesible a las misiones de servicio tal como se conciben actualmente —la NASA debería hacer esto bien desde el principio—. Cuando el nuevo

telescopio entre en funcionamiento tendría que proporcionar perspectivas nuevas y espectaculares del cosmos, entre ellas imágenes de galaxias situadas a más de diez mil millones de años luz, vistas mucho más cerca de su tiempo de origen que cualquier otra revelada por los Campos Profundos del Hubble. Trabajando en colaboración con el nuevo telescopio espacial, como han hecho con el viejo, grandes instrumentos terrestres estudiarán con detalle la profusión de objetos que serán revelados por nuestro siguiente gran paso en los instrumentos aerotransportados por el espacio.

\* \* \* \*

Por muchas posibilidades que ofrezca el futuro, no deberíamos ignorar los admirables logros de los astrofísicos de las tres últimas décadas, surgidos de sus capacidades para crear herramientas nuevas con las que observar el universo. A Carl Sagan le gustaba decir que, si uno no se queda sobrecogido ante lo que ha hecho el cosmos, es que no tiene sangre en las venas. Gracias a ciertos avances en nuestras observaciones, ahora sabemos más de lo que sabía Sagan sobre la pasmosa secuencia de episodios que han desembocado en nuestra existencia, como las fluctuaciones cuánticas en la distribución de materia y energía en una escala inferior al tamaño de un protón, que generaron supercúmulos de galaxias a lo largo de treinta millones de años luz. Desde el caos al cosmos, esta relación causa-efecto atraviesa un tamaño superior a  $10^{38}$  y un tiempo superior a  $10^{42}$ . Como pasa con las hebras microscópicas del ADN que predeterminan la identidad de una especie macroscópica y las propiedades exclusivas de sus miembros,



el aspecto y el comportamiento del cosmos estaban ya latentes en el tejido de sus momentos más tempranos, y fueron transportados implacablemente a través del tiempo y el espacio. Lo percibimos al levantar la vista. Lo percibimos al bajarla. Lo percibimos al mirar hacia dentro.

## **Parte III**

### **El origen de las estrellas**

#### **Contenido:**

*Capítulo 9. Polvo al polvo*

*Capítulo 10. El zoo elemental*

### **Capítulo 9**

#### **Polvo al polvo**

Si miramos el cielo en una noche despejada lejos de una ciudad iluminada, localizamos enseguida una franja difusa de luz pálida, desgarrada en algunos puntos por manchas oscuras, que abarca todo el horizonte. Conocida desde hace tiempo como la «vía láctea» (en minúscula) del cielo, esta bruma de color blanco lechoso combina la luz de un número elevadísimo de estrellas y nebulosas gaseosas. Quienes observen la vía láctea con prismáticos o un telescopio casero verán que las áreas oscuras y aburridas se dividen en áreas, bueno, oscuras y aburridas, si bien las brillantes dejarán de ser un resplandor difuso para ser un conjunto de innumerables estrellas y nebulosas.

En su librito *Sidereus Nuncius (La gaceta sideral)*, publicado en Venecia en 1610, Galileo Galilei elaboró el primer relato del cielo visto mediante un telescopio, incluida una descripción de las manchas de luz de la vía láctea. Tras referirse al instrumento que utilizaba como

*catalejo, pues aún no se había acuñado el nombre de telescopio ('el que ve a lo lejos', en griego), Galileo apenas podía contenerse:*

*[...] la naturaleza de la materia de la propia vía láctea que, con la ayuda del catalejo, puede observarse con tal claridad que todas las discusiones que han desconcertado a los filósofos durante generaciones quedan destruidas por una certeza visible que nos libera de argumentos mundanos. Porque la galaxia no es más que una reunión de innumerables estrellas distribuidas en cúmulos. En cualquier región a la que se dirija el catalejo se ofrecen de inmediato a la vista un inmenso número de estrellas. De estas, muchas parecen ser de gran tamaño y harto conspicuas, pero la multitud de pequeñas estrellas es realmente inconmensurable.<sup>4</sup>*

Seguramente, el «inmenso número de estrellas» de Galileo, que define las regiones más densamente pobladas de nuestra galaxia de la Vía Láctea, sitúa la acción astronómica real. Entonces, ¿por qué va a estar alguien interesado en las áreas oscuras intermedias sin estrellas visibles? Partiendo de su aspecto visual, las áreas oscuras son probablemente agujeros cósmicos, aberturas al infinito y a los espacios vacíos de más allá.

Pasarían tres siglos antes de que alguien determinara que las manchas oscuras de la vía láctea, lejos de ser agujeros, consistían realmente en densas nubes de gas y polvo que oscurecen campos estelares más lejanos y contienen en su profundo interior semilleros de estrellas. Según anteriores sugerencias del astrónomo

---

<sup>4</sup> Galileo Galilei, *El mensaje y el mensajero sideral*, Alianza, Madrid, 1990.

norteamericano George Cary Comstock, que se preguntaba por qué las estrellas remotas son más oscuras de lo que sus distancias podrían indicar, el astrónomo holandés Jacobus Cornelius Kapteyn identificó al culpable en 1909. En dos trabajos de investigación, titulados ambos «Sobre la absorción de la luz en el espacio»,<sup>5</sup> Kapteyn presentó pruebas de que las nubes oscuras —su «medio interestelar» recién descubierto— no sólo bloquean la luz de las estrellas, sino que también lo hacen de forma irregular a través del arco iris de colores del espectro de una estrella; esto es, absorben y dispersan, y por tanto atenúan, la luz en el extremo violeta del espectro visible con más eficacia que cuando actúan sobre luz roja. Como esta absorción selectiva elimina luz violeta con preferencia sobre la roja, las estrellas lejanas parecen más rojas que las cercanas. La cantidad de enrojecimiento de la luz de las estrellas aumenta proporcionalmente a la cantidad total de material que la luz se encuentra en su viaje hacia nosotros.

El hidrógeno y el helio corrientes, principales integrantes de las nubes de gas cósmico, no enrojecen la luz. Sin embargo, las moléculas compuestas de muchos átomos sí lo hacen —sobre todo las que contienen carbono y silicio—. Cuando las partículas interestelares crecen demasiado para ser consideradas moléculas, con cientos de miles o millones de átomos individuales en cada una de ellas, las denominamos «polvo». La mayoría de nosotros conocemos el polvo en la variedad casera, aunque pocos nos hemos preocupado de saber que, en una casa cerrada, el polvo consiste principalmente en células

---

<sup>5</sup> J. C. Kapteyn, *Astrophysical Journal*, 29, 46, 1909; 30, 284, 1909.

de piel humana muertas y caídas (aparte de caspa de mascotas, si corre por ahí algún mamífero vivo). Por lo que sabemos, el polvo cósmico no contiene epidermis de nadie; en cambio, el polvo interestelar sí incluye un notable conjunto de moléculas complejas, que emiten fotones sobre todo en las regiones infrarrojas y de microondas del espectro. Los astrofísicos carecieron de buenos telescopios de microondas hasta la década de 1960, y de telescopios efectivos de infrarrojos hasta la de 1970. En cuanto dispusieron de estos instrumentos observacionales, fueron capaces de investigar la verdadera riqueza química del material interestelar. Durante las décadas posteriores a dichos avances tecnológicos, emergió un fascinante e intrincado cuadro del nacimiento de las estrellas.

No todas las nubes de gas formarán siempre estrellas. Lo más frecuente es que una nube no sepa muy bien qué hacer a continuación. En realidad, aquí los que no saben muy bien lo que sucede son los astrofísicos. Nos consta que una nube interestelar «quiere» colapsarse bajo su propia gravedad para fabricar una o más estrellas; sin embargo, la rotación de la nube, amén de los efectos de los movimientos turbulentos del gas, se opone a ese resultado. Es lo mismo que hace la presión del gas que estudiamos en clase de química en el instituto. Los campos magnéticos también luchan contra el colapso. Penetran en la nube y limitan los movimientos de las partículas cargadas que deambulan libremente en su interior, resistiendo a la compresión y, por tanto, dificultando las posibles respuestas de la nube a su propia gravedad. La parte preocupante de este razonamiento surge al darnos cuenta de que, si nadie supiera de

antemano que existen las estrellas, las investigaciones más avanzadas aportarían muchísimas razones convincentes de por qué aquellas no habrían podido formarse jamás.

Al igual que los varios cientos de miles de millones de estrellas de nuestra Vía Láctea, que toma el nombre de la franja de luz que sus regiones más densamente pobladas describen en el cielo, diversas nubes gigantes de gas giran alrededor del centro de la galaxia. Las estrellas equivalen a minúsculas motas, sólo a unos cuantos segundos luz, que flotan en un inmenso mar de espacio casi vacío, pasando de vez en cuando una cerca de otra como barcos en la noche. Por su parte, las nubes de gas son enormes, abarcan, en general, centenares de años luz, y tienen la masa de un millón de soles. Como estas nubes gigantes abarrotan la galaxia, suelen chocar entre sí, enredando sus tripas llenas de gas y polvo. Unas veces, según sean sus velocidades relativas y sus ángulos de impacto, las nubes acaban pegadas; otras, como remate de la colisión, se destruyen mutuamente.

Si una nube se enfría hasta alcanzar una temperatura lo bastante baja (menos de unos cien grados por encima del cero absoluto), sus átomos integrantes se pegarán entre sí cuando choquen en vez de escorarse como hacen a temperaturas superiores. Esta transición química tiene consecuencias para todos. Las partículas en crecimiento —que ahora contienen decenas de átomos cada una— se ponen a dispersar luz visible de un lado a otro, atenuando considerablemente la luz de las estrellas tras la nube. Para cuando las partículas se han convertido en granos de polvo plenamente

desarrollados, cada una contiene miles de millones de átomos. Las estrellas envejecidas fabrican granos similares de polvo que soplan suavemente en el espacio interestelar durante sus fases de «gigante roja». A diferencia de las partículas más pequeñas, los granos de polvo con miles de millones de átomos ya no dispersan los fotones de luz visible procedentes de las estrellas que tienen detrás; lo que sí hacen es absorber esos fotones y luego irradiar de nuevo su energía como infrarroja, la cual puede escapar con facilidad de la nube. Mientras sucede todo esto, la presión de los fotones, transmitida a las moléculas que la absorben, empuja la nube en la dirección contraria a la de la fuente de luz. Ahora la nube está acoplada a la luz de las estrellas.

Nace una estrella cuando las fuerzas que fabrican una nube cada vez más densa provocan a la larga un colapso de raíz gravitatoria, durante el cual cada parte de la nube tira de las otras partes para acercarlas más. Como el gas caliente opone resistencia a la compresión y al colapso con más eficacia que el gas frío, nos enfrentamos a una situación extraña. Hemos de enfriar la nube y producir una estrella antes de que la primera llegue a calentarse. En otras palabras, la creación de una estrella con un núcleo de 10 millones de grados, lo bastante caliente para que se inicie la fusión termonuclear, requiere primero que la nube alcance las condiciones internas más frías posibles. Sólo a temperaturas sumamente frías, unos cuantos grados por encima del cero absoluto, la nube puede colapsarse y permitir que la formación de estrellas empiece en serio.

¿Qué pasa dentro de una nube para que su colapso dé origen a estrellas recién nacidas? Los astrofísicos sólo gesticulan. Por mucho que quisieran, rastrear la dinámica interna de una nube interestelar masiva, la creación de un modelo informático que incluya las leyes de la física, todas las influencias internas y externas en la nube y todas las reacciones químicas pertinentes que pueden producirse en su seno todavía escapa a sus capacidades. Se nos plantea un nuevo desafío por el humilde hecho de que la nube original tiene un tamaño miles de millones de veces superior al de la estrella que estamos intentando crear, que a su vez tiene una densidad cien mil trillones superior a la densidad media dentro de la nube. En estas situaciones, lo más importante en una escala de dimensiones quizá no sea lo que más nos tenga que preocupar en otra.

En cualquier caso, basándonos en lo que vemos en el cosmos, podemos afirmar sin temor a equivocarnos que en las regiones más profundas, oscuras y densas de una nube interestelar, donde las temperaturas descienden aproximadamente hasta diez grados por encima del cero absoluto, la gravedad sí provoca el colapso de bolsas de gas, lo que vence fácilmente la resistencia ofrecida por los campos magnéticos y otros impedimentos. La contracción convierte la energía gravitatoria de las bolsas de las nubes en calor. La temperatura en cada una de estas regiones —que pronto serán el núcleo de una estrella recién nacida— aumenta rápidamente durante el colapso, lo que desintegra todos los granos de polvo de las inmediaciones al chocar. A la larga, la temperatura de la región central de la bolsa de



gas que sufre el colapso alcanza el valor crucial de 10 millones de grados en la escala absoluta.

A esta temperatura mágica, algunos de los protones (que sólo son átomos de hidrógeno desnudos, despojados del electrón que gira a su alrededor) se mueven lo bastante deprisa para superar su repulsión mutua. Sus altas velocidades permiten a los protones acercarse unos a otros lo suficiente para que la «fuerza nuclear fuerte» los una. Esta fuerza, que funciona sólo a distancias cortísimas, une los protones y los neutrones en todos los núcleos. La fusión termonuclear de los protones —«termo» porque se produce a temperaturas elevadas, y «fusión nuclear» porque fusiona partículas en un núcleo individual— crea núcleos de helio, cada uno de ellos con una masa ligeramente inferior a la suma de las partículas de cuya fusión ha resultado. La masa que desaparece durante esta fusión se transforma en energía, en un equilibrio descrito por la famosa ecuación de Einstein. La energía encarnada en la masa (siempre en una cantidad igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado) puede convertirse en otras formas de energía, como la energía cinética adicional de las partículas de movimiento rápido que surgen de las reacciones de fusión nuclear.

Cuando la nueva energía producida por la fusión nuclear se difunde hacia fuera, el gas se calienta y resplandece. A continuación, en la superficie de la estrella, la energía antes encerrada en núcleos individuales escapa al espacio en forma de fotones, generados por el gas a medida que la energía liberada mediante la fusión se calienta hasta alcanzar miles de grados. Aunque esta región de gas caliente

todavía reside en el útero cósmico de una nube interestelar gigante, podemos anunciar igualmente a la Vía Láctea que... ha nacido una estrella.

Los astrónomos saben que la masa de las estrellas oscila entre una simple décima parte de la del Sol y casi cien veces más. Por razones no muy claras, una nube típica gigante de gas puede desarrollar múltiples bolsas frías que tienden a colapsarse aproximadamente al mismo tiempo para dar origen a las estrellas —unas raquílicas, otras enormes—. Pero las apuestas están a favor de las raquílicas: por cada estrella de masa elevada, nacen mil estrellas de masa pequeña. El hecho de que sólo un pequeño porcentaje de todo el gas de la nube original participe en el nacimiento de la estrella supone un desafío clásico para la explicación de la formación de las estrellas. La pregunta es: ¿cómo es que dicha formación es tan importante si la nube de gas interestelar prácticamente no cambia? La respuesta seguramente está en la radiación producida por las estrellas recién nacidas, que tiende a inhibir la formación de otras.

Podemos explicar fácilmente el límite inferior en las masas de estrellas recién nacidas. Las bolsas de gases colapsantes, con masas inferiores a una décima parte de la del Sol, tienen demasiada poca energía gravitatoria para elevar las temperaturas del núcleo hasta los 10 millones de grados requeridos por la fusión nuclear del hidrógeno. En este caso, no nace ninguna estrella de fusión nuclear; sino que lo que obtenemos es una estrella fallida —eterna aspirante—, un objeto que los astrónomos denominan «enana marrón». Sin fuente de energía propia, una enana marrón se desvanece de forma constante,

brillando a partir del moderado calor generado durante el colapso original. Las capas exteriores gaseosas de una enana marrón son tan frías que muchas de las moléculas grandes normalmente destruidas en las atmósferas de estrellas más calientes permanecen aquí sanas y salvas. Debido a sus débiles luminosidades, es difícilísimo detectar las enanas marrones, por lo que, para observarlas, los astrofísicos han de valerse de complejos métodos parecidos a los utilizados a veces para detectar planetas: la búsqueda del menor brillo infrarrojo en esos objetos. Sólo en los últimos años han descubierto los astrónomos un número de enanas marrones suficiente para poder clasificarlas en más de una categoría.

También podemos determinar con facilidad el límite superior de masa en la formación de las estrellas. Una estrella con una masa más de cien veces superior a la del Sol tendrá tal luminosidad —una emanación tan enorme de energía en forma de luz visible, infrarroja y ultravioleta— que cualquier cantidad de polvo y gas adicional atraída hacia la estrella será rechazada por la intensa presión de la luz estelar. Los fotones de las estrellas empujan los granos de polvo de dentro de la nube, que a su vez transportan el gas consigo. Aquí la luz de las estrellas se acopla con el polvo de manera irreversible. Esta presión de la radiación funciona con tanta eficacia que sólo unas cuantas estrellas de masa elevada dentro de una nube oscura y oscurecedora tendrán suficiente luminosidad para dispersar casi toda su materia interestelar, dejando al descubierto docenas, si no centenares, de estrellas flamantes —todas hermanas, en realidad— para que las vea el resto de la galaxia.

\* \* \* \*

Cada vez que miramos la nebulosa de Orión, situada justo debajo de las tres estrellas brillantes del cinturón de Orión, a mitad de camino de la algo más tenue espada del Cazador, vemos un semillero estelar precisamente de esa clase. Dentro de esta nebulosa han nacido miles de estrellas, mientras miles más esperan su nacimiento, para crear un cúmulo gigante de estrellas que vaya siendo cada vez más visible para el cosmos a medida que se disipe la nebulosa. Las nuevas estrellas más masivas, que forman un grupo denominado Trapecio de Orión, están ocupadas haciendo un agujero gigante en medio de la nube de la que han surgido. Las imágenes del Telescopio Hubble de esta región revelan centenares de nuevas estrellas sólo en esta zona, donde cada «bebé» está envuelto en un disco protoplanetario incipiente hecho de polvo y otras moléculas extraídas de la nube original. Y dentro de cada uno de estos discos, está formándose un sistema planetario.

Diez mil millones de años después de que se formara la Vía Láctea, el nacimiento de estrellas prosigue actualmente en múltiples ubicaciones de nuestra galaxia. Aunque la mayor parte de la formación que vaya a producirse jamás en una galaxia típica gigante como la nuestra ya ha tenido lugar, tenemos la suerte de que sigan apareciendo estrellas nuevas, algo que continuará pasando durante los miles de millones de años venideros. Nuestra buena fortuna radica en la capacidad para estudiar el proceso de formación y las estrellas más jóvenes, lo cual aportará pistas que revelen, en todo su

esplendor, la historia completa de cómo las estrellas pasaron de gas y polvo fríos a madurez luminosa.

¿Cuán viejas son las estrellas? Aunque ninguna lleva la edad impresa en la manga, algunas la reflejan en su espectro. Entre los diversos medios ideados por los astrofísicos para evaluar la edad de las estrellas, los espectros constituyen la herramienta más fiable para analizar los diferentes colores de la luz estelar con detalle. Cada color—cada longitud de onda y frecuencia de las ondas lumínicas que observamos—nos cuenta una historia sobre cómo la materia fabricó la luz de las estrellas, o afectó a esta luz al abandonar la estrella, o resultó estar por casualidad a lo largo de la línea visual entre la estrella y nosotros. Mediante comparaciones minuciosas con espectros de laboratorio, los físicos han determinado la multitud de maneras en que distintos tipos de átomos y moléculas afectan al arco iris de colores de la luz visible: aplican este fecundo conocimiento a observaciones de espectros estelares, y deducen el número de átomos y moléculas que han afectado a la luz de una estrella concreta, así como la temperatura, la presión y la densidad de estas partículas. Tras años de comparar espectros de laboratorio con los de las estrellas, sumado a estudios experimentales de los espectros de diferentes átomos y moléculas, los astrofísicos han aprendido a interpretar el espectro de un objeto como una huella digital cósmica, que pone de relieve las condiciones físicas existentes en las capas externas de una estrella, región desde la cual la luz sale a chorro directamente hacia el espacio. Además, los astrofísicos pueden determinar cuántos átomos y moléculas flotantes en el espacio

interestelar a temperaturas mucho más frías acaso hayan afectado al espectro de la luz estelar observado, y pueden asimismo deducir la composición química, la temperatura, la densidad y la presión de esta materia interestelar.

En este análisis espectral, cada tipo diferente de átomo o molécula tiene su propia historia que contar. La presencia de moléculas de cualquier clase, por ejemplo, reveladas por sus característicos efectos en ciertos colores en el espectro, pone de manifiesto que la temperatura de las capas exteriores de una estrella debe de ser inferior a unos 3.000 grados Celsius (unos 5.000 grados Fahrenheit). A temperaturas superiores, las moléculas se mueven tan deprisa que sus choques las descomponen en átomos individuales. Si amplían este tipo de análisis a muchas sustancias diferentes, los astrofísicos pueden obtener un cuadro casi completo de las circunstancias concretas de las atmósferas estelares. Se dice que algunos astrofísicos muy diligentes saben más de los espectros de las estrellas que de su propia familia, lo cual acaso suponga un inconveniente para las relaciones interpersonales por mucho que eleve el conocimiento humano acerca del cosmos. De todos los elementos de la naturaleza —los distintos tipos de átomos que pueden crear patrones en el espectro de una estrella—, los astrofísicos reconocen y utilizan uno en concreto para averiguar la edad de las estrellas más jóvenes. Este elemento es el litio, el tercero más simple y ligero de la tabla periódica, conocido por algunos en la Tierra por ser el ingrediente activo de algunos medicamentos antidepresivos. En la tabla periódica de los elementos, el litio ocupa la posición

inmediatamente posterior al hidrógeno y el helio, acreedores de su merecida fama al existir en cantidades muchísimo mayores en el conjunto del cosmos. Durante sus primeros minutos, el universo fusionó una gran cantidad de hidrógeno para crear núcleos de helio, pero fabricó cantidades relativamente minúsculas de núcleos más pesados. Como consecuencia de ello, el litio quedó como un elemento raro, especialmente notorio entre los astrofísicos por el hecho cósmico de que las estrellas casi nunca fabrican más litio, sólo lo destruyen. El litio baja por una calle de sentido único porque cada estrella tiene reacciones de fusión nuclear más efectivas para destruir litio que para crearlo. Por consiguiente, el suministro cósmico de litio ha disminuido a un ritmo constante y sigue haciéndolo. Si queremos un poco, ahora es un buen momento para adquirirlo.

Para los astrofísicos, este simple hecho convierte al litio en un instrumento muy útil para calcular la edad de las estrellas, que inician su vida con su parte justa y proporcional de litio, fruto de la fusión nuclear acaecida durante la primera media hora del universo —y durante el propio Big Bang—. Y ¿cuál es esta parte justa? Aproximadamente uno entre cien mil millones de núcleos. Después de que una estrella recién nacida comienza a vivir con esta «riqueza» de litio, las cosas van sobre ruedas, en lo que respecta al litio, pues las reacciones nucleares en el interior del centro de la estrella consumen núcleos de litio lentamente. La mezcla continua y a veces episódica de materia del centro con materia del exterior lleva material hacia fuera, por lo que, al cabo de miles de años, las capas externas de la estrella pueden reflejar lo sucedido antes en su núcleo.

Por tanto, cuando los astrofísicos buscan las estrellas más jóvenes, siguen una regla sencilla: buscan las que tienen *mayor* abundancia de litio. El número de núcleos de litio de cada estrella en proporción, por ejemplo, al hidrógeno (determinado a partir de un estudio minucioso del espectro de la estrella) ubicará la estrella en algún punto del gráfico indicador del modo en que la edad de las estrellas guarda correlación con el litio en sus capas exteriores. Mediante este método, los astrofísicos son capaces de identificar con seguridad las estrellas más jóvenes de un cúmulo, y de asignar a cada una de ellas una edad basada en el litio. Como las estrellas destruyen litio con eficacia, las más viejas muestran poco o nada de dicho elemento. De ahí que el método funcione bien sólo con las estrellas de una edad inferior a unos cuantos cientos de millones de años. En estas estrellas más jóvenes, el enfoque del litio hace maravillas. Según un reciente estudio con dos docenas de estrellas jóvenes de la nebulosa de Orión, todas con una masa parecida a la del Sol, sus edades oscilaban entre uno y diez millones de años. Tal vez algún día los astrofísicos identificarán estrellas aún más jóvenes, pero, de momento, más o menos un millón de años es lo máximo a lo que pueden llegar.

\* \* \* \*

Salvo por la dispersión de las envolturas de gas de las que habían formado parte, los grupos de estrellas recién nacidas no preocuparon a nadie durante mucho tiempo (mientras fusionaban discretamente hidrógeno en helio en sus núcleos y destruían sus núcleos de litio como parte de sus reacciones de fusión). Pero nada dura eternamente. A lo largo de muchos millones de años, en respuesta a



las continuas perturbaciones gravitatorias de enormes nubes de paso, la mayoría de los cúmulos de estrellas en ciernes «se evaporan», mientras sus integrantes se desparraman en la reserva general de estrellas de la galaxia.

Casi cinco mil millones de años después de que se formase nuestra estrella, la identidad de las hermanas del Sol se ha desvanecido, con independencia de si siguen vivas o no. De todas las estrellas de la Vía Láctea y otras galaxias, las de masa baja consumen su combustible tan despacio que viven prácticamente para siempre. Las estrellas de masa intermedia como nuestro Sol se convierten a la larga en gigantes rojas, y expanden sus capas externas de gas hasta centuplicar su tamaño mientras se deslizan hacia la muerte. Estas capas exteriores acaban conectadas tan débilmente con la estrella que van a la deriva en el espacio, exponiendo un núcleo de combustibles nucleares agotados que propulsaron vidas estelares de diez mil millones de años. El gas que regresa al espacio será barrido y recogido por nubes de paso, para que participe en posteriores tandas de formación de estrellas.

A pesar de su rareza, las estrellas de masa máxima tienen casi todas las cartas evolutivas. Su elevada masa les proporciona la máxima luminosidad estelar —algunas pueden presumir de que la suya es un millón de veces superior a la del Sol—, y como consumen su combustible nuclear mucho más deprisa que las de masa pequeña, tienen la vida más corta de todas: sólo unos cuantos millones de años, o incluso menos. La fusión termonuclear ininterrumpida dentro de estrellas de masa elevada permite a estas fabricar montones de

elementos en su núcleo, empezando por el hidrógeno y siguiendo con el helio, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el neón, el magnesio, el silicio, el calcio, etcétera, hasta llegar al hierro. Estas estrellas forjan aún más elementos en su incendio final, que puede eclipsar brevemente la galaxia matriz entera. A cada uno de estos estallidos, los astrofísicos lo denominan «supernova», de aspecto similar (aunque con origen muy diferente) a las supernovas Tipo Ia descritas en el capítulo 5. La energía explosiva de una supernova extiende por la galaxia tanto los elementos fabricados previamente como los recién acuñados, con lo cual forma agujeros en su distribución de gas y enriquece nubes cercanas con la materia prima para fabricar nuevos granos de polvo. La explosión se desplaza supersónicamente a través de estas nubes interestelares, comprimiendo el gas y el polvo, y creando tal vez algunas de las bolsas de alta densidad necesarias para formar estrellas.

El mayor regalo de estas supernovas al cosmos consiste en todos los elementos distintos del hidrógeno y el helio; elementos capaces de formar planetas, protistas y personas. En la Tierra vivimos del producto de incontables estrellas que explotaron hace miles de millones de años, en épocas de la historia de la Vía Láctea muy anteriores a nuestro Sol y sus planetas; producto que se condensó en los recovecos oscuros y polvorientos de una nube interestelar, dotada ella misma de un enriquecimiento químico proporcionado por generaciones anteriores de estrellas de masa elevada.

\* \* \* \*

¿Cómo hemos llegado a saborear este delicioso fruto del conocimiento, el hecho de que todos los elementos más allá del helio se forjaran dentro de las estrellas? El premio para los autores del descubrimiento científico más subestimado del siglo XX corresponde al reconocimiento de que las supernovas —la agonía explosiva de estrellas de masa elevada— procuran la principal fuente del origen y la abundancia de elementos pesados en el universo. Esta idea relativamente olvidada apareció en un largo artículo de investigación, publicado en 1957 en la revista norteamericana *Reviews of Modern Physics* bajo el título «La síntesis de los elementos en las estrellas», escrito por E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle. En dicho trabajo, los cuatro científicos crearon un marco teórico y computacional que interpretó y combinó de forma excelente cuarenta años de cavilaciones de otros científicos sobre dos temas clave: las fuentes de la energía solar y la transmutación de los elementos químicos.

La química nuclear cósmica, el intento de entender cómo la fusión nuclear fabrica y destruye diferentes tipos de núcleos, siempre ha sido un asunto enrevesado. Entre las preguntas cruciales se han incluido las siguientes: ¿cómo se comportan los diversos elementos cuando actúan sobre ellos diversas temperaturas y presiones? ¿Los elementos se fusionan o se dividen? ¿Hasta qué punto lo hacen con facilidad? ¿Estos procesos liberan energía cinética nueva o absorben energía cinética ya existente? ¿Cómo difieren los procesos para cada elemento de la tabla periódica?

¿Qué significa para nosotros la tabla periódica de los elementos? Como la mayoría de los viejos estudiantes, recordaremos un gráfico gigante en la pared de clase de ciencias, con misteriosas casillas en las que letras y símbolos crípticos murmuraban relatos de polvorientos laboratorios que, si era posible, debían ser evitados por las almas jóvenes en transición. Pero para quienes conocen sus secretos, este gráfico cuenta cien historias de violencia cósmica de las que nacieron sus componentes. La tabla periódica enumera todos los elementos conocidos del universo, dispuestos según el número creciente de protones en el núcleo. Los dos más ligeros son el hidrógeno, con un protón en el núcleo, y el helio, con dos. Como vieron los cuatro autores del trabajo de 1957, en las condiciones adecuadas de temperatura, densidad y presión, una estrella puede utilizar hidrógeno y helio para crear todos los demás elementos de la tabla periódica.

Los detalles de este proceso de creación, y de otras interacciones que destruyen núcleos en vez de crearlos, configuran el contenido de la química nuclear, que conlleva el cálculo y la utilización de «secciones transversales de colisión» para medir lo cerca que una partícula debe aproximarse a otra antes de ser susceptibles ambas de interactuar de manera significativa. Los físicos pueden calcular fácilmente secciones transversales de colisión para hormigoneras, o para casas móviles de doble ancho bajando por una calle sobre camiones de plataforma, pero tienen problemas mucho mayores si se trata de analizar el comportamiento de partículas subatómicas minúsculas y escurridizas. Un conocimiento minucioso de las secciones

transversales de colisión permite a los físicos predecir los ritmos y las rutas de la reacción nuclear. No obstante, pequeñas dudas en sus tablas de secciones transversales suelen conducirlos a conclusiones totalmente erróneas. Estas dificultades se parecen a las que surgirían si intentásemos desplazarnos por el metro de una ciudad con la ayuda del mapa de otra ciudad: la teoría básica sería correcta, pero los detalles nos sacarían de quicio.

Pese a su ignorancia sobre las secciones transversales de colisión, durante la primera mitad del siglo XX los científicos ya llevaban tiempo sospechando que, si en algún sitio del universo existían procesos nucleares exóticos, los centros de las estrellas parecían lugares propicios para encontrarlos. En 1920, el astrofísico teórico británico *sir* Arthur Eddington publicó un artículo titulado «La constitución interna de las estrellas», según el cual el Laboratorio Cavendish de Inglaterra, importante centro de investigación en física atómica y nuclear, quizá no era el único lugar del universo que conseguía transformar unos elementos en otros:

*¿Cabe admitir que está produciéndose una transmutación así? Es difícil afirmarlo, pero quizá sea más difícil negar que esto esté pasando... y lo que es posible en el Laboratorio Cavendish tal vez no sea demasiado difícil en el Sol. Creo que, en general, se ha abrigado la sospecha de que las estrellas son los crisoles donde los átomos más ligeros que abundan en las nebulosas se combinan para constituir elementos más complejos.*

El trabajo de Eddington, que prefiguraba las detalladas observaciones de Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle, apareció varios años antes del descubrimiento de la mecánica cuántica, sin la cual nuestro conocimiento de la física de los átomos y los núcleos podríamos considerarlo, como mínimo, flojo. Con una presciencia notable, Eddington comenzó a formular un escenario para la energía generada por las estrellas mediante la fusión termonuclear del hidrógeno para formar helio y más cosas:

*No necesitamos atarnos a la formación de helio a partir del hidrógeno como única reacción que suministra la energía [a una estrella], si bien parecería que las fases posteriores de fabricación de los elementos conllevan mucha menos liberación, y a veces incluso absorción, de energía. La postura podría resumirse así: los átomos de todos los elementos se componen de átomos de hidrógeno combinados, y es de suponer que en otro tiempo se formaron a partir de hidrógeno; el interior de una estrella parece un lugar tan idóneo como cualquier otro para que ahí se haya producido la evolución.*

Cualquier modelo de la transmutación de los elementos debería explicar la mezcla observada de elementos descubiertos en la Tierra y otras partes del universo. Para ello, los físicos necesitan averiguar cuál es el proceso fundamental con el que las estrellas generan energía al transformar un elemento en otro. En 1931, con las teorías de la mecánica cuántica bastante bien desarrolladas (aunque todavía no había sido descubierto el neutrón), el astrofísico británico Robert

d'Escourt Atkinson publicó un exhaustivo artículo, resumido como una «teoría de síntesis de la energía estelar y del origen de los elementos [...] en la que los diversos elementos químicos se crean paso a paso a partir de los más ligeros en el interior de las estrellas, mediante la sucesiva incorporación de protones y electrones, uno cada vez».

El mismo año, el químico nuclear norteamericano William D. Harkins publicó un trabajo según el cual «los elementos de bajo peso atómico [número de protones más neutrones en cada núcleo] abundan más que los de peso atómico elevado y que, en promedio, los elementos con número atómico [número de protones en cada núcleo] par son diez veces más abundantes que los de número atómico impar de valor similar». Harkins suponía que la abundancia relativa de los elementos dependía de la fusión nuclear más que de procesos químicos como la combustión, y que los elementos pesados debieron de ser sintetizados a partir de los ligeros.

El mecanismo detallado de la fusión nuclear en las estrellas podría, en última instancia, explicar la presencia cósmica de muchos elementos, sobre todo de los que obtenemos cada vez que añadimos un núcleo de helio de dos protones y dos neutrones al elemento previamente creado: son los abundantes elementos con «número atómico par» descritos por Harkins. No obstante, la existencia y el número relativo de muchos otros siguen pendientes de explicación. En el cosmos, debe de haber en funcionamiento otros mecanismos para fabricar elementos.

El neutrón, descubierto en 1932 por el físico británico James Chadwick mientras trabajaba en los Laboratorios Cavendish, desempeña en la fusión nuclear un importante papel que Eddington no habría sido capaz de imaginar. Ensamblar protones exige trabajar duro, pues se repelen entre sí de forma natural, al igual que todas las partículas con la misma carga eléctrica. Para fusionar protones, hemos de acercarlos lo suficiente (a menudo mediante densidades, presiones y temperaturas elevadas) para que superen su repulsión mutua y que así la fuerza nuclear fuerte los una. No obstante, el neutrón sin carga no repele a ninguna otra partícula, por lo que puede entrar sin más en el núcleo de otro y unirse a las otras partículas ensambladas, mantenidas ahí por la misma fuerza que une los protones. Este paso no crea otro elemento, pues eso supondría un número diferente de protones en cada núcleo. Al añadir un neutrón, fabricamos un «isótopo» del núcleo del elemento original, que difiere sólo en detalles del núcleo original porque su carga eléctrica total permanece invariable. Para algunos elementos, el neutrón recién capturado demuestra ser inestable tan pronto se incorpora al núcleo. En este caso, el neutrón se transforma espontáneamente en un protón (que permanece en el núcleo) y un electrón (que escapa de inmediato). De este modo, como los soldados griegos que superaron las murallas de Troya al esconderse en un caballo de madera, los protones pueden meterse a hurtadillas en un núcleo disfrazados de neutrones.

Si el flujo en curso de neutrones sigue siendo elevado, cada núcleo puede absorber muchos neutrones antes de que el primero se



desintegre. Estos neutrones absorbidos con rapidez ayudan a crear un conjunto de elementos cuyo origen se identifica con el «proceso de captura rápida de neutrones», y difieren de la variedad de elementos que resultan cuando los neutrones son capturados despacio, cuando cada neutrón consecutivo se convierte en un protón antes de que el núcleo capture el siguiente.

Los procesos de captura tanto rápida como lenta de neutrones son los responsables de crear muchos de los elementos por lo demás no formados gracias a la fusión termonuclear tradicional. Los restantes elementos de la naturaleza se pueden fabricar por medio de otros procesos, entre ellos estampar fotones de alta energía (rayos gamma) contra núcleos de átomos pesados, que luego se descomponen en otros más pequeños.

A riesgo de simplificar en exceso el ciclo vital de una estrella de masa elevada, podemos afirmar que cada estrella vive generando y liberando la energía de su interior que le permite resistir a la gravedad. Sin esta producción de energía mediante la fusión termonuclear, cada bola estelar de gas se desmoronaría sin más bajo su propio peso. Este destino importa en estrellas que agotan la provisión de núcleos de hidrógeno (protones) en su centro. Como ya se ha señalado, tras transformar su hidrógeno en helio, a renglón seguido el centro de una estrella masiva fusionará helio para formar carbono, el carbono se convertirá en oxígeno, el oxígeno en neón, y así sucesivamente hasta llegar al hierro. Para llevar a cabo estas sucesivas fusiones de elementos cada vez más pesados hacen falta temperaturas cada vez más altas para que los núcleos superen su

repulsión natural. Por suerte, esto sucede por sí solo, pues al final de cada etapa intermedia, cuando se corta temporalmente la fuente de energía de la estrella, se colapsan las regiones interiores, aumenta la temperatura y entra en escena la siguiente vía de fusión. Como nada dura eternamente, al final la estrella se enfrenta a un gran problema: la fusión del hierro no libera energía, sino que la absorbe. Esto es una mala noticia para la estrella, que ahora ya no puede resistir a la gravedad sacándose del sombrero de la fusión nuclear un nuevo proceso de liberación de energía. Como en este punto la estrella se viene abajo de repente, su temperatura interna sube tan deprisa que a continuación tiene lugar una gigantesca explosión en la que la estrella se hace añicos las tripas.

A lo largo de cada explosión, la disponibilidad de neutrones, protones y energía permite a la supernova crear elementos de muchas maneras distintas. En su artículo de 1957, Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle combinaron: 1) los principios verificados de la mecánica cuántica; 2) la física de las explosiones; 3) las últimas secciones transversales de colisión; 4) los variados procesos que transmutan unos elementos en otros; y 5) lo básico de la teoría evolutiva estelar, para establecer definitivamente que las explosiones de supernovas constituyen la fuente primordial de todos los elementos del universo más pesados que el hidrógeno y el helio.

Con las estrellas de masa elevada como fuente de los elementos pesados, y con las supernovas como prueba irrefutable de la distribución de elementos, los cuatro magníficos encontraron gratis la solución de otro problema: si forjamos elementos más pesados que

el hidrógeno y el helio en los centros estelares, no hacemos ningún bien al resto del universo a menos que lancemos de algún modo esos elementos al espacio interestelar y estén así en condiciones de formar mundos con wombats. Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle unificaron nuestros conocimientos de la fusión nuclear en las estrellas con la producción de elementos visible en el conjunto del cosmos. Sus conclusiones han sobrevivido a décadas de análisis escéptico, por lo que su trabajo se considera un punto de inflexión en lo que sabemos sobre el funcionamiento del universo.

Sí, la Tierra y toda su vida provienen del polvo de estrellas. No, no hemos resuelto todos los problemas químicos cósmicos. Un curioso misterio contemporáneo rodea al tecnecio, que, en 1937, fue el primer elemento en ser creado artificialmente en laboratorios corrientes y molientes. (La palabra *tecnecio*, junto con otras que usan el prefijo *tec-*, deriva del griego *technetos*, que equivale a 'artificial'.) Todavía hemos de descubrir tecnecio en la Tierra, pero los astrónomos lo han observado en las atmósferas de una pequeña fracción de estrellas gigantes rojas de nuestra galaxia, lo cual no debería sorprendernos demasiado si no fuera por el hecho de que el tecnecio se desintegra para formar otro elemento, y lo hace con una vida media de tan sólo dos millones de años (una cifra muy inferior a la edad y la esperanza de vida de las estrellas donde lo observamos). Este enigma ha dado lugar a exóticas teorías que aún no gozan de consenso entre la comunidad de los astrofísicos.

Las gigantes rojas con estas propiedades químicas peculiares son infrecuentes, pero sí lo bastante irritantes para que una serie de

astrofísicos (sobre todo espectroscopistas) especializados en el tema hayan generado y distribuido el *Newsletter of Chemically Peculiar Red Giant Stars*. No disponible en la mayoría de los kioscos, esta publicación suele contener noticias de conferencias y actualizaciones sobre investigaciones aún en marcha. Para los científicos interesados, estos misterios químicos en curso tienen tanto atractivo como las cuestiones relacionadas con los agujeros negros, los cuásares y el universo temprano. Sin embargo, casi nunca leemos sobre ellos. ¿Por qué? Porque, para variar, los medios de comunicación han predeterminado lo que merece cobertura y lo que no. Al parecer, las noticias sobre el origen cósmico de cada elemento de nuestro cuerpo y del planeta no pasan el corte.

Tenemos, pues, la oportunidad de reparar el daño que la sociedad contemporánea nos ha causado. Hagamos un viaje por la tabla periódica, parando aquí y allá para observar los hechos más interesantes sobre los diversos elementos y para admirar cómo los ha fabricado todos el cosmos a partir del hidrógeno y el helio surgidos del Big Bang.

## Capítulo 10

### El zoo elemental

La tabla periódica de los elementos, creada con cariño por químicos y físicos durante los dos últimos siglos, plasma principios organizadores que explican el comportamiento químico de todos los elementos conocidos del universo, o que acaso descubramos algún día. Por esta razón, hemos de considerar la tabla periódica como un icono cultural, un ejemplo de la capacidad de nuestra sociedad para organizar su conocimiento. La tabla es testimonio de que la empresa científica es una aventura humana internacional, llevada a cabo no sólo en los laboratorios, sino también en los aceleradores de partículas y en las fronteras espaciales y temporales del conjunto del cosmos.

En medio de este merecido respeto, de vez en cuando una incorporación a la tabla periódica sorprenderá incluso a un científico experto como haría en un zoo uno de esos animales únicos en su especie concebidos y desarrollados por el doctor Seuss. ¿Cómo se explica, si no, que el sodio sea un metal muy reactivo, peligroso, que podemos cortar con un cuchillo de mantequilla, o que el cloro puro sea un gas mortífero, maloliente, pero que al combinar cloro y sodio obtengamos cloruro sódico, un compuesto inocuo esencial para la vida, más conocido como «sal»? Y ¿qué hay del hidrógeno y el oxígeno, dos de los elementos más abundantes en la Tierra y el universo? Uno es un gas explosivo, mientras que el otro fomenta la combustión

violenta; pero si juntamos los dos, tenemos agua líquida, que sirve para apagar incendios.

Entre todas las interacciones químicas en la pequeña tienda de posibilidades de la tabla periódica, hallamos los elementos más significativos del cosmos, que nos ofrecen la posibilidad de mirar la tabla con la lente de un astrofísico. Aprovecharemos la oportunidad y recorreremos la tabla bailando, saludando a las entradas más distinguidas y admirando sus pequeñas rarezas.

La tabla periódica subraya el hecho de que cada elemento de la naturaleza se diferencia de los otros por su «número atómico»; esto es, el número de protones (cargas eléctricas positivas) del núcleo del elemento. Los átomos completos tienen siempre girando alrededor del núcleo un número de electrones (cargas eléctricas negativas) igual al número atómico del elemento, por lo que el conjunto del átomo tiene carga eléctrica cero. Los diferentes isótopos de un elemento concreto tienen el mismo número de protones y electrones, pero distinto número de neutrones.

El **hidrógeno**, con un solo protón en el núcleo, es el elemento más simple y ligero, fabricado completamente durante los primeros minutos tras el Big Bang. De los 94 elementos presentes en la naturaleza, al hidrógeno le corresponden más de dos terceras partes de todos los átomos del cuerpo humano y más del 90% de todos los átomos del cosmos, incluyendo el Sol y sus planetas gigantes. El hidrógeno de dentro del planeta más masivo del Sol, Júpiter, nota tanta presión de las capas superpuestas que se comporta más como un metal conductor electromagnético que como un gas, y ayuda a

crear el campo magnético más fuerte entre los planetas solares. El químico inglés Henry Cavendish descubrió el hidrógeno en 1766, mientras experimentaba con  $H_2O$  (*hydro-genes* es la palabra griega equivalente a ‘formación de agua’, cuyo *gen* aparece en palabras como *genético*), aunque su fama entre los astrónomos se debe a haber sido el primero en calcular con precisión la masa de la Tierra midiendo la constante gravitatoria  $G$  que aparece en la famosa ecuación de Newton de la gravedad. Cada segundo de cada día y cada noche, cuatro mil quinientos millones de toneladas de núcleos de hidrógeno (protones) de movimiento rápido chocan para fabricar núcleos de helio en el centro del Sol, a 15 millones de grados (Celsius). Se transforma en energía aproximadamente el 1% de la masa implicada en esta fusión, con lo que el restante 99% queda en forma de helio.

En la Tierra podemos encontrar **helio**, segundo elemento más abundante del universo, sólo en algunas bolsas subterráneas de gas. La mayoría conocemos sólo el lado juguetón del helio: su uso en la lectura de códigos de barras. Si inhalamos helio, su baja densidad en comparación con los gases atmosféricos aumenta la frecuencia vibratoria dentro de la tráquea, por lo que al hablar nos sale la voz de Mickey Mouse. El cosmos contiene cuatro veces más helio que todos los demás elementos sumados (sin contar el hidrógeno). Uno de los pilares de la cosmología del Big Bang es la predicción de que, en el conjunto del cosmos, no menos del 8% de todos los átomos son de helio, que la bien mezclada bola de fuego primigenia fabricó durante los inmediatos retortijones posteriores al nacimiento. Como la fusión termonuclear del hidrógeno dentro de las estrellas produce helio

adicional, algunas regiones del cosmos pueden acumular una cantidad de helio superior al inicial 8%, pero —tal como predice el Big Bang— nadie ha descubierto todavía una región de nuestra galaxia ni de ninguna otra con menos.

Unos treinta años antes de que se descubriera y aislara el helio en la Tierra, los astrofísicos lo habían detectado en el Sol gracias a los reveladores rasgos observados en el espectro lumínico del Sol durante el eclipse total de 1868. Como es lógico, a este material antes desconocido lo llamaron helio por Helios, el dios griego del astro rey. Con el 92% de flotabilidad del hidrógeno en el aire, pero sin las explosivas características del hidrógeno que destruyeran el dirigible alemán *Hindenburg*, el helio es el gas elegido para los enormes personajes globo del desfile del Día de Acción de Gracias de Macy, lo que convierte a los famosos grandes almacenes en el segundo consumidor de helio del mundo, sólo por detrás del ejército norteamericano.

El **litio**, el tercer elemento más simple del universo, tiene tres protones en el núcleo. Como el hidrógeno y el helio, el litio se fabricó poco después del Big Bang, pero, a diferencia del helio, que a menudo deriva de reacciones nucleares posteriores, el litio será *destruido* por toda reacción nuclear que se produzca en las estrellas. Por tanto, es de esperar que no encontremos objetos ni regiones con mucho litio —no más de un 0,0001% del total— producido en el universo temprano. Como pronostica nuestro modelo de formación de elementos durante la primera hora, nadie ha descubierto todavía una galaxia con una cantidad de litio que supere este límite superior. La combinación del



límite superior del helio y el límite inferior del litio nos procura una poderosa limitación doble que debemos aplicar en la verificación de la teoría de la cosmología del Big Bang. Un test similar del modelo del Big Bang, superado con éxito, compara la abundancia de núcleos de deuterio, cada uno con un protón y un neutrón, con la cantidad de hidrógeno corriente. Durante los primeros minutos, la fusión produjo los dos tipos de núcleos, pero mucho más del de hidrógeno simple (un solo protón).

Como pasa con el litio, los dos elementos siguientes de la tabla periódica, el **berilio** y el **boro** (con cuatro y cinco protones, respectivamente, en el núcleo), deben su origen sobre todo a la fusión termonuclear en el universo temprano, y aparecen sólo en proporciones relativamente moderadas en el conjunto del cosmos. La escasez, en la Tierra, de los tres elementos más ligeros tras el hidrógeno y el helio es una mala noticia para quienes los ingieran sin querer, pues la evolución ha procedido básicamente sin tropezarse con ellos. Curiosamente, ciertas dosis controladas de litio parecen aliviar determinados trastornos mentales.

Con el **carbono**, elemento número seis, la tabla periódica experimenta un florecimiento antológico. Los átomos de carbono, con seis protones en el núcleo, aparecen en más clases de moléculas que la suma de todas las moléculas sin carbono. La abundancia cósmica de núcleos de carbono —forjados en los centros de las estrellas, revueltos y enviados a la superficie, y liberados en copiosas cantidades en la Vía Láctea— se une a la facilidad para formar combinaciones químicas y lo convierten en el elemento más idóneo

en el que cimentar la química y la diversidad de la vida. Ganando por muy poco al carbono en cuanto a cantidad, el **oxígeno** (ocho protones en el núcleo) también es un elemento muy abundante y reactivo, fabricado igualmente en estrellas avejentadas y otras que explotan como supernovas, y liberado de las mismas. Tanto el oxígeno como el carbono constituyen ingredientes muy importantes para la vida que conocemos. Los mismos procesos fabricaron y distribuyeron el **nitrógeno**, elemento número siete, que también aparece en grandes proporciones en todo el universo.

Pero ¿qué pasa con la vida que no conocemos? ¿Podrían otras formas vitales utilizar un elemento distinto como base de sus formas complejas? ¿Qué tal una vida centrada en el **silicio**, elemento número 14? En la tabla periódica, el silicio se sitúa directamente debajo del carbono, lo cual significa (véase lo útil que puede ser la tabla para quienes conocen sus secretos) que puede crear los mismos tipos de compuestos químicos que el carbono —ocupando el sitio de este—. Al final, cabe esperar que el carbono resulte mejor que el silicio, no sólo porque abunda diez veces más en el cosmos, sino también porque el silicio forma enlaces químicos que son o bien considerablemente más fuertes, o bien sensiblemente más débiles que los del carbono. En concreto, la fuerza de los enlaces entre el silicio y el oxígeno permite conformar rocas duras, mientras que las moléculas complejas basadas en el silicio carecen de la resistencia necesaria para superar las tensiones ecológicas que sí exhiben los átomos basados en el carbono. Estos hechos no impiden a los escritores de ciencia ficción abogar por el silicio, lo que mantiene alerta la especulación

exobiológica y nos lleva a preguntarnos cómo será el aspecto de la primera forma de vida auténticamente alienígena.

Además de ser un ingrediente activo de la sal común, el **sodio** (once protones en el núcleo) brilla en este gran territorio como sodio gaseoso caliente en la mayoría de las farolas municipales. Estas farolas «arden» más brillantes, más tiempo, y utilizan menos energía que las bombillas incandescentes convencionales. Se presenta en dos variedades: las lámparas de alta presión, de color blanco amarillento, y las más raras de baja presión, que parecen anaranjadas. Resulta que, aunque toda la contaminación lumínica perjudica a la astronomía, las lámparas de sodio de baja presión causan menos daño porque su contaminación, mucho más limitada en cuanto al color, se puede explicar fácilmente y eliminar de los datos telescópicos. En un modelo de cooperación ciudad-telescopio, toda la ciudad de Tucson, Arizona, la población más cercana al Observatorio Nacional Kitt Peak, ha sustituido, gracias a un acuerdo con los astrónomos locales, todas sus farolas por lámparas de sodio de baja presión —que también resultan ser más eficientes y, por tanto, permiten ahorrar energía a la ciudad.

El **aluminio** (doce protones en el núcleo) supone casi el 10% de la corteza de la Tierra, si bien fue desconocido entre los antiguos y poco familiar para nuestros abuelos al combinarse con gran eficacia con otros elementos. Su aislamiento e identificación tuvieron que esperar a 1827, y no entró en los hogares hasta finales de la década de 1960, cuando las latas de hojalata y el papel de estaño cedieron el paso a las latas y el papel de aluminio. Como el aluminio pulido constituye

un reflector cuasi perfecto de la luz visible, los astrónomos actuales cubren casi todos los espejos de los telescopios con una fina película de átomos de este elemento.

Aunque el **titanio** (trece protones en el núcleo) tiene una densidad un 70% mayor que la de aluminio, es el doble de fuerte. Su fuerza y su ligereza relativa hacen que el titanio —el noveno elemento más abundante en la corteza de la Tierra— sea el favorito para muchas aplicaciones, como en ciertos componentes de los aviones militares, que requieren un metal fuerte y liviano.

En la mayoría de las ubicaciones cósmicas, los átomos de oxígeno superan en número a los de carbono. En las estrellas, en cuanto cada átomo de carbono se ha agarrado a uno de los átomos de oxígeno para formar moléculas de monóxido de carbono o dióxido de carbono, los átomos de oxígeno sobrantes se unen a otros elementos como el titanio. Los espectros de la luz procedente de estrellas gigantes rojas están llenos de rasgos debidos al óxido de titanio (moléculas de  $\text{TiO}_2$ ), que en sí mismo no es desconocido para las estrellas de la Tierra: los zafiros y los rubíes deben sus radiantes asterismos a impurezas de óxido de titanio dentro de sus retículas de cristal, y luego ciertas impurezas de óxido de aluminio añaden un color adicional. Además, la pintura blanca utilizada en las cúpulas de los telescopios lleva óxido de titanio, que al parecer irradia los rayos infrarrojos con gran eficacia, lo cual reduce muchísimo el calor diurno acumulado en la cúpula. Al anochecer, con la cúpula abierta, la temperatura del aire cerca del telescopio disminuye más deprisa hasta la temperatura del aire nocturno, lo que reduce la refracción atmosférica y permite a la

luz de las estrellas y otros objetos cósmicos llegar con más claridad y nitidez. Aunque el nombre del titanio no remite a un objeto cósmico, sí deriva de los titanes de la mitología griega, igual que Titán, la luna más grande de Saturno.

Quizás el carbono sea el elemento más significativo de la vida, pero según muchos indicadores el **hierro**, elemento número 26, es el más importante del universo. Las estrellas masivas fabrican elementos en su centro, que desfilan por la tabla periódica siguiendo la pauta del número creciente de protones por núcleo, desde el helio al carbono, al oxígeno, al neón, y así hasta el hierro. Con 26 protones y al menos el mismo número de neutrones en el núcleo, el hierro tiene una cualidad característica derivada de las reglas de la mecánica cuántica que rigen el modo en que interactúan los protones y los neutrones: sus núcleos presentan la máxima energía de enlace por partícula nuclear (protón o neutrón). Esto significa algo muy simple. Si queremos dividir núcleos de hierro (en lo que los físicos denominan «fisión»), hemos de suministrarles energía adicional. Por otro lado, si combinamos átomos de hierro (proceso denominado «fusión»), también absorben energía. Hace falta energía para fusionar núcleos de hierro y para separarlos. En cuanto a los demás elementos, es aplicable sólo una mitad o la otra de esta doble descripción. No obstante, las estrellas están ocupadas utilizando  $E = mc^2$  para convertir masa en energía, algo que deben hacer para oponerse a la tendencia a desmoronarse bajo su propia gravedad. Cuando las estrellas fusionan núcleos en su centro, la naturaleza exige, y obtiene, fusión nuclear que libera energía. Para cuando una estrella masiva

fusiona la mayoría de los núcleos de su centro para formar hierro, ha agotado todas sus opciones de uso de la fusión termonuclear para generar energía, pues cualquier otra fusión no liberará energía, sino que la requerirá. Privado de una fuente de energía procedente de la fusión termonuclear, el centro de la estrella se colapsará bajo su propio peso y acto seguido rebotará en una explosión colosal conocida como supernova, que eclipsará mil millones de soles durante más de una semana. Estas supernovas se producen debido a la especial propiedad de los núcleos de hierro: su negativa a fusionarse o dividirse sin un aporte de energía.

Al describir el hidrógeno y el helio; el litio, el berilio y el boro; el carbono, el nitrógeno y el oxígeno; y el aluminio, el titanio y el hierro, hemos analizado casi todos los elementos clave que hacen que el cosmos —y la vida en la Tierra— sigan su marcha.

Por puras razones cósmicas, echemos un rápido vistazo a algunas incorporaciones menos claras a la tabla periódica. Casi seguro que nunca poseemos cantidades significativas de estos elementos, pero los científicos los consideran no sólo fascinantes *riffs* en la prodigalidad de la naturaleza, sino también agentes muy útiles en circunstancias especiales. Veamos, por ejemplo, el dúctil metal **galio** (treinta y un protones en el núcleo). El galio tiene un punto de fusión tan bajo que el calor de la mano lo licua. Aparte de esta demostración de salón, proporciona a los astrofísicos el ingrediente activo del cloruro de galio, variante de la sal común (cloruro sódico), que resulta valioso en experimentos para detectar neutrinos en el centro del Sol. Para captar estos escurridizos neutrinos, los astrofísicos cogen una

cuba de cien toneladas de cloruro de galio líquido y la entierran bien hondo bajo tierra (para eliminar efectos de partículas menos penetrantes), y luego observan cuidadosamente los resultados de cualquier choque entre los neutrinos y los núcleos de galio, que se convierten en núcleos de germanio, cada uno con treinta y dos protones. Todas las transformaciones de galio en germanio producen fotones de rayos X, que se pueden detectar y medir cada vez que un núcleo recibe un impacto. Utilizando estos «telescopios de neutrinos» de cloruro de galio, los astrofísicos resolvieron lo que se conocía como el «problema de los neutrinos solares», el hecho de que detectores de tipos más tempranos de neutrinos encontrasen estas partículas en cantidades más pequeñas de las previstas por la teoría de la fusión termonuclear en el centro del Sol.

Todos los núcleos del elemento **tecnecio** (número atómico 43) son radiactivos, y tras unos momentos, o unos cuantos millones de años, se descomponen en otros tipos de núcleos. Como es lógico, en la Tierra sólo encontramos tecnecio en los aceleradores de partículas, donde lo fabricamos a demanda. Por razones que aún no son lo bastante claras, el tecnecio vive en la atmósfera de un subconjunto selecto de estrellas gigantes rojas. Como señalamos en el capítulo anterior, esto no alarmaría a los astrofísicos; sólo que el tecnecio tiene una vida media de sólo dos millones de años, cifra muy inferior a la edad y a la esperanza de vida de las estrellas donde lo encontramos. Esto demuestra que las estrellas no pueden haber nacido con el material, pues, en ese caso, a estas alturas no quedaría nada. Los astrofísicos también carecen de mecanismos para crear tecnecio en

el centro de una estrella *y* dragarlo hasta la superficie para observarlo, una realidad incómoda que ha generado explicaciones exóticas, que aún están lejos del consenso en la comunidad de los astrofísicos.

Junto con el osmio y el platino, el **iridio** es uno de los tres elementos más densos de la tabla periódica. Dos pies cúbicos de iridio (número atómico 77) pesan tanto como un Buick, lo que lo convierte en uno de los mejores pisapapeles del mundo, capaz de desafiar a todos los ventiladores y brisas de las oficinas. El iridio también brinda a los científicos la evidencia más irrefutable. En todo el mundo, aparece una fina capa de material rico en iridio en el estrato geológico que marca el famoso límite K-T, establecido hace sesenta y cinco millones de años. A juicio de la mayoría de los biólogos, no es de extrañar que el límite marque también el tiempo en que se extinguieron todas las especies terrestres mayores que una panera, incluidos los legendarios dinosaurios. El iridio es infrecuente en la superficie de la Tierra, pero diez veces más común en los asteroides metálicos. Al margen de la teoría preferida de cada uno sobre la extinción de los dinosaurios, la de un asteroide asesino de 15 kilómetros de diámetro procedente del espacio exterior, capaz de levantar una manta de escombros que bloquee la luz, antes de caer despacio varios meses después, parece ahora muy convincente.

No está claro qué habría pensado Albert al respecto, pero en los desechos de la primera prueba con la bomba de hidrógeno en el Pacífico (noviembre de 1952) los físicos descubrieron un elemento



antes desconocido, que llamaron **einstenio** en su honor. «Armagedio» habría sido más adecuado.

Mientras el helio toma el nombre del mismo Sol, el de otros diez elementos de la tabla periódica corresponde a objetos que describen órbitas solares.

**Fósforo**, que en griego significa ‘portador de luz’, era el viejo nombre del planeta Venus cuando apareció antes de la salida del Sol en el cielo del alba.

**Selenio** proviene de *selene*, palabra griega para la Luna; se llama así porque siempre ha sido detectado junto con el telurio, que ya había recibido este nombre por la Tierra, que en latín es *tellus*.

El 1 de enero de 1801, primer día del siglo XIX, el astrónomo italiano Giuseppe Piazzi descubrió un nuevo planeta que daba vueltas alrededor del Sol en el tramo sospechosamente grande entre Marte y Júpiter. Siguiendo con la tradición de poner a los planetas nombres de dioses romanos, Piazzi llamó al objeto Ceres por la diosa de las cosechas, que también aporta la raíz de la palabra *cereal*. El entusiasmo de la comunidad científica ante el hallazgo de Piazzi fue tal que el siguiente elemento que se descubrió recibió el nombre de **cerio** en su honor. Dos años después fue descubierto otro planeta que describía órbitas alrededor del Sol en el mismo tramo que Ceres. Este objeto recibió el nombre de Palas, por la diosa romana de la sabiduría; como ocurriera antes con el cerio, el siguiente elemento que se descubrió fue denominado **paladio** en su honor. La fiesta de los nombres terminó al cabo de unas décadas, después de que se detectaran muchos más planetas como estos prácticamente en la

misma ubicación, y después de que un análisis más detallado revelara que estos objetos eran muchísimo más pequeños que los planetas más pequeños conocidos. En el sistema solar, se hacía visible una nueva franja consistente en trozos pequeños e irregulares de piedra y metal. Resultó que Ceres y Palas no eran planetas, sino asteroides, objetos situados sólo a unos centenares de kilómetros. Habitan el cinturón de asteroides, del que ahora sabemos que contiene millones de objetos, de los cuales los astrónomos han catalogado y bautizado más de quince mil (número un tanto superior al de los elementos de la tabla periódica).

El metal **mercurio**, que a temperatura ambiente adopta una forma líquida viscosa, debe su nombre al veloz dios mensajero romano Mercurio. Lo mismo que el planeta Mercurio, el más rápido de los planetas del sistema solar.

El nombre de **torio** deriva de Thor, el dios escandinavo que empuña el martillo y el trueno y corresponde al Júpiter del relámpago de la mitología romana. ¡Diantre! Imágenes recientes de regiones polares de Júpiter obtenidas por el Telescopio Hubble dejan ver importantes descargas eléctricas en niveles profundos de sus turbulentas capas de nubes.

Saturno, el planeta preferido de mucha gente, no da nombre a ningún elemento, pero la representación de Urano, Neptuno y Plutón es famosa. El elemento **uranio**, descubierto en 1789, recibió el nombre del planeta descubierto por William Herschel sólo ocho años antes. Todos los isótopos del uranio son inestables, se descomponen espontánea, pero lentamente, en elementos más ligeros, proceso que

va acompañado de liberación de energía. Si logramos acelerar el ritmo de descomposición con una reacción en cadena entre núcleos, conseguimos la liberación de energía necesaria para una bomba. En 1945, los Estados Unidos hicieron estallar la primera bomba de uranio (denominada comúnmente bomba atómica o bomba A) que sería utilizada en la guerra: redujo a cenizas la ciudad japonesa de Hiroshima. Con noventa y dos protones en el núcleo, el uranio gana el premio al elemento más grande y pesado presente en la naturaleza, si bien, en lugares donde se extrae mineral de uranio, aparecen cantidades pequeñísimas de elementos aún mayores y más pesados. Si Urano merecía un elemento, Neptuno también. A diferencia del uranio, sin embargo, que fue identificado poco después que su planeta, el **neptunio** fue descubierto en 1940 en el acelerador de partículas denominado Ciclotrón de Berkeley, noventa y siete años después de que el astrónomo alemán John Galle descubriera Neptuno en un punto del cielo pronosticado como sitio más probable por el matemático francés Joseph Le Verrier, quien estudió el inexplicable comportamiento orbital de Urano y dedujo la existencia de un planeta más lejano. Igual que Neptuno viene inmediatamente después de Urano en el sistema solar, el neptunio aparece justo después del uranio en la tabla periódica de los elementos.

Un grupo de físicos de las partículas que trabajaban en el Ciclotrón de Berkeley descubrieron más de media docena de elementos no presentes en la naturaleza, entre ellos el **plutonio**, que va detrás del neptunio en la tabla periódica y deriva el nombre de Plutón, que el joven astrónomo Clyde Tombaugh descubrió en 1930 gracias a

fotografías tomadas en el Observatorio Lowell de Arizona. Como pasara con el descubrimiento de Ceres ciento veintinueve años antes, se disparó el entusiasmo. Plutón era el primer planeta descubierto por un norteamericano y, a falta de datos observacionales precisos, se creía que tenía una masa y un tamaño equivalentes a los de Urano y Neptuno. A medida que fueron mejorando nuestras mediciones del tamaño de Plutón, este siguió haciéndose más pequeño. Sus dimensiones no se aclararon hasta finales de la década de 1970, durante las misiones Voyager al sistema solar exterior. Ahora sabemos que el frío, gélido, Plutón es, con mucho, el planeta más pequeño del Sol, con la embarazosa peculiaridad de ser más pequeño que las seis lunas más grandes del sistema solar. Igual que sucediera con los asteroides, poco después los astrónomos descubrieron centenares de otros objetos en ubicaciones similares, en este caso en el sistema solar exterior con órbitas parecidas a las de Plutón. Estos objetos indicaban la existencia de un depósito hasta entonces indocumentado de pequeños objetos helados, actualmente denominado «cinturón de Kuiper de cometas». Un purista diría que, como Ceres y Palas, Plutón se coló en la tabla periódica haciendo trampa. Al igual que los núcleos de uranio, los de plutonio son radiactivos. Estos núcleos constituían el componente activo de la bomba atómica lanzada sobre la ciudad japonesa de Nagasaki, sólo tres días después de la bomba de uranio de Hiroshima, lo que aceleró el final de la Segunda Guerra Mundial. Los científicos pueden utilizar pequeñas cantidades de plutonio, que produce energía a un ritmo continuo, moderado, para accionar generadores termoeléctricos de

radioisótopos (RTG, por sus siglas en inglés) a fin de que las naves espaciales viajen al sistema solar exterior, donde la intensidad de la luz del Sol disminuye por debajo del nivel utilizable por los paneles solares. Una libra (450 gramos) de este plutonio generará 10 millones de kilovatios-hora de energía calorífica, suficiente para hacer funcionar una bombilla casera durante once mil años, o a un ser humano más o menos durante el mismo tiempo. Valiéndose aún del plutonio como fuente de energía para mandar mensajes a la Tierra, las dos naves espaciales Voyager lanzadas en 1977 han viajado mucho más allá de la órbita de Plutón. Una de ellas, a una distancia casi cien veces superior a la de la Tierra respecto del Sol, ha empezado a entrar en el verdadero espacio interestelar tras abandonar la burbuja creada por el flujo solar de partículas con carga eléctrica.

Y así terminamos nuestro viaje cósmico por la tabla periódica de los elementos químicos, justo en el borde del sistema solar. Por razones que no acertamos a comprender, a muchas personas no les gustan las sustancias químicas, lo que acaso explicaría el permanente empeño por quitarlas de los alimentos. Tal vez los nombres químicos kilométricos suenen igual de peligrosos. Pero en este caso deberíamos echar la culpa a los químicos, no a las sustancias químicas. Personalmente, me siento muy cómodo con las sustancias químicas: son los componentes de nuestras estrellas favoritas, y también de nuestros mejores amigos.

## Parte IV

### El origen de los planetas

#### **Contenido:**

*Capítulo 11. Cuando los mundos eran jóvenes*

*Capítulo 12. Entre los planetas*

*Capítulo 13. Mundos innumerables: planetas más allá del sistema solar*

### Capítulo 11

#### Cuando los mundos eran jóvenes

En nuestros intentos por desvelar la historia del cosmos, hemos ido descubriendo que los aspectos más misteriosos son los que tienen que ver con los *orígenes* del propio universo, de sus estructuras más masivas (galaxias y cúmulos de galaxias) y de las estrellas que proporcionan casi toda la luz. Cada historia sobre los orígenes desempeña un papel vital, no sólo en la explicación de cómo un cosmos aparentemente amorfo produjo complejos ensamblajes de distintos tipos de objetos, sino también en la determinación de cómo y por qué, catorce mil millones de años después del Big Bang, nos encontramos vivos en la Tierra y nos preguntamos: ¿cómo ha sucedido todo esto?

Estos misterios surgen en parte porque durante la «era oscura» cósmica, cuando la materia estaba sólo comenzando a organizarse en unidades autónomas como las estrellas y las galaxias, la mayor parte de la misma generó poca radiación detectable o ninguna. La era

oscura nos ha legado escasísimas posibilidades, todavía imperfectamente exploradas, para observar la materia durante las fases tempranas de su organización. Esto conlleva, a su vez, que hemos de confiar, en un grado inquietantemente elevado, en nuestras teorías sobre cómo debe comportarse la materia, habiendo relativamente pocos aspectos en los que podamos verificar dichas teorías con datos observacionales.

Si pasamos al origen de los planetas, los misterios se intensifican. Carecemos no sólo de *observaciones* de las fases iniciales, cruciales, de la formación planetaria, sino también de *teorías* satisfactorias acerca de cómo empezaron a formarse los planetas. Para celebrar lo positivo, observamos en los últimos años que la pregunta «¿Qué creó los planetas?» se ha ampliado considerablemente. Durante casi todo el siglo XX, la pregunta se centraba en la familia del Sol y los planetas. En la década pasada, tras haber descubierto más de cien «planetas exosolares» alrededor de estrellas relativamente cercanas, los astrofísicos han conseguido bastantes más datos de los que deducir la historia temprana de los planetas; en concreto, datos que permiten determinar cómo se formaron estos objetos densos, oscuros y astronómicamente pequeños junto con las estrellas que les dieran luz y vida.

\* \* \* \*

Los astrofísicos tendrán actualmente más datos, pero no cuentan con mejores respuestas que antes. De hecho, el descubrimiento de planetas exosolares, muchos de los cuales se mueven en órbitas muy distintas de las de los planetas del Sol, ha complicado el asunto en

muchos aspectos, de modo que la historia de la formación planetaria no está ahora más cerca de su final. En un resumen simple, podríamos decir que no existe una buena explicación sobre cómo *empezaron* los planetas a crearse a partir de gas y polvo, si bien podemos percibir fácilmente cómo el proceso de formación, una vez en marcha, fabricó objetos grandes partiendo de otros pequeños, y que lo hizo en un período de tiempo bastante breve.

Los inicios de la creación de los planetas plantean un problema ciertamente peliagudo, hasta el punto de que uno de los expertos mundiales en el tema, Scott Tremaine, de la Universidad de Princeton, ha explicado (en parte en broma) las leyes de Tremaine sobre la formación de los planetas. Según la primera de estas leyes, «todas las predicciones teóricas sobre las propiedades de los planetas exosolares son erróneas», y según la segunda, «la predicción más segura sobre la formación planetaria es que no tuvo lugar». El humor de Tremaine pone de relieve el hecho insoslayable de que los planetas en efecto existen, pese a nuestra incapacidad para explicar este enigma astronómico.

Hace más de dos siglos, al intentar explicar la formación del Sol y sus planetas, Immanuel Kant propuso una «hipótesis nebular», en virtud de la cual una masa arremolinada de gas y polvo que rodeara la estrella en formación se condensaba en aglomerados que llegarían a ser los planetas. En líneas generales, la hipótesis de Kant sigue siendo la base de los enfoques astronómicos modernos sobre la formación planetaria, tras haber triunfado sobre el concepto, en boga durante la primera mitad del siglo XX, de que los planetas solares



surgieron de un estrecho pasadizo de otra estrella situada junto al Sol. En este escenario, las fuerzas gravitatorias entre las estrellas habrían atraído masas de gas de cada una, y parte de este gas quizá se enfrió y condensó para formar los planetas. Esta hipótesis, promovida por el famoso astrofísico británico James Jeans, tenía el defecto (o el atractivo, según fuera la inclinación de cada uno) de volver rarísimos los sistemas planetarios, pues los encuentros lo bastante directos entre estrellas seguramente se producirían sólo unas cuantas veces durante la vida de una galaxia entera. En cuanto los astrónomos hubieron calculado que casi todo el gas extraído de las estrellas se evaporaría en vez de condensarse, abandonaron la hipótesis de Jeans y volvieron a la de Kant, lo que da a entender que muchas de las estrellas, si no la mayoría, han de tener planetas que describan órbitas a su alrededor.

En la actualidad, los astrofísicos cuentan con pruebas convincentes de que las estrellas no se forman una a una, sino por miles y decenas de miles, dentro de inmensas nubes de gas y polvo que a la larga dan origen aproximadamente a un millón de estrellas individuales. Uno de estos semilleros estelares gigantes ha producido la nebulosa de Orión, la región de formación de estrellas más próxima al sistema solar. Durante unos cuantos millones de años, esta región habrá generado centenares de miles de estrellas nuevas, las cuales soplarán casi todo el gas y el polvo restantes de la nebulosa al espacio, de modo que los astrónomos de dentro de cien mil generaciones observarán las estrellas jóvenes ya sin los restos de las envolturas de su nacimiento.

En la actualidad, los astrofísicos usan radiotelescopios para cartografiar la distribución de polvo y gas frío en las inmediaciones de las estrellas jóvenes. Por lo general, los mapas revelan que estas no navegan por el espacio sin materia circundante, sino que normalmente tienen discos giratorios de materia, de tamaño parecido al sistema solar, pero compuestos de gas hidrógeno (y otros gases menos abundantes) esparcido por todas partes con partículas de polvo. El término *polvo* hace referencia a grupos de partículas que contienen, cada una, varios millones de átomos y tienen un tamaño muy inferior al punto con el que finaliza esta frase. Muchos de estos granos de polvo constan sobre todo de átomos de carbono, unidos para formar grafito (principal componente de la mina de un lápiz). Otros son mezclas de átomos de silicio y oxígeno; en esencia, piedras diminutas con mantos de hielo que rodean su centro rocoso.

La formación de estas partículas de polvo en el espacio interestelar tiene sus propios misterios y sus detalladas teorías, que podemos saltarnos con la tranquilidad de pensar que el cosmos es polvoriento. Para fabricar este polvo, los átomos se han reunido por millones. En vista de las bajísimas densidades existentes entre las estrellas, los lugares más probables para este proceso parecen ser las atmósferas exteriores ampliadas de estrellas frías, que soplan suavemente material en el espacio.

\* \* \* \*

La producción de partículas de polvo interestelar supone un primer paso esencial en el camino hacia los planetas. Esto es cierto no sólo en los planetas sólidos como el nuestro, sino también en los planetas

gigantes gaseosos, ejemplificados, en la familia del Sol, por Júpiter y Saturno. Aunque estos planetas consisten sobre todo en hidrógeno y helio, los astrofísicos han llegado a la conclusión —partiendo de cálculos de la estructura interna de los planetas, así como de mediciones de la masa— de que los gigantes gaseosos deben de tener centros sólidos. En Júpiter, con una masa total trescientos dieciocho veces superior a la de la Tierra, varias masas equivalentes a la de esta residen en un núcleo sólido. Saturno, con una masa noventa y cinco veces mayor que la de la Tierra, también tiene un centro sólido con una masa una o dos docenas de veces superior a la de nuestro planeta. Los dos planetas solares gaseosos más pequeños, Urano y Neptuno, tienen un núcleo sólido proporcionalmente más grande. En estos planetas, con una masa quince y diecisiete veces mayor que la de la Tierra, respectivamente, el centro quizá suponga la mitad de la masa terrestre.

En estos cuatro planetas, y seguramente en todos los planetas gigantes recientemente descubiertos alrededor de otras estrellas, los núcleos planetarios desempeñaron un papel fundamental en el proceso de formación: primero fue el centro, y luego el gas, atraído por el centro sólido. Por tanto, toda la formación de los planetas requiere que primero se forme un buen terrón de materia sólida. De los planetas del Sol, Júpiter tiene el mayor de estos núcleos, seguido por el de Saturno, el de Neptuno y el de Urano; la Tierra figura en quinta posición, en orden idéntico al de su tamaño. Las historias de formación de los planetas plantean una pregunta básica: ¿qué hace

la naturaleza para que el polvo se coagule y forme conglomerados de materia a miles de kilómetros?

La respuesta tiene dos partes, una conocida y otra desconocida; y la segunda, como es lógico, está más cerca del origen. En cuanto formamos objetos a media milla, que los astrónomos denominan «planetesimales», cada uno tendrá una gravedad lo bastante elevada para atraer con éxito a otros objetos del mismo tipo. Las fuerzas gravitatorias mutuas entre los planetesimales crearán primero centros planetarios y luego planetas a un ritmo dinámico, de manera que, en cuestión de unos millones de años, habremos pasado desde una multitud de conglomerados, cada uno del tamaño de una ciudad pequeña, a mundos totalmente nuevos, a punto para adquirir una fina capa de gases atmosféricos (en el caso de Venus, la Tierra y Marte) o una capa enormemente gruesa de hidrógeno y helio (en los cuatro gigantes gaseosos, que dan vueltas alrededor del Sol a distancias lo bastante grandes para acumular grandes cantidades de los dos gases más ligeros). Para los astrofísicos, la transición desde los planetesimales de media milla de diámetro a los planetas se reduce a una serie de modelos informáticos bien conocidos que producen una gran variedad de detalles planetarios, pero casi siempre revelan planetas interiores que son pequeños, rocosos y densos, así como planetas exteriores que son grandes y (salvo por su núcleo) gaseosos y enrarecidos. Durante este proceso, muchos de los planetesimales, así como algunos de los objetos más grandes que fabrican, se ven arrojados al sistema solar por interacciones gravitatorias con objetos todavía más grandes.

Todo esto funciona bastante bien en un ordenador, pero, de entrada, construir los planetesimales de media milla de diámetro no está al alcance de las actuales facultades de los astrofísicos para integrar sus conocimientos físicos con sus programas informáticos. La gravedad no puede crear planetesimales, pues las moderadas fuerzas gravitatorias entre objetos pequeños no los mantendrían unidos de forma efectiva. Existen dos posibilidades teóricas para producir planetesimales a partir del polvo, ninguna de ellas lo bastante satisfactoria. Un modelo sugiere la formación de planetesimales mediante adición: cuando las partículas de polvo chocan y se pegan entre sí. La adición funciona bien en principio, toda vez que la mayoría de las partículas de polvo se pegan efectivamente tras encontrarse. Esto explica el origen de las pelusas de polvo bajo la cama, y si nos imaginamos pelusas enormes creciendo alrededor del Sol, podemos, con un esfuerzo mental mínimo, dejarlas aumentar hasta llegar a tener el tamaño de una silla, de una casa, de una manzana de casas, y muy pronto el de los planetesimales, listos para la acción gravitatoria seria.

Por desgracia, a diferencia de la producción de pelusas reales, el crecimiento de planetesimales al modo de las pelusas parece requerir mucho más tiempo. La datación radiactiva de núcleos inestables detectados en los meteoritos más viejos da a entender que la formación del sistema solar requirió como máximo unas cuantas decenas de millones de años, y muy probablemente bastante menos. En comparación con la edad actual de los planetas, aproximadamente cuatro mil quinientos cincuenta millones de años,

es una minucia, sólo un 1% (o menos) del período total de existencia del sistema solar. El proceso de adición necesita mucho más que unas pocas decenas de millones de años para crear planetesimales a partir de polvo; por tanto, a menos que a los astrofísicos se les haya pasado por alto algo importante que les impida entender cómo se acumula el polvo para construir estructuras grandes, hace falta otro mecanismo que permita superar las barreras de la formación planetesimal.

Este otro mecanismo quizá consista en vórtices gigantes que recogen partículas de polvo por billones, y las arremolinan rápidamente hacia su necesaria aglomeración en objetos bastante más grandes. Dado que la nube contractiva de gas y polvo que se convirtió en el Sol y sus planetas al parecer adquirió cierta rotación, pronto cambió su forma global de esfera a placa, con lo que el Sol en formación quedó como una esfera contractiva relativamente densa en el centro, rodeada por un disco muy aplanado de material en órbita alrededor de esa esfera. A día de hoy, las órbitas de los planetas del Sol, que siguen todas la misma dirección y están casi en el mismo plano, son testimonio de una distribución en disco de la materia que creó los planetesimales y los planetas. Dentro de un disco giratorio así, los astrofísicos prevén la aparición de «inestabilidades» ondulantes, regiones alternas de densidad mayor y menor. Las partes más densas de estas inestabilidades reúnen tanto material gaseoso como polvo que flota dentro del gas. En el período de unos cuantos miles de años, estas inestabilidades se convierten en vórtices capaces de barrer y recoger grandes cantidades de polvo en volúmenes relativamente pequeños.

Aunque este modelo de vórtice para la formación de planetesimales es prometedor, todavía no ha conquistado a quienes buscan explicaciones sobre cómo el sistema solar produjo lo que necesitaban los planetas jóvenes. Tras un examen detallado, el modelo brinda explicaciones mejores para los centros de Júpiter y Saturno que para los de Urano y Neptuno. Como los astrónomos no pueden de ningún modo demostrar que las inestabilidades necesarias para que funcione el modelo se produjeron realmente, es mejor que no juzguemos. La existencia de numerosos cometas y asteroides pequeños, que se parecen a los planetesimales en cuanto a tamaño y composición, respalda el concepto de que, hace miles de millones de años, millones de planetesimales crearon los planetas. En consecuencia, consideremos la formación de los planetesimales como un fenómeno comprobado, bien que poco conocido, que de algún modo llena un vacío clave en nuestro conocimiento, lo que nos deja en disposición de admirar lo que pasa cuando chocan.

En este escenario, no cuesta nada imaginar que, una vez que el gas y el polvo de alrededor del Sol hubieron formado unos cuantos billones de planetesimales, esta armada de objetos colisionó, fabricó objetos más grandes y al final creó los cuatro planetas interiores del Sol y los núcleos de los cuatro planetas gigantes. No debemos pasar por alto las lunas de los planetas, objetos más pequeños que dan vueltas alrededor de los planetas del Sol a excepción de los más interiores, Mercurio y Venus. Las mayores de estas lunas, con diámetros que oscilan entre unos cuantos centenares y unos cuantos miles de kilómetros, parecen encajar bien en el modelo que hemos

ideado, pues es de suponer que también surgieron de choques planetesimales. La creación de lunas cesó cuando las colisiones hubieron construido los mundos satélites con su tamaño actual, sin duda (cabe suponer) porque para entonces los planetas cercanos, con su mayor gravedad, habían tomado posesión de casi todos los planetesimales próximos. Hemos de incluir en este cuadro los cientos de miles de asteroides que describen órbitas alrededor de Marte y Júpiter. Los más grandes, de unos cientos de kilómetros de diámetro, deberían asimismo haberse desarrollado gracias a choques planetesimales, tras lo cual no se habría producido más crecimiento debido a interferencias gravitatorias del cercano planeta gigante Júpiter. Los asteroides más pequeños, menos de una milla de diámetro, acaso representen planetesimales desnudos, objetos que crecieron a partir del polvo, pero que jamás chocaron unos contra otros, de nuevo gracias a la influencia de Júpiter, tras alcanzar tamaños idóneos para la interacción gravitatoria. Para las lunas que giran en torno a los planetas gigantes, este escenario parece funcionar bastante bien. Los cuatro planetas gigantes tienen familias de satélites cuyo tamaño oscila entre lo grande o muy grande (hasta el de Mercurio) y lo pequeño o incluso minúsculo. Las más pequeñas de estas lunas, menos de una milla de diámetro, pueden ser también planetesimales desnudos, privados de crecimiento colisional adicional por la presencia de objetos cercanos que ya habían crecido mucho más. En cada una de estas cuatro familias de satélites, casi todas las lunas más grandes giran alrededor del planeta en la misma dirección y casi en el mismo plano. No podemos resistirnos a explicar



este resultado con el mismo argumento con el que explicamos por qué los planetas describen órbitas en la misma dirección y casi en el mismo plano: alrededor de cada planeta, una nube giratoria de gas y polvo produjo terrones de materia que crecieron hasta alcanzar los tamaños de los planetesimales y luego de las lunas.

En el sistema solar interior, sólo nuestra Tierra tiene una luna de tamaño considerable. Mercurio y Venus no tienen ninguna, mientras que las dos lunas en forma de patata de Marte, Fobos y Deimos, abarcan cada una sólo unos cuantos kilómetros, por lo que deberían representar las fases más tempranas de la formación de objetos grandes a partir de planetesimales. Según ciertas teorías, el origen de estas lunas está en el cinturón de asteroides, de modo que sus actuales órbitas alrededor de Marte serían fruto del éxito gravitatorio de Marte al capturar estos dos antiguos cuerpos celestes.

Y ¿qué pasa con nuestra Luna, de 3.500 kilómetros de diámetro, que dentro del sistema solar sólo superan en tamaño Titán, Tritón, Ganímedes y Calisto (y que empata de hecho con Ío y Europa)? ¿También se desarrolló gracias a colisiones planetesimales, como los cuatro planetas interiores?

Esto pareció una suposición bastante razonable hasta que los seres humanos trajeron piedras lunares a la Tierra para su análisis minucioso. Hace más de tres décadas, la composición química de las muestras rocosas traídas por las misiones Apolo impuso dos conclusiones, una a cada lado de las posibilidades respecto al origen de la Luna. Por una parte, la composición de las piedras lunares se parece tanto a la de las de la Tierra que la hipótesis de que nuestro

satélite se formó totalmente aparte de nosotros ya no parece sostenible. Por otra, la composición de la Luna difiere de la de la Tierra lo bastante para demostrar que la Luna no se formó exclusivamente a partir de material terrestre. Entonces, si la Luna no se formó aparte de la Tierra ni a partir de la Tierra, ¿cómo se formó? Por increíble que pueda parecer a primera vista, la actual respuesta a este acertijo se basa en la hipótesis en otro tiempo popular de que la Luna se formó debido a un tremendo impacto, al principio de la historia del sistema solar, que sacó material de la cuenca del Pacífico y lo lanzó al espacio, donde se fusionó para constituir nuestro satélite. Según esta nueva visión, que ya ha obtenido una amplia aceptación como explicación más válida, la Luna se formó *efectivamente* debido al impacto de un objeto gigante en la Tierra, pero dicho objeto era tan grande —más o menos del tamaño de Marte— que como es lógico añadió material propio al expulsado del planeta. Buena parte de este material arrojado al espacio por la fuerza del golpe acaso desapareció de las inmediaciones, pero quedó una cantidad suficiente para que cuajara y se formara el satélite, hecho de la Tierra y de materia exterior. Todo esto pasó hace cuatro mil quinientos millones de años, durante los primeros cien millones de años posteriores al inicio de la formación de los planetas.

Si un objeto del tamaño de Marte golpeó la Tierra en esa era pasada, ¿dónde está actualmente? El impacto difícilmente lo rompería en trozos tan pequeños que no podamos verlos; los telescopios más avanzados son capaces de distinguir, en el sistema solar, objetos tan pequeños como los planetesimales que dieron origen a los planetas.

La respuesta a esta objeción nos brinda un nuevo cuadro del sistema solar temprano, que hace hincapié en su naturaleza violenta, colisional. El hecho de que los planetesimales crearan un objeto del tamaño de Marte, por ejemplo, no garantizaba que este objeto fuera a perdurar mucho tiempo. No es sólo que este objeto chocara contra la Tierra, sino que los trozos de tamaño considerable generados por la colisión también habrían seguido colisionando con la Tierra y los otros planetas internos, entre sí, y con la Luna (tan pronto se hubiera formado). En otras palabras, durante los primeros cientos de millones de años imperó en el sistema solar interior un terror colisional, y los pedazos de objetos gigantes que golpeaban los planetas mientras se formaban llegaron a ser parte de los mismos. El impacto de un objeto del tamaño de Marte en la Tierra tan sólo se contó entre los más importantes en un auténtico bombardeo, una época de destrucción que llevó a los planetesimales y otros objetos mucho mayores a estrellarse contra nuestro planeta y sus vecinos.

Visto desde otro ángulo, este mortífero bombardeo simplemente señaló las etapas finales del proceso de formación. El proceso culminó en el sistema solar que vemos hoy, que poco ha cambiado a lo largo de más de cuatro mil millones de años: una estrella corriente, alrededor de la cual giran ocho planetas (además del gélido Plutón, más parecido a un cometa gigante que a un planeta), centenares de miles de asteroides, billones de meteoroides (fragmentos más pequeños que cada día golpean la Tierra a miles) y billones de cometas (bolas de nieve sucia formadas a distancias docenas de veces superiores a la de la Tierra respecto del Sol). Y no nos olvidemos de

los satélites de los planetas, que se han movido, con pocas excepciones, en órbitas con una prolongada estabilidad desde su nacimiento, hace cuatro mil seiscientos millones de años. Vamos a echar ahora un vistazo a los desechos que siguen describiendo órbitas alrededor del Sol; porque se trata de desechos capaces tanto de crear como de destruir vida en mundos como el nuestro.

## Capítulo 12

### Entre planetas

De lejos, nuestro sistema solar parece vacío. Si lo encerrásemos en una esfera lo bastante grande para contener la órbita de Neptuno, el Sol y todos sus planetas y sus lunas ocuparían poco más que una billonésima de todo el espacio de la esfera. En todo caso, este dato presupone que el espacio interplanetario está básicamente vacío. De cerca, sin embargo, resulta que los espacios entre los planetas contienen toda suerte de rocas macizas, guijarros, bolas de hielo, partículas de polvo, flujos de partículas cargadas y sondas artificiales. El espacio interplanetario está también impregnado de campos magnéticos y gravitatorios poderosísimos e invisibles, pero aun así muy capaces de afectar a los objetos de nuestras proximidades. Estos objetos pequeños y campos de fuerzas cósmicas suponen una seria amenaza permanente para quien intente desplazarse de un lugar a otro del sistema solar. Del mismo modo, los de mayor tamaño suponen una amenaza para la vida en la Tierra si llegan a chocar —como han hecho alguna que otra vez— con el planeta a velocidades de muchos kilómetros por segundo.

Ciertas regiones locales del espacio están tan poco vacías que la Tierra, durante su viaje orbital de 30 kilómetros por segundo, atraviesa a diario centenares de toneladas de desechos interplanetarios, la mayor parte, fragmentos no mayores que un grano de arena. Casi toda esta materia se quema en la atmósfera superior de la Tierra, golpeando el aire con tanta energía que las

partículas entrantes se vaporizan. Nuestra frágil especie evolucionó debajo de este manto de aire protector. Desechos más grandes, del tamaño de una pelota de golf, se calientan deprisa, pero de manera desigual, y a menudo se rompen en muchos trocitos más pequeños antes de vaporizarse. Y aún otros pedazos más grandes chamuscan sus superficies, pero, por lo demás, siguen su camino, al menos en parte, hasta el suelo. Cabría pensar que, a estas alturas, tras cuatro mil seiscientos millones de viajes alrededor del Sol, la Tierra habrá «aspirado» todos los desechos posibles en su ruta orbital. En esta dirección hemos hecho progresos considerables: las cosas eran mucho peores antes. Durante los primeros quinientos mil millones de años tras la formación del Sol y sus planetas, llovió sobre la Tierra tanta basura que la energía de los impactos generó una atmósfera muy caliente y una superficie esterilizada.

En concreto, un fragmento de basura espacial fue tan importante que dio lugar a la formación de la Luna. La inesperada escasez de hierro y otros elementos de masa elevada en el satélite, dato deducido de las muestras lunares traídas a la Tierra por los astronautas del *Apolo*, indica que muy probablemente consta de materia arrojada desde la corteza y el manto terrestres relativamente pobres en hierro por un choque de refilón con un protoplaneta caprichoso del tamaño de Marte. Algunos de los restos en órbita derivados de ese encontronazo se fusionaron para formar nuestro encantador satélite de baja densidad. Aparte de este episodio de interés periodístico de hace unos cuatro mil quinientos millones de años, el período de bombardeo intenso que soportó la Tierra en su infancia fue semejante al

experimentado por todos los planetas y otros objetos grandes del sistema solar. Cada uno sufrió un daño parecido, de tal modo que la Luna y Mercurio, sin aire ni erosión, conservan todavía casi todos los cráteres producidos en este período.

Además de los restos correspondientes a esta época de formación, el espacio interplanetario contiene también rocas de todo tamaño procedentes de Marte, la Luna y seguramente la Tierra al tambalearse sus superficies debido a impactos de alta energía. Ciertos estudios informáticos sobre impactos de meteoritos demuestran de forma concluyente que algunas rocas superficiales cercanas a la zona cero serán lanzadas hacia arriba con la velocidad suficiente para soltarse del roncal gravitatorio. A partir de ciertos descubrimientos sobre meteoritos marcianos en la Tierra, podemos llegar a la conclusión de que cada año llueven sobre nuestro planeta unas 1000 toneladas de rocas originarias de Marte. Quizá llega la misma cantidad de desechos desde la Luna. Así pues, para obtener piedras de la Luna no hacía falta ir a la Luna. A la Tierra nos han llegado algunas, no escogidas por nosotros en todo caso, pero durante el programa Apolo aún desconocíamos este hecho.

Si Marte albergó vida alguna vez —probablemente hace miles de millones de años, cuando el agua líquida fluía libre por su superficie—, ciertas bacterias desprevenidas, escondidas como polizones en los rincones y recovecos (sobre todo en los recovecos) de piedras expulsadas, acaso llegaron a la Tierra sin pagar. Ya sabemos que algunas variedades de bacterias pueden sobrevivir a largos períodos de hibernación, así como a altas dosis de radiación solar

ionizante a la que estarían expuestas en su recorrido hasta la Tierra. La existencia de bacterias aerotransportadas no es una idea disparatada ni ciencia ficción. El concepto tiene incluso un nombre sonoro: *panspermia*. Y si Marte produjo vida antes de que lo hiciera la Tierra, y desde Marte, en rocas expulsadas, viajó vida simple que fertilizó nuestro planeta, será que descendemos de los marcianos. Este hecho parece sortear las preocupaciones medioambientales por los astronautas que estornudan en la superficie de Marte y propagan así sus gérmenes en el paisaje alienígena. En realidad, aunque tuviéramos todos origen marciano, nos encantaría rastrear la trayectoria de la vida desde Marte a la Tierra, por lo que estas preocupaciones conservan una importancia vital.

La mayoría de los asteroides del sistema solar viven y trabajan en el Cinturón Principal, una región aplanada alrededor del Sol, ubicada entre las órbitas de Marte y Júpiter. Tradicionalmente, los descubridores de asteroides nombran sus objetos como les parece. Algunos artistas han imaginado este cinturón como una región abarrotada de cosas que flotan en el plano del sistema solar, aunque de hecho se extiende a lo largo de millones de kilómetros a diferentes distancias del Sol. Este cinturón de asteroides incluye objetos con una masa total inferior al 5% de la de la Luna, que a su vez tiene una masa apenas por encima del 1% de la de la Tierra. Aunque al principio parezca algo insignificante, los asteroides suponen una callada amenaza cósmica a largo plazo para nuestro planeta. Las perturbaciones acumuladas de sus órbitas crean continuamente un subconjunto mortal, quizá de unos cuantos miles de unidades, cuyos



alargados trayectos las llevan tan cerca del Sol que cruzan la órbita de la Tierra, con lo cual existen posibilidades de colisión. Según un cálculo aproximado, casi todos estos asteroides que cruzan la Tierra la golpearán en el lapso de unos cientos de millones de años. Los objetos de tamaño superior a una milla de diámetro llevan consigo suficiente energía para desestabilizar el ecosistema del planeta y provocar que la mayoría de las especies estén en peligro de extinción. Mal asunto.

Entretanto, los asteroides no son los únicos objetos espaciales que suponen un riesgo para la vida en la Tierra. El astrónomo holandés Jan Oort fue el primero en detectar que en las frías honduras del espacio interestelar, mucho más lejos del Sol que cualquier planeta, todavía giran alrededor de nuestra estrella muchísimos restos congelados de las primeras fases de la formación del sistema solar. Esta «nube de Oort» de billones de cometas se extiende hasta distancias a medio camino de las estrellas más cercanas, miles de veces superiores al tamaño del sistema planetario del Sol.

Gerard Kuiper, contemporáneo norteamericano-holandés de Oort, sugirió que algunos de estos objetos congelados integraron en otro tiempo el disco de material del que se formaran los planetas, y ahora describen órbitas alrededor del Sol a distancias bastante mayores a la de Neptuno, pero muy inferiores a las de los cometas de la nube de Oort. En conjunto, constituyen lo que los astrónomos denominan actualmente cinturón de Kuiper, una franja circular de cometas desparramados que comienza justo más allá de la órbita de Neptuno, incluye a Plutón y se extiende hacia fuera —desde Neptuno— varias

veces la distancia de este respecto del Sol. En el cinturón de Kuiper, el objeto conocido más lejano, llamado Sedna, por una diosa inuit, tiene un diámetro que equivale a dos tercios del de Plutón. Sin un planeta masivo que los perturbe, casi todos los cometas del cinturón de Kuiper conservarán sus órbitas durante miles de millones de años. Como pasa con el cinturón de asteroides, un subconjunto de objetos del cinturón de Kuiper se desplaza en órbitas excéntricas que cruzan los caminos de otros planetas. La órbita de Plutón, que podemos considerar un cometa inmensamente grande, así como las órbitas de un conjunto de hermanas pequeñas de Plutón, denominadas plutinos, atraviesan la trayectoria de Neptuno alrededor del Sol. Otros objetos del cinturón de Kuiper, desplazados a la fuerza de sus habituales órbitas amplias, de vez en cuando se zambullen hasta el final en el sistema solar interior cruzando despreocupadamente órbitas planetarias. En este grupo se incluye Halley, el cometa más famoso.

La nube de Oort es responsable de los cometas de período largo, aquellos cuyo período orbital supera en mucho una vida humana. A diferencia de los cometas del cinturón de Kuiper, los cometas de la nube de Oort pueden llover en el sistema solar interior desde cualquier ángulo y dirección. El cometa más brillante de las tres últimas décadas, el Hyakutake (1996), procedía de la nube de Oort, muy por encima del plano del sistema solar, y no tiene previsto regresar pronto por aquí.

Si nuestros ojos pudieran ver campos magnéticos, Júpiter parecería diez veces más grande que la luna llena en el cielo. La nave espacial

que visite Júpiter debe ser diseñada para que ese fuerte magnetismo no la afecte. Tal como descubrió en 1831 el químico y físico inglés Michael Faraday, si movemos un cable por un campo magnético, generaremos una diferencia de voltaje a lo largo del mismo. Por eso, las sondas espaciales metálicas de movimiento rápido pueden tener en su interior corrientes eléctricas inducidas. Estas corrientes interactúan con el campo magnético local de tal modo que se ralentiza el movimiento de la sonda. Este efecto, acaso explicaría el misterioso enlentecimiento de las dos naves *Pioneer* al abandonar el sistema solar. Ni la *Pioneer 10* ni la *Pioneer 11*, lanzadas en la década de 1970, han viajado en el espacio tan lejos como preveían los modelos dinámicos de sus movimientos. Tras tener en cuenta los efectos de polvo espacial que nos encontramos en el recorrido, junto con retrocesos de la nave debidos a pérdidas en los tanques de combustible, este concepto de interacción magnética —en este caso con el campo magnético del sol— quizá procure la mejor explicación de la ralentización de los *Pioneers*.

La mejora en los métodos de detección y las sondas espaciales volando en formación ha incrementado el número de lunas planetarias conocidas tan deprisa que contar lunas se ha vuelto algo casi obsoleto; parecen multiplicarse a medida que hablamos. Lo que actualmente importa es si algunas de estas lunas son sitios divertidos para ser visitados o estudiados. Según algunos indicadores, las del sistema solar son mucho más interesantes que los planetas alrededor de los cuales giran. Las dos de Marte, Fobos y Deimos, aparecen (no con estos nombres) en *Los viajes de Gulliver*, de Jonathan Swift. El

caso es que estas dos pequeñas lunas no fueron descubiertas hasta más de cien años después; a menos que tuviera telepatía, seguramente Swift se situó entre la única luna de la Tierra y las cuatro (entonces conocidas) de Júpiter.

La luna de la Tierra tiene un diámetro aproximadamente cuatrocientas veces menor que el del Sol, pero también está cuatrocientas veces más cerca de nosotros que del Sol, teniendo en cuenta que este y la Luna se ven del mismo tamaño en el cielo — coincidencia que no se da en ninguna otra combinación planeta-luna del sistema solar y que concede a los terrícolas unos eclipses solares totales excepcionalmente fotogénicos. La Tierra también se ha acoplado al período de rotación de la Luna, con lo que este es igual a su período de revolución alrededor de la Tierra. La captura ha surgido de la gravedad del planeta, que ejerce una mayor fuerza en las partes más densas del interior de la Luna y hace que estas estén siempre vueltas hacia la Tierra. Dondequiera y cuandoquiera que pase esto, como sucede en las cuatro grandes lunas de Júpiter, la Luna acoplada muestra una sola cara al planeta anfitrión.

El sistema de lunas de Júpiter dejó atónitos a los astrónomos cuando estos consiguieron su primera imagen de calidad. Ío, la luna grande más próxima al planeta, ha estado sometida a acoplamiento de marea y a tensiones estructurales debidas a las interacciones gravitatorias con Júpiter y las otras lunas grandes. Estas interacciones aportan a Ío (aproximadamente del mismo tamaño que nuestra luna) la energía necesaria para fundir parte de su interior rocoso, lo que la convierte en el objeto más activo del sistema solar desde el punto de vista

volcánico. La segunda luna grande de Júpiter, Europa, tiene tanta H<sub>2</sub>O que su calor interno, surgido de las mismas interacciones que afectan a Ío, ha fundido el hielo de debajo de la superficie, con lo que tenemos un mar líquido con una cubierta de hielo.

Las imágenes de cerca de la superficie de Miranda, una de las lunas de Urano, revelan patrones muy desiguales, como si la pobre hubiera explotado y alguien hubiera pegado de nuevo los trozos a toda prisa. El origen de estos rasgos exóticos sigue siendo un misterio, pero también podría radicar en algo simple, como el afloramiento irregular de láminas de hielo.

La solitaria luna de Plutón, Caronte, es tan grande y está tan cerca de Plutón que este y Caronte están sometidos mutuamente a acoplamiento de marea —ambos objetos tienen períodos de rotación equivalentes a sus períodos de revolución alrededor de su centro común de masa—. Por convención, los astrónomos ponen a las lunas de los planetas nombres de personalidades griegas significativas de la vida del dios que da nombre al planeta, si bien para este utilizan el equivalente romano (Júpiter en vez de Zeus, por ejemplo). Como los dioses clásicos llevaron una vida social complicada, no faltan precisamente personajes.

*Sir* William Herschel fue el primero en descubrir un planeta situado más allá de los fácilmente visibles a simple vista, y tenía ganas de ponerle el nombre del rey que le había ayudado en sus investigaciones. Si *sir* William se hubiera salido con la suya, la lista de planetas habría sido esta: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno y George. Por suerte, se impuso la sensatez, de modo

que unos años después el nuevo planeta recibió el nombre clásico de Urano. Sin embargo, hasta el día de hoy sigue siendo tradición la sugerencia inicial de dar a las lunas del planeta nombres de personajes de Shakespeare o del poema de Alexander Pope «El rizo robado». Entre las diecisiete lunas de Urano encontramos Ariel, Cordelia, Desdémona, Julieta, Ofelia, Portia, Puck o Umbriel, aparte de dos nuevas, Calibán y Sycorax, descubiertas hace poco, en 1997.

\* \* \* \*

El Sol pierde material de su superficie a razón de 200 millones de toneladas por segundo (que casualmente casi equivale al ritmo del agua que fluye por la cuenca amazónica). El Sol pierde esta masa en el «viento solar», que está formado por partículas cargadas de alta energía. Viajando a más de 1500 kilómetros por segundo, estas partículas cruzan en tropel el espacio interplanetario, donde a menudo son desviadas por campos magnéticos planetarios. En respuesta, las partículas bajan en espiral a los polos magnéticos norte y sur del planeta, y chocan con moléculas de gas atmosférico para producir vistosos resplandores aurorales. El Telescopio Espacial Hubble ha descubierto auroras cerca de los polos tanto de Saturno como de Júpiter. En la Tierra, las auroras boreales y las australes (luces septentrionales y meridionales) nos recuerdan, de forma intermitente, lo fantástico que es tener una atmósfera protectora.

Desde el punto de vista técnico, la atmósfera de la Tierra se extiende muy por encima de la superficie que concebimos en general. Normalmente, los satélites «en órbita terrestre baja» se desplazan a alturas comprendidas entre 150 y 600 kilómetros y completan una

órbita en unos 90 minutos. Aunque a estas alturas nadie puede respirar, quedan algunas moléculas atmosféricas —suficientes para extraer lentamente energía orbital de satélites desprevenidos—. Para combatir esta sangría, los satélites en órbita baja requieren impulsos intermitentes, no vaya a ser que caigan a la Tierra y se quemen en la atmósfera. La manera más sensata de definir el borde de nuestra atmósfera es viendo dónde disminuye la densidad de sus moléculas gaseosas hasta igualar la densidad de las moléculas gaseosas del espacio interplanetario. Con esta definición, la atmósfera de la Tierra se extiende a lo largo de miles de kilómetros en el espacio. Dando vueltas muy por encima de este nivel, 37.000 kilómetros sobre la superficie (una décima parte de la distancia a la Luna), están los satélites de comunicaciones que llevan noticias e imágenes alrededor de la Tierra. A esta altura particular, un satélite observa no sólo que la atmósfera de la Tierra es irrelevante, sino también que, gracias al menor tirón del planeta debido a la mayor distancia, su velocidad en órbita disminuye hasta un punto en que necesita veinticuatro horas para completar cada vuelta. Al moverse en órbitas que se corresponden exactamente con el ritmo de rotación de la Tierra, estos satélites parecen mantenerse «inmóviles» por encima de un punto concreto del ecuador, por lo cual son ideales para transmitir señales desde una parte de la superficie terrestre a otra.

Según la ley de Newton, aunque la gravedad de un planeta es cada vez menor a medida que nos alejamos de él, ninguna distancia la reducirá a cero, y un objeto con una masa muy grande puede ejercer una fuerza gravitatoria considerable incluso desde muy lejos. El

planeta Júpiter, con su poderoso campo gravitatorio, aleja muchos cometas que, de otro modo, causarían estragos en el sistema solar interior. Al hacer esto, Júpiter actúa como un escudo gravitatorio de la Tierra, lo que nos ha concedido largos períodos (entre cincuenta y cien millones de años) de relativa tranquilidad. Sin la protección de Júpiter, la vida compleja habría tenido dificultades para llegar a ser más compleja e interesante, al estar siempre en peligro de extinción a causa de un impacto devastador.

Casi todas las sondas enviadas al espacio han sacado provecho de los campos gravitatorios de los planetas. Por ejemplo, la sonda *Cassini*, lanzada desde la Tierra el 15 de octubre de 1997 con destino a Saturno para un encuentro a finales de 2004, fue asistida gravitatoriamente dos veces por Venus, una por la Tierra (en un acercamiento de regreso) y otra por Júpiter. Como una carambola de billar a varias bandas, son habituales las trayectorias de un planeta a otro valiéndose de tirachinas gravitatorias. De lo contrario, nuestras minúsculas sondas no tendrían velocidad ni energía suficientes para llegar a su meta.

Uno de nosotros dos es ahora responsable de un fragmento de basura interplanetaria del sistema solar. En noviembre de 2000, el asteroide 1994KA del Cinturón Principal, descubierto por David Levy y Caroline Shoemaker, fue bautizado como «13123 Tyson». Una distinción divertida, pero tampoco es para alardear; como ya se ha señalado, muchos asteroides llevan nombres familiares, como Jody, Harriet o Thomas. Y otros se llaman Merlín, James Bond o Santa. Como son casi 20.000, el recuento de asteroides con órbitas bien establecidas



(y el criterio para asignarles nombres y números) quizá pronto escape a nuestra capacidad para bautizarlos. Tanto si llega ese día como si no, existe el curioso consuelo de que nuestro trozo de desecho cósmico no está solo, pues desparramado entre los planetas se suma a una larga lista de otros pedazos con nombres de personas reales o de ficción.

Según la última comprobación, el asteroide 13123 Tyson no se dirigía hacia nosotros, por lo que no podemos echarle la culpa de iniciar ni de poner fin a la vida en la Tierra.

## Capítulo 13

### Mundos inseparables: planetas más allá del sistema solar

*Y por lo que respecta a Dios, aunque se nos manifiesta en esos innumerables mundos que apenas distinguimos sobre nuestras cabezas, ¿debemos buscarlo en otra parte que en la que nos colocó? Aquel que pudiera llegar a comprender lo que hay en el resto de su vasta inmensidad, y ver compuesto el universo de mil mundos, observar el movimiento y el enlace de un sistema con otros sistemas, reconocer otros planetas, otros soles, los diferentes seres que pueblan cada astro, aquel sería quien pudiese decir por qué Dios hizo todas las cosas como las hizo.*

ALEXANDER POPE, *Ensayo sobre el hombre* (1733)

Hace casi cinco siglos, Nicolás Copérnico desenterró una hipótesis que el astrónomo griego Aristarco había sugerido en su época. Lejos de ocupar el centro del cosmos, decía Copérnico, la Tierra pertenece a la familia de planetas que describen órbitas alrededor del Sol.

Aunque muchos seres humanos todavía no han aceptado este hecho, pues en el fondo creen que la Tierra permanece inmóvil mientras el cielo gira alrededor, los astrónomos llevan tiempo presentando convincentes argumentos según los cuales Copérnico dijo la verdad sobre la naturaleza de nuestro hogar cósmico. La conclusión de que la Tierra es sólo uno de los planetas del Sol da a entender de

inmediato que otros planetas se parecen en esencia al nuestro, y que podrían muy bien tener sus propios habitantes, dotados, como nosotros, de planes y sueños, trabajo, juego y fantasía.

Durante muchos siglos, los astrónomos que se valían de telescopios para observar centenares de miles de estrellas individuales carecieron de la capacidad para percibir si alguna de estas estrellas tenía planetas propios o no. Sus observaciones sí revelaron que nuestro Sol es una estrella totalmente representativa, cuyos gemelos próximos existen en gran número en toda la galaxia de la Vía Láctea. Si el Sol tiene una familia planetaria, también podrían tenerla otras estrellas, con sus planetas igualmente capaces de dar vida a criaturas de todas las formas posibles. Por expresar esta opinión de una manera que la autoridad papal interpretó como ofensiva, Giordano Bruno fue quemado en la hoguera en 1600. En la actualidad, un turista puede abrirse camino entre las multitudes de las terrazas del Campo dei Fiori de Roma para llegar hasta la estatua de Bruno en el centro, y luego pararse un momento a reflexionar sobre el poder de las ideas (o de quienes las tienen) para triunfar sobre aquellos que querrían reprimirlas.

Tal como nos enseña el destino de Bruno, imaginar vida en otros mundos se cuenta entre las ideas más potentes que haya concebido jamás la mente humana. Si esto no fuera así, Bruno habría vivido hasta una edad más avanzada y la NASA andaría peor de fondos. Así pues, las conjeturas sobre la vida en otros mundos se han centrado durante toda la historia, como sigue haciendo la NASA, en los planetas que giran alrededor del Sol. Sin embargo, en nuestra

búsqueda de vida más allá de la Tierra, se ha producido una gran glaciación: ninguno de los otros mundos de nuestro sistema solar parece especialmente apto para la vida.

Aunque esta conclusión apenas hace justicia a los muchísimos caminos posibles mediante los cuales podía surgir y evolucionar la vida, el hecho es que las exploraciones iniciales de Marte y Venus, así como las de Júpiter y sus lunas grandes, no nos han proporcionado ningún dato convincente. Más bien al contrario: se han evidenciado muchas condiciones sumamente hostiles para la vida tal como la conocemos. Aún quedan muchos estudios por hacer, y por suerte (para quienes se implican mentalmente en este esfuerzo) hay algunos en marcha, sobre todo los que indagan en Marte. En cualquier caso, el veredicto de vida extraterrestre en el sistema solar muestra tantas probabilidades de resultar negativo que ahora las mentes más brillantes suelen dirigir su mirada más allá de nuestro vecindario cósmico, al inmenso despliegue de mundos posibles que describen órbitas alrededor de estrellas distintas del Sol.

\* \* \* \*

Hasta 1995, la posibilidad de que hubiera planetas dando vueltas alrededor de otras estrellas había sido pura especulación. Con la excepción de algunos desechos del tamaño de la Tierra en órbita en torno a restos de estrellas explosionadas (que casi con toda seguridad se habían formado tras el estallido de supernovas y apenas pueden considerarse planetas), los astrofísicos no habían encontrado un solo planeta exosolar, un mundo que describiese órbitas alrededor de una estrella distinta del Sol. Al final de ese año se produjo el espectacular

anuncio del primer descubrimiento; unos meses después, hubo otros cuatro; y finalmente, con las compuertas abiertas, se fueron encontrando mundos nuevos cada vez más deprisa. En la actualidad, sabemos que los planetas exosolares que giran alrededor de otras estrellas superan claramente en número a los conocidos mundos que describen órbitas alrededor del Sol. La cifra supera los cien y casi seguro que seguirá aumentando en los años venideros.

Para describir estos mundos recién descubiertos, y analizar las repercusiones de su existencia en la búsqueda de vida extraterrestre, hemos de afrontar un hecho concreto difícil de creer: aunque los astrofísicos afirman que no sólo saben de la existencia de estos planetas, sino que también han deducido su masa, las distancias respecto de sus estrellas progenitoras, el tiempo que tardan en completar sus órbitas e incluso la forma de dichas órbitas, nadie ha visto ni fotografiado nunca uno solo de estos planetas exosolares.

¿Cómo podemos saber tantas cosas de planetas que no hemos visto nunca? La respuesta radica en el trabajo detectivesco tan conocido por quienes estudian la luz de las estrellas. Al separar esa luz en su espectro de colores, y al comparar los espectros de miles de estrellas, los especialistas reconocen diferentes categorías gracias estrictamente a las proporciones entre las intensidades de los distintos colores que aparecen en los espectros. En otro tiempo, estos astrofísicos fotografiaban espectros, pero en la actualidad usan dispositivos sensibles que registran digitalmente cuánta luz estelar de cada color concreto llega a la Tierra. Aunque las estrellas estén a billones de kilómetros de nosotros, su naturaleza esencial ha llegado

a ser un libro abierto. Ahora los astrofísicos saben determinar con facilidad —midiendo simple y llanamente el espectro de los colores de la luz estelar— qué estrellas se parecen más al Sol, cuáles son un tanto más calientes y luminosas, y cuáles son más frías e intrínsecamente más tenues.

Pero también pueden hacer más. Cada vez más familiarizados con la distribución de colores en los espectros de diversos tipos de estrellas, los astrofísicos son capaces de identificar rápidamente un patrón conocido en el espectro de la estrella, que por lo general presenta una ausencia parcial o total de luz de colores concretos. Suelen reconocer un patrón así, pero observan que los colores que lo forman se han desplazado ligeramente a los extremos rojo o violeta del espectro, por lo que ahora todos los postes indicadores son o bien algo más rojos, o bien algo más violetas de lo normal.

Los científicos caracterizan estos colores según su longitud de onda, que mide la separación entre las sucesivas crestas de las ondas lumínicas. Como se corresponden con los colores percibidos por los ojos y el cerebro, la especificación de longitudes de onda simplemente nombra los colores con más precisión que el habla normal. Si los astrofísicos observan un patrón familiar en la intensidad de la luz medida para miles de colores diferentes, pero observan que todas las longitudes de onda del patrón son (por ejemplo) el 1% más largas de lo habitual, llegan a la conclusión de que los colores de las estrellas han cambiado debido al efecto Doppler, que describe lo que pasa cuando miramos un objeto que o bien se nos acerca, o bien se aleja de nosotros. Si, por ejemplo, un objeto se nos aproxima, o nos

acercamos nosotros a él, advertimos que todas las longitudes de onda de la luz que detectamos son *más cortas* que las medidas en un objeto idéntico en reposo con respecto a nosotros mismos. Si el objeto se aleja, o nos alejamos de él, todas las longitudes de onda son *más largas* que las de un objeto en reposo. La desviación respecto de la situación en reposo depende de la velocidad relativa entre la fuente de luz y quienes la observan. Para velocidades mucho menores a la de la luz (300.000 kilómetros por segundo), el cambio fraccional en todas las longitudes de onda de la luz, denominado «desplazamiento Doppler», equivale a la proporción entre la velocidad de acercamiento o de retroceso y la velocidad de la luz.

Durante la década de 1990, dos equipos de astrónomos, uno de los Estados Unidos y otro de Suiza, se dedicaron a incrementar la precisión con la que podían medir los cambios Doppler en la luz de las estrellas. Y lo hicieron no sólo porque los científicos siempre prefieren hacer mediciones exactas, sino porque tenían un objetivo muy claro: detectar la existencia de *planetas* mediante el estudio de la luz de *estrellas*.

¿Por qué este enfoque indirecto de la detección de planetas exosolares? Porque de momento este método supone el único efectivo para descubrirlos. Si el sistema solar ofrece alguna guía sobre las distancias a las que los planetas giran alrededor de las estrellas, debemos concluir que estas distancias equivalen sólo a una diminuta fracción de las distancias entre las estrellas. Las estrellas vecinas más próximas al Sol están aproximadamente medio millón de veces más lejos de nosotros que la distancia entre el Sol y su planeta más íntimo,

Mercurio. Incluso la distancia entre Plutón y el Sol es más de cinco mil veces menor que la distancia a Alfa Centauro, nuestro sistema estelar más cercano. Estas separaciones astronómicamente minúsculas entre las estrellas y sus planetas, combinadas con la debilidad con que un planeta refleja luz de su estrella, hacen que nos resulte casi imposible ver realmente ningún planeta situado más allá del sistema solar. Imaginemos, por ejemplo, que, instalado en un planeta que da vueltas alrededor de una de las estrellas de Alfa Centauro, un astrofísico apunta su telescopio hacia el Sol y trata de localizar Júpiter, su planeta más grande. La distancia entre el Sol y Júpiter es cincuenta mil veces menor que la distancia al Sol, y Júpiter brilla con una intensidad que es una mil millonésima parte de la de nuestra estrella. A los astrofísicos les gusta comparar esto con el problema de ver una luciérnaga junto al brillo de un reflector. Quizá lo hagamos algún día, pero de momento el intento de observar planetas exosolares escapa a nuestras posibilidades tecnológicas.

El efecto Doppler permite otro planteamiento. Si estudiamos una estrella con atención, podemos medir cuidadosamente cualquier cambio que aparezca en el desplazamiento Doppler de la luz de esa estrella. Estos cambios pueden surgir de modificaciones en la velocidad a la que la estrella está acercándose o alejándose de nosotros. Si los cambios resultan ser cíclicos —o sea, si sus magnitudes suben a un máximo, bajan a un mínimo, vuelven a subir al mismo máximo, y van repitiendo el ciclo a lo largo de los mismos intervalos de tiempo—, llegamos a la conclusión totalmente razonable



de que la estrella debe de estar moviéndose en una órbita que gira una y otra vez alrededor de cierto punto del espacio.

¿Qué impulsa a una estrella a bailar así? Por lo que sabemos, sólo puede ser la fuerza gravitatoria ejercida por otro objeto. No hay duda de que, por definición, los planetas tienen una masa muy inferior a la de una estrella, por lo que ejercen fuerzas gravitatorias sólo moderadas. Cuando tiran de una estrella cercana que posee mucha más masa que ellos, generan sólo pequeños cambios en la velocidad de dicha estrella. Júpiter, por ejemplo, modifica la velocidad del Sol aproximadamente en 12 metros por segundo, algo más que la de un campeón de 100 metros lisos. Mientras que Júpiter lleva a cabo su órbita de doce años alrededor del Sol, un observador situado en el plano de dicha órbita mediría desplazamientos Doppler en la luz del Sol. Tales desplazamientos Doppler demostrarían que, en un momento dado, la velocidad del Sol con respecto al observador aumentaría 12 metros por segundo por encima de su valor promedio. Seis años después, el mismo observador comprobaría que la velocidad del Sol es inferior al promedio en 12 metros por segundo. Mientras tanto, esa velocidad relativa se desplazaría sin complicaciones entre sus dos valores extremos. Tras algunas décadas de estudio de este ciclo repetitivo, el observador concluiría, con razón, que el Sol tiene un planeta en una órbita de doce años que le obliga a describir su propia órbita, lo que origina los cambios de velocidad surgidos de forma natural de dicho movimiento. El tamaño de la órbita del Sol, en comparación con la de Júpiter, es exactamente igual a la proporción *inversa* entre las masas de los dos objetos. Como el

Sol tiene una masa mil veces mayor que la de Júpiter, la órbita de este alrededor del centro mutuo de gravedad es mil veces *mayor* que la de aquel, lo cual testimonia que el Sol es mil veces más difícil de mover que Júpiter.

Desde luego hay muchos planetas alrededor del Sol, del que cada uno tira al mismo tiempo con su propia fuerza gravitatoria. Por tanto, el movimiento neto del Sol equivale a una superposición de bailes orbitales, cada uno con un período cíclico de repetición diferente. Como Júpiter ejerce en el Sol la mayor fuerza gravitatoria, por ser el planeta solar más grande y masivo, el baile que impone domina este complejo patrón.

Cuando los astrofísicos intentaban detectar planetas exosolares observando el baile de las estrellas, sabían que para descubrir un planeta más o menos parecido a Júpiter, que diera vueltas a su estrella a una distancia comparable a la de Júpiter respecto del Sol, deberían medir desplazamientos Doppler con una precisión suficiente para revelar cambios de velocidad de aproximadamente 12 metros por segundo. En la Tierra, esto parece una magnitud considerable (unos 40 kilómetros por hora), pero en términos astronómicos estamos hablando de menos de una millonésima parte de la velocidad de la luz, y de más o menos una milésima de la velocidad típica con la que las estrellas suelen acercarse o alejarse de nosotros. Así pues, para detectar el desplazamiento Doppler producido por un cambio de velocidad igual a una millonésima de la velocidad de la luz, los astrofísicos han de medir cambios en la longitud de onda —esto es, en colores de las estrellas— de una parte por millón.

\* \* \* \*

Estas mediciones de precisión dieron como resultado algo más que la detección de planetas. En primer lugar, como el esquema de detección consiste en hallar una repetición cíclica en los cambios de velocidad de una estrella, la duración de cada ciclo mide directamente el período orbital del planeta responsable. Si la estrella baila según un ciclo concreto de repetición, del mismo modo el planeta debe de estar bailando según un idéntico período de movimiento, aunque en una órbita mucho mayor. A su vez, este período orbital revela la distancia del planeta respecto de la estrella. Hace ya tiempo, Isaac Newton demostró que un objeto que describa órbitas alrededor de una estrella las completará más deprisa cuando esté más cerca, y más despacio cuando esté más lejos: cada período orbital corresponde a un valor particular de la distancia media entre la estrella y el objeto en órbita. En el sistema solar, por ejemplo, un período orbital de un año supone una distancia igual a la distancia entre la Tierra y el Sol, mientras que un período de doce años supone una distancia 5,2 veces mayor, la magnitud de la órbita de Júpiter. Así, los investigadores pudieron anunciar no sólo que habían descubierto un planeta, sino también que conocían tanto su período orbital como su distancia promedio respecto de su estrella.

Pudieron deducir aún más cosas acerca del planeta: si se desplaza a una distancia concreta de la estrella, su gravedad tirará de la misma con una fuerza que dependerá de la masa del planeta. Los planetas más masivos ejercen una fuerza mayor, con lo que la estrella bailará más deprisa. En cuanto conocieron las distancias planeta-estrella,

los investigadores pudieron incluir las *masas* de los planetas en la lista de características planetarias que habían determinado mediante observación y deducción meticulosas.

Esta deducción de la masa de un planeta mediante la observación del baile de una estrella conlleva una aclaración. Para los astrónomos es imposible saber si están estudiando una estrella danzante desde una dirección que resulta coincidir exactamente con el plano de la órbita del planeta, desde una dirección justo encima del plano de la órbita (en cuyo caso medirán una velocidad cero para la estrella) o (en casi todos los casos) desde una dirección que no está exactamente en el plano ni justo perpendicular al mismo. El plano de la órbita del planeta alrededor de la estrella coincide con el plano del movimiento de esta en respuesta a la gravedad del primero. Por tanto, observamos las velocidades orbitales completas sólo si nuestra línea de visión de la estrella concuerda con el plano de la órbita del planeta alrededor de la misma. Para imaginar una situación vagamente análoga, podemos situarnos en un partido de béisbol, capaces de medir la velocidad de la bola lanzada mientras se nos acerca o se aleja de nosotros, pero no la velocidad a la que cruza nuestro campo visual. Para un *boy scout* listo, el mejor sitio sería detrás de la base del bateador, en línea directa con el movimiento de la bola. Sin embargo, si observamos el partido desde las líneas de la primera y la tercera base, por lo general la bola lanzada por el *pitcher* ni se nos acercará ni se alejará de nosotros, por lo que la medición de la velocidad de la bola a lo largo de la línea de visión será casi cero.

Como el efecto Doppler revela sólo la velocidad a la que una estrella se acerca o se aleja, pero no lo deprecia que cruza nuestra línea de visión, normalmente no podemos saber lo cerca que está nuestra línea de visión de la estrella en el plano de su órbita. Este hecho da a entender que las masas que deducimos para los planetas exosolares son todas *mínimas*, y, por consiguiente, resultarán ser las masas reales de los planetas sólo en los casos en que sí observamos la estrella a lo largo de su plano orbital. Por término medio, la masa real de un planeta exosolar duplica la masa mínima deducida de la observación de los movimientos de la estrella, pero no podemos saber qué masas de planetas exosolares están por encima de esta proporción media, y cuáles por debajo.

Además de deducir el tamaño orbital y el período orbital del planeta, amén de su masa mínima, los astrofísicos que estudian bailes de estrellas debido al efecto Doppler han tenido otro éxito: son capaces de determinar la forma de la órbita del planeta. Algunas de estas órbitas, como las de Venus y Neptuno alrededor del Sol, presentan una circularidad casi perfecta; pero otras, como las de Mercurio, Marte y Plutón, exhiben un alargamiento considerable: el planeta se desplaza mucho más cerca del Sol en unos puntos de la órbita que en otros. Como el planeta se mueve más rápido cuando está cerca de su estrella, esta modifica su velocidad más deprisa en esos momentos. Si los astrónomos observan una estrella que cambia su velocidad a un ritmo constante durante todo su período cíclico, llegan a la conclusión de que estos cambios surgen de un planeta que describe una órbita circular. Si, por otro lado, advierten que los

cambios se producen a veces más deprisa y a veces más despacio, concluyen que el planeta sigue una órbita no circular, y pueden averiguar la magnitud del alargamiento orbital —el grado en que la órbita se desvía de la circularidad— midiendo los distintos ritmos a los que la estrella modifica su velocidad a lo largo de todo el ciclo orbital.

Así pues, gracias a una serie de observaciones precisas combinadas con capacidades de deducción, los astrofísicos que estudian los planetas exosolares pueden explicar cuatro propiedades clave de cualquier planeta que descubran: el período orbital del planeta, su distancia promedio respecto de su estrella, su masa mínima y su alargamiento orbital. Los astrofísicos llegan a saber todo esto captando los colores de la luz de estrellas que se hallan a centenares de billones de kilómetros del sistema solar, y midiendo estos cambios con una precisión superior a una parte por millón; lo cual es sin duda importante en nuestros intentos por sondear los cielos en busca de primos de la Tierra.

Sólo queda un problema. Muchos de los planetas exosolares descubiertos en la última década giran alrededor de sus estrellas a distancias muy inferiores a cualquier otra distancia entre el Sol y los suyos. Este problema es más preocupante porque todos los planetas exosolares detectados hasta ahora tienen masas comparables a la de Júpiter, planeta enorme que describe órbitas alrededor del Sol a una distancia más de cinco veces superior a la que hay entre el Sol y la Tierra. Examinemos los hechos un momento, antes de admirar las explicaciones de los astrofísicos sobre cómo esos planetas han podido

llegar a ocupar órbitas mucho más pequeñas que las que nos resultan familiares en nuestro sistema planetario.

Cada vez que utilizamos el método del baile para buscar planetas que giran alrededor de otras estrellas, hemos de ser conscientes de los márgenes de error del método. Primero, los planetas cercanos a sus estrellas tardan mucho menos tiempo en describir su órbita que los lejanos. Como los astrofísicos pueden dedicar sólo cantidades limitadas de tiempo a la observación del universo, como es lógico descubrirán más deprisa planetas que se muevan, por ejemplo, en períodos de seis meses que otros que inviertan una docena de años en cada órbita. En ambos casos, los astrofísicos deben esperar al menos un par de órbitas para asegurarse de haber detectado un patrón repetible de cambios en las velocidades de las estrellas. Por tanto, encontrar planetas con períodos orbitales comparables a los doce años de Júpiter podría consumir buena parte de la carrera profesional de un individuo.

Segundo, un planeta ejercerá más fuerza gravitatoria en su estrella anfitriona cuando esté cerca que cuando esté lejos. Estas fuerzas de mayor magnitud efectúan el baile de las estrellas más deprisa, lo que produce mayores desplazamientos Doppler en sus espectros. Como podemos detectar los desplazamientos mayores con mayor facilidad que los pequeños, los planetas más próximos atraen más atención, y lo hacen más rápidamente, que los planetas más alejados. A cualquier distancia, no obstante, un planeta exosolar debe tener una masa aproximadamente equiparable a la de Júpiter (trescientas dieciocho veces la de la Tierra) para ser detectada por el método del

desplazamiento Doppler. Los planetas con una masa apreciablemente menor no pueden hacer bailar a sus estrellas con una velocidad que supere el umbral de detectabilidad de la tecnología actual.

Así pues, retrospectivamente, no debería sorprendernos la noticia de que los primeros planetas exosolares descubiertos tengan masas comparables a la de Júpiter y describan órbitas próximas a sus respectivas estrellas. La sorpresa radica precisamente en lo cerca que están estos planetas; tanto que no tardan varios meses o años en completar una órbita, como les pasa a los del sistema solar, sino sólo algunos días. Los astrofísicos han descubierto más de una docena de planetas que completan su órbita en menos de una semana (el récord está en algo más de dos días y medio). Este planeta plusmarquista, que describe órbitas alrededor de una estrella parecida al Sol llamada HD73256, tiene una masa equivalente a 1,9 veces la masa de Júpiter, y se desplaza en una órbita ligeramente alargada a una distancia promedio de su estrella igual al 3,7% de la distancia entre la Tierra y el Sol. En otras palabras, este planeta gigante posee una masa seiscientos veces superior a la de la Tierra a una distancia de su estrella inferior a una décima parte de la de Mercurio.

Mercurio consta de roca y metal, cocido a temperaturas de muchos cientos de grados en el lado encarado al Sol. En cambio, Júpiter y los otros planetas solares grandes (Saturno, Urano y Neptuno) son enormes bolas de gas que rodean núcleos sólidos con apenas un porcentaje pequeño de la masa total. Todas las teorías de la formación de los planetas dan a entender que un planeta con una masa semejante a la de Júpiter no puede ser sólido, como Mercurio, Venus



y la Tierra, pues la nube primordial que los constituyó contenía demasiada poca cantidad del material que puede solidificarse para conformar un planeta con una masa varias docenas superior a la de la Tierra. La conclusión que sacamos, y que constituye otro paso en la gran historia detectivesca que nos ha proporcionado planetas exosolares, es que todos los planetas exosolares descubiertos hasta la fecha deben de ser grandes bolas de gas (pues tienen masas comparables a la de Júpiter).

De esta sorprendente conclusión surgen inmediatamente dos preguntas: ¿cómo llegaron estos planetas parecidos a Júpiter a describir órbitas tan cerca de sus estrellas? y ¿por qué su gas no se evapora enseguida bajo el intenso calor? La segunda tiene una respuesta relativamente fácil: las enormes masas de los planetas pueden retener incluso gases ligeros calentados a temperaturas de cientos de grados simplemente porque sus fuerzas gravitatorias reprimen la tendencia de los átomos y las moléculas del gas a escapar al espacio. En los casos más extremos, sin embargo, esta lucha se decanta sólo por poco a favor de la gravedad, y los planetas se hallan justo más allá de la distancia en la que el calor de sus estrellas evaporaría realmente los gases.

La primera pregunta, sobre cómo los planetas gigantes llegaron a trazar órbitas tan cercanas a estrellas como el Sol, nos lleva a la cuestión fundamental de cómo se formaron los planetas. Como hemos expuesto en el capítulo 11, los teóricos han trabajado con afán para alcanzar cierto conocimiento del proceso de formación de los planetas de nuestro sistema solar. Y han llegado a la conclusión de

que los planetas solares han ido acumulando materia, y pasado de ser pequeños terrones de materia a ser objetos de mayor tamaño en una nube de gas y polvo con forma de tortita. En esta masa aplanada, giratoria, de materia alrededor del Sol, se formaron concentraciones individuales de materia, primero al azar, pero luego, como tenían una densidad superior a la media, tras haber vencido en el tira y afloja gravitatorio entre las partículas. En las fases finales de este proceso, la Tierra y otros planetas sólidos sobrevivieron a un intenso bombardeo del último de los trozos gigantes de material.

Mientras se desplegaba este proceso aglutinador, el Sol comenzó a brillar y evaporó de las inmediaciones los elementos más ligeros, como el hidrógeno y el helio, con lo cual los cuatro planetas interiores (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) acabaron compuestos casi exclusivamente de elementos más pesados, como carbono, oxígeno, silicio, aluminio o hierro. En contraste, cada grumo de materia que se formó a una distancia entre cinco y treinta veces superior a la de la Tierra respecto del Sol permaneció lo bastante frío como para retener buena parte del hidrógeno y el helio en sus alrededores. Como estos dos elementos más ligeros son también los más abundantes, esta capacidad retentiva creó cuatro planetas gigantes, cada uno con una masa muchas veces superior a la de la Tierra.

Plutón no pertenece al grupo de planetas interiores rocosos ni al de los exteriores gaseosos de gran tamaño. Todavía pendiente de inspección por alguna nave espacial procedente de la Tierra, parece un cometa gigante y se compone de una mezcla de hielo y roca. Los cometas, que por lo general tienen un diámetro que oscila entre 8 y

80 kilómetros, no los más de 3.000 kilómetros de Plutón, se cuentan entre los primeros trozos de materia de tamaño considerable que se formaron en el sistema solar temprano. En cuanto a la edad, rivalizan con ellos los meteoritos viejos, que son fragmentos de roca, metal o combinaciones de metal y roca que se estrellaron contra la superficie de la Tierra y han sido identificados por quienes saben distinguir un meteorito de una piedra común.

Por tanto, los planetas se crearon a partir de materia prácticamente igual a la de los cometas y los meteoritos, y los gigantes utilizaron sus centros sólidos para atraer y retener una cantidad de gas muy superior. Según la datación radiactiva de los minerales de los meteoritos, los más viejos tienen una edad de cuatro mil quinientos cincuenta millones de años, bastante más que las piedras más viejas de la Luna (cuatro mil doscientos millones) o de la Tierra (apenas cuatro mil millones). El nacimiento del sistema solar, que en consecuencia se produjo aproximadamente cuatro mil quinientos cincuenta millones de años a. C., originó como es lógico la segregación de mundos planetarios en dos grupos: los planetas interiores sólidos, relativamente pequeños, y los gigantes, de masa elevada y en su mayor parte gaseosos. Los cuatro planetas interiores giran alrededor del Sol a distancias comprendidas entre 0,37 y 1,52 veces la distancia entre la Tierra y el Sol, mientras que los cuatro gigantes permanecen a distancias mucho mayores, que oscilan entre 5,2 y 30 veces la que hay entre la Tierra y el Sol, lo que les permitió ser gigantes.

Esta descripción de cómo se formaron los planetas solares tiene tanto sentido que casi es lamentable que hayamos encontrado ahora tantos ejemplos de objetos con masa similar a la de Júpiter, en órbita alrededor de su estrella a distancias muy inferiores a la de Mercurio respecto del Sol. De hecho, como los primeros planetas exosolares descubiertos estaban a distancias tan cortas de sus respectivas estrellas, por un momento pareció que nuestro sistema solar era la excepción más que el modelo de sistema planetario, tal como habían supuesto implícitamente los teóricos en una época en que no tenían nada más en lo que basar sus conclusiones. Tras captar la tendencia impuesta por la relativa facilidad para descubrir planetas cercanos se tranquilizaron un poco y muy pronto estuvieron observando durante períodos lo bastante largos, y con la suficiente precisión, para detectar planetas gigantes situados a mucha más distancia de sus estrellas.

En la actualidad, la lista de planetas exosolares, ordenados con arreglo a la distancia entre la estrella y el planeta, comienza con el descrito antes, un planeta que tarda sólo dos días y medio en llevar cabo su órbita, y se extiende, a lo largo de más de cien entradas, hasta la estrella 55 Cancri, donde un planeta con una masa al menos cuatro veces superior a la de Júpiter tarda 13,7 años en cada órbita. Partiendo del período orbital, los astrofísicos pueden calcular que este planeta se halla a una distancia de su estrella igual a 5,9 veces la que hay entre la Tierra y el Sol, o 1,14 veces la comprendida entre el Sol y Júpiter. Se considera que el planeta es el primero descubierto a una distancia de su estrella superior a la distancia entre el Sol y Júpiter,

lo cual parece indicar la existencia de un sistema planetario vagamente comparable a nuestro sistema solar, al menos en lo que respecta a la estrella y su planeta más grande.

Sin embargo, esto no es exactamente así. El planeta que gira alrededor de 55 Cancri a 5,9 veces la distancia entre la Tierra y el Sol no es el primero en haber sido descubierto en órbita en torno a esta estrella, sino el *tercero*. A estas alturas, los astrónomos han acumulado tantos datos, y adquirido tantas destrezas para interpretar sus observaciones del desplazamiento Doppler, que son capaces de esclarecer el complejo baile estelar producido por dos o más planetas. Cada uno de ellos trata de imponer un baile con su propio ritmo, con un período repetitivo igual al lapso de la órbita del planeta alrededor de la estrella. Mediante la observación durante un tiempo lo bastante largo, y el empleo de programas informáticos capaces de cualquier cálculo, los cazadores de planetas pueden extraer, de estos bailes combinados, los pasos básicos generados por cada mundo en órbita. En el caso de 55 Cancri, una modesta estrella visible en la constelación de Cáncer, ya habían descubierto dos planetas más cercanos, con períodos orbitales de 42 y 89 días y masas mínimas 0,84 y 0,21 veces la de Júpiter, respectivamente. El planeta con la masa mínima igual a «solo» 0,21 veces la de Júpiter (sesenta y siete veces la de la Tierra) se cuenta entre los menos masivos detectados; no obstante, el récord de masa pequeña de un planeta exosolar ha descendido a una magnitud treinta y cinco veces superior a la de la Tierra (tan superior aún que no cabe esperar el

inminente descubrimiento de algún primo por parte de los astrónomos).

Por muchas vueltas que le demos, no podemos evitar el problema, evidente a partir de las órbitas de los planetas de alrededor de 55 Cancri, de explicar por qué y cuántos planetas exosolares, de masa parecida a la de Júpiter, describen órbitas alrededor de sus estrellas a distancias tan asombrosamente pequeñas. Según los expertos, cerca de una estrella similar al Sol no puede formarse ningún planeta de masa semejante a la de Júpiter a una distancia inferior a tres o cuatro veces la existente entre el Sol y la Tierra. Si suponemos que los planetas exosolares siguen esta máxima, de algún modo deben de haberse desplazado a distancias muy inferiores después de haberse formado. Si es válida, esta conclusión plantea al menos tres preguntas cruciales:

1. ¿Qué impulsó a estos planetas a describir órbitas más pequeñas después de haberse formado?
2. ¿Qué les impidió desplazarse hacia sus estrellas hasta el final y perecer?
3. ¿Por qué sucedió esto en muchos sistemas planetarios, pero no en nuestro sistema solar?

Estas preguntas tienen respuestas, aportadas por ciertas mentes fecundas tan pronto hubieron sido adecuadamente estimuladas por el descubrimiento de planetas exosolares. Podríamos resumir como sigue el escenario ahora respaldado por los expertos:

1. La «migración planetaria» se produjo porque cantidades considerables de material derivado del proceso de formación siguieron girando alrededor de la estrella en las órbitas de los planetas gigantes recién constituidos. Este material es sistemáticamente arrojado por la gravedad del planeta grande a órbitas exteriores, lo que a su vez obliga a dicho planeta a deslizarse hacia dentro.
2. Cuando los planetas llegaron a estar más cerca de sus estrellas que de sus puntos de origen, las fuerzas de marea de la estrella acoplaron el planeta en su sitio. Estas fuerzas, comparables a las fuerzas de marea del Sol y la Luna que provocan mareas en los mares de la Tierra, obligaron a los períodos rotacionales de los planetas a igualar sus períodos orbitales, como pasó con las fuerzas de marea de la Tierra sobre la Luna. También impidieron cualquier otro acercamiento del planeta a la estrella por razones que, como requerirían hablar mucho de mecánica celeste, mejor pasarlas aquí por alto.
3. Es de suponer que la lotería determinó qué sistemas planetarios se formaron con grandes cantidades de desechos, capaces de provocar migración, y cuáles, como el nuestro, tendrían relativamente pocos desechos, de modo que los planetas permanecieron a las distancias a las que se habían formado. En el caso de los planetas de alrededor de 55 Cancri, es posible que los tres migrasen considerablemente hacia dentro, con el planeta más exterior

habiéndose formado a una distancia varias veces superior a la actual respecto de la estrella. O acaso los detalles de cuántos desechos vivían dentro de la órbita del planeta, y cuántos fuera, originasen una importante migración de los dos planetas interiores mientras que el tercero se quedaba en su camino original.

Aún queda algo de trabajo pendiente, por decirlo así, antes de que los astrofísicos puedan proclamar que han explicado cómo se forman los sistemas planetarios alrededor de las estrellas. Entretanto, quienes van a la caza de planetas exosolares no renuncian a su sueño de descubrir un gemelo de la Tierra, semejante a esta en cuanto a tamaño, masa y distancia orbital respecto a su estrella progenitora. Cuando encuentren este planeta —si se da el caso—, esperan examinarlo, aunque sea a montones de años luz de distancia, con la precisión suficiente para determinar si posee una atmósfera y mares parecidos a los de la Tierra y, quizá, si existe en él vida como la nuestra.

En el afán por hacer realidad este sueño, los astrofísicos saben que necesitan instrumentos que den vueltas por encima de nuestra atmósfera, cuyos efectos distorsionadores nos impiden hacer mediciones muy precisas. La misión Kepler de la NASA se propone observar centenares de miles de estrellas cercanas en búsqueda de una mínima disminución de luz estelar (aproximadamente una centésima de un 1%) provocada por el movimiento de un planeta del tamaño de la Tierra al otro lado de la línea de visión de una estrella.



Este enfoque es válido sólo para la pequeña proporción de situaciones en las que nuestra visión se extiende casi exactamente a lo largo del plano orbital del planeta, si bien en estos casos el intervalo entre tránsitos planetarios es igual al período orbital del planeta, el cual a su vez especifica la distancia planeta-estrella; por su parte, el grado de disminución de luz estelar revela el tamaño del planeta.

De todos modos, si esperamos averiguar más cosas sobre las características físicas básicas del planeta, hemos de estudiarlo mediante imágenes directas y análisis del espectro de la luz que el planeta refleja en el espacio. La NASA y la ESA, Agencia Espacial Europea, han puesto en marcha programas para alcanzar este objetivo en el plazo de dos décadas. Ver otro planeta como la Tierra, aunque sea en forma de puntito azul claro junto a una lejana estrella brillante, podría inspirar a otra generación de poetas, físicos y políticos. Analizar la luz reflejada del planeta y, por tanto, determinar si su atmósfera contiene o no oxígeno (probable indicio de vida) o una combinación de oxígeno y metano (señal casi inequívoca de vida) supondría el tipo de logro que en otro tiempo cantaron los bardos, lo que elevaría a los simples mortales a la categoría de héroes por siempre jamás, dejándonos (como escribió F. Scott Fitzgerald en *El gran Gatsby*) frente a algo acorde con la capacidad del hombre para maravillarse. A quienes sueñan con encontrar vida en otras partes del universo les espera nuestra sección final.

## **Parte V**

### **El origen de la vida**

#### **Contenido:**

*Capítulo 14. Vida en el universo*

*Capítulo 15. El origen de la vida en la Tierra*

*Capítulo 16. La búsqueda de vida en el sistema solar*

*Capítulo 17. La búsqueda de vida en la galaxia de la Vía Láctea*

### **Capítulo 14**

#### **Vida en el universo**

Nuestro estudio de los orígenes nos lleva, como teníamos previsto, al misterio más íntimo y posiblemente más trascendental de todos: el origen de la vida, y en concreto de formas de vida con las que quizás algún día podamos comunicarnos. Los seres humanos llevan siglos preguntándose cómo encontrar a otros seres inteligentes en el cosmos con los que podríamos tener al menos una discreta conversación antes de pasar a la historia. Las pistas clave para resolver este puzle tal vez aparezcan en el anteproyecto cósmico de nuestros propios comienzos, que incluye el origen de la Tierra en el seno de la familia de planetas solares, el origen de las estrellas que suministran energía para la vida, el origen de la estructura del universo, y el origen y la evolución del universo propiamente dicho.

Si pudiéramos leer el anteproyecto con detalle, este acaso nos conduciría desde las situaciones astronómicas más grandes a las más pequeñas, desde el cosmos sin límites a ubicaciones individuales

donde florecen y evolucionan diferentes clases de vida. Si pudiéramos comparar las diversas formas de vida que surgieron bajo diferentes circunstancias, descubriríamos las normas que rigieron en el inicio de la vida, tanto en términos generales como en situaciones cósmicas concretas. En la actualidad, conocemos una sola forma de vida, la de la Tierra, que comparte un origen común y utiliza las moléculas del ADN como medio fundamental para reproducirse. Este hecho nos priva de múltiples ejemplos, y deja para el futuro el estudio general de la vida en el cosmos, algo irrealizable hasta que empecemos a descubrir formas de vida más allá de nuestro planeta.

Las cosas podrían ser peor. Sabemos efectivamente mucho sobre la historia de la vida en el planeta, y hemos de partir de este conocimiento para derivar principios esenciales sobre la vida en el conjunto del universo. En la medida en que podamos fiarnos de dichos principios, estos nos dirán cuándo y dónde el universo proporciona, o ha proporcionado, los requisitos fundamentales para la vida. En todos nuestros intentos por imaginar vida en otros lugares, hemos de procurar no caer en la trampa del pensamiento antropomórfico, la tendencia natural a imaginar que las formas de vida extraterrestre han de ser como la nuestra. Esta actitud totalmente humana, surgida de nuestras experiencias personales y evolutivas aquí en la Tierra, nos limita la imaginación cuando tratamos de imaginarnos lo distinta que podría ser la vida en otros mundos. Sólo los biólogos, familiarizados con la gran variedad y los múltiples aspectos de las distintas formas de vida en la Tierra, son capaces de aventurarse a conjeturar con ciertas garantías cómo

podrían ser las criaturas extraterrestres, cuya rareza trasciende casi con toda seguridad la capacidad imaginativa de los seres humanos normales y corrientes.

Algún día —quizás el año que viene, o en el próximo siglo, acaso mucho después— o bien descubriremos vida fuera de la Tierra, o bien obtendremos datos suficientes para concluir, como algunos científicos sugieren ahora, que la vida en nuestro planeta es un fenómeno exclusivo dentro de la galaxia de la Vía Láctea. De momento, la falta de información sobre este tema nos permite considerar una gama de posibilidades amplísima. Quizás encontremos vida en diversos objetos del sistema solar, lo cual daría a entender que seguramente existe vida en el seno de miles de millones de sistemas planetarios similares de nuestra galaxia. O tal vez descubramos que en el sistema solar sólo contiene vida la Tierra, lo que de momento dejaría en el aire la cuestión de la vida alrededor de otras estrellas. O acaso a la larga descubramos que no existe vida en torno a ninguna otra estrella, con independencia de lo lejos que miremos. En la búsqueda de vida en el universo, como en otras esferas de actividad, el optimismo se alimenta de resultados positivos, mientras que las ideas pesimistas se consolidan gracias a los resultados negativos. La información más reciente que tiene que ver con las posibilidades de vida fuera de la Tierra —el descubrimiento de que hay planetas describiendo órbitas en torno a muchas de las estrellas vecinas del Sol— apunta a la optimista conclusión de que la vida puede ser relativamente abundante en la Vía Láctea. No obstante, antes de que esta idea gane aceptación habrá que resolver

problemas importantes. Si, por ejemplo, los planetas abundan de veras, pero casi ninguno ofrece condiciones apropiadas para la vida, probablemente resultará correcta la opción pesimista sobre la vida extraterrestre.

Los científicos que meditan sobre las posibilidades de vida extraterrestre suelen invocar la ecuación de Drake, por Frank Drake, el astrónomo norteamericano que la creó a principios de la década de 1960. La ecuación de Drake proporciona un concepto útil más que una expresión rigurosa sobre cómo funciona el universo físico. La ecuación organiza provechosamente nuestro conocimiento y nuestra ignorancia separando el número que tanto queremos calcular —el de lugares donde existe actualmente vida en nuestra galaxia— en un conjunto de términos, cada uno de los cuales describe una condición necesaria para la vida inteligente. Estos términos incluyen: 1) el número de estrellas de la Vía Láctea que sobreviven el tiempo suficiente para que evolucione vida inteligente en planetas que giran a su alrededor; 2) el número promedio de planetas que giran alrededor de cada una de estas estrellas; 3) la proporción de estos planetas con condiciones adecuadas para la vida; 4) la probabilidad de que surja realmente vida en estos planetas apropiados; y 5) la posibilidad de que se desarrolle vida en un planeta así para generar una civilización inteligente, concepto con el que los astrónomos suelen referirse a una forma de vida capaz de comunicarse con nosotros. Si multiplicamos estos cinco términos, obtenemos el número de planetas de la Vía Láctea que poseen una civilización inteligente en algún momento de su historia. Para que la ecuación de

Drake nos dé el número que buscamos —el número de civilizaciones inteligentes que existen en cualquier momento representativo, como el actual—, hemos de multiplicar este producto por un sexto y último término: 6) la proporción entre la vida promedio de una civilización inteligente y la vida total de la galaxia de la Vía Láctea (aproximadamente diez mil millones de años).

Cada uno de los seis términos de la ecuación de Drake requiere conocimientos astronómicos, biológicos o sociológicos. En la actualidad contamos con buenas estimaciones de los dos primeros términos de la ecuación, y seguramente pronto obtendremos un cálculo aproximado útil del tercero. Además, los términos cuarto y quinto —la probabilidad de que aparezca vida en un planeta adecuado, y de que esta vida evolucione para producir una civilización inteligente— exigen que descubramos y analicemos diversas formas de vida en el conjunto de la galaxia. De momento, cualquiera puede argumentar casi tan bien como los expertos sobre el valor de estos términos. ¿Cuál es la probabilidad, por ejemplo, de que, si en un planeta se dan efectivamente condiciones adecuadas para la vida, se inicie realmente vida en el mismo? Un enfoque científico de la cuestión pide a gritos el estudio de varios planetas apropiados para la vida durante unos miles de millones de años para ver cuántos la producen. Todo intento de determinar la vida promedio de una civilización de la Vía Láctea requiere asimismo varios miles de millones de años de observación una vez localizado un número lo bastante grande de civilizaciones para obtener una muestra representativa.

Sería una tarea imposible. De hecho, para tener una solución completa de la ecuación de Drake hemos de irnos al futuro remoto; a menos que nos encontremos con otras civilizaciones que ya la hayan resuelto, quizás utilizándonos como fuente de datos. En todo caso, la ecuación proporciona percepciones útiles sobre lo que hace falta para estimar cuántas civilizaciones existen ahora en nuestra galaxia. Los seis términos de la ecuación de Drake se parecen matemáticamente uno a otro en su efecto sobre el resultado total: cada uno ejerce un efecto directo y multiplicador en la solución a la ecuación. Por ejemplo, si suponemos que uno de cada tres planetas adecuados para la vida genera realmente vida, pero exploraciones posteriores revelan que esta proporción es  $1/30$ , es que habremos sobrevalorado el número de civilizaciones en un factor de 10, suponiendo que las estimaciones para los otros términos resulten correctas.

A juzgar por lo que sabemos en la actualidad, los tres primeros términos de la ecuación de Drake dan a entender que en la Vía Láctea existen miles de millones de sitios potencialmente aptos para la vida. (Nos limitamos a la Vía Láctea por modestia, y además somos conscientes de que a las civilizaciones de otras galaxias les costará mucho establecer contacto con nosotros, o a nosotros con ellas). Si nos apetece, podemos tener discusiones con amigos, colegas y parientes sobre el valor de los otros tres términos, y decidir acerca de los números que nos facilitarán la estimación del número total de civilizaciones tecnológicamente competentes de la galaxia. Si creemos, por ejemplo, que la mayoría de los planetas adecuados para la vida producen efectivamente vida, y que en casi todos los planetas

con vida se desarrollan de veras civilizaciones inteligentes, llegaremos a la conclusión de que miles de millones de planetas de la Vía Láctea producen una civilización inteligente en algún momento de su cronología. Si, en cambio, concluimos que genera vida sólo un planeta apropiado de cada mil, y que sólo un planeta con vida de cada mil desarrolla vida inteligente, únicamente habrá miles, no miles de millones, de planetas con una civilización inteligente. ¿Esta enorme variedad de respuestas —potencialmente más amplias incluso que los ejemplos puestos aquí— implica que la ecuación de Drake es más especulación insensata y desenfrenada que ciencia? En absoluto. Este resultado es simplemente el testimonio de la labor hercúlea realizada por los científicos —y no sólo por ellos— en sus intentos por responder a una pregunta sumamente compleja basándose en conocimientos muy limitados.

La dificultad afrontada al calcular los valores de los tres últimos términos de la ecuación de Drake hace hincapié en el engañoso paso que damos cada vez que hacemos una generalización amplia partiendo de un ejemplo individual (o de ninguno). Nos va a costar mucho, por ejemplo, estimar la vida promedio de una civilización de la Vía Láctea cuando ni siquiera sabemos cuánto durará la nuestra. ¿Hemos de abandonar la fe en las estimaciones de estos cálculos? Ello sólo acentuaría nuestra ignorancia al tiempo que nos privaría de la alegría de especular. Si, a falta de datos o dogma, pretendemos conjeturar de manera conservadora, la vía más segura (si bien a la larga podría resultar errónea) se basa en la idea de que no somos especiales. Los astrofísicos dan a este supuesto el nombre de



«principio copernicano», por Nicolás Copérnico, que a mediados de 1500 situó el Sol en medio de nuestro sistema solar, al que resulta que pertenecía. Hasta entonces, pese a la sugerencia del filósofo griego Aristarco, en el siglo III a. C., de un universo centrado en el Sol, la idea del cosmos centrado en la Tierra había predominado en la opinión popular durante la mayor parte de los dos milenios anteriores. Sistematizado por las enseñanzas de Aristóteles y Ptolomeo y los sermones de la Iglesia católica, este dogma llevó a casi todos los europeos a aceptar la Tierra como elemento central de toda creación. Esto parecería por un lado evidente simplemente mirando al cielo, y por otro sería el resultado natural del plan de Dios para el planeta. Todavía en la actualidad, importantes sectores de la población humana de la Tierra —muy probablemente una mayoría significativa— siguen sacando esta conclusión del hecho de que la Tierra parece estar inmóvil mientras el cielo gira a nuestro alrededor. Aunque no tenemos garantías de que el principio copernicano vaya a guiarnos bien en todas las investigaciones científicas, sí procura un contrapeso útil a nuestra tendencia natural a considerarnos especiales. Aún más elocuente es el hecho de que el principio tiene hasta ahora un historial excelente, que nos da lecciones de humildad a cada instante: ni la Tierra ocupa el centro del sistema solar, ni el sistema solar ocupa el centro de la galaxia de la Vía Láctea, ni la galaxia de la Vía Láctea ocupa el centro del universo. Y por si creemos que el borde es un lugar especial, pues tampoco estamos en el borde de nada. Así pues, una actitud contemporánea juiciosa da por supuesto que la vida en la Tierra sigue también el principio

copernicano. En tal caso, ¿cómo pueden la vida en la Tierra, sus orígenes y sus componentes y estructuras darnos pistas sobre la vida en otras partes del universo?

Al intentar responder a esta pregunta, hemos de asimilar una gran variedad de información biológica. Por cada dato cósmico, obtenido mediante largas observaciones de objetos situados a una enorme distancia de nosotros, conocemos miles de hechos biológicos. La diversidad de la vida deja a todos, aunque en especial a los biólogos, pasmados a diario. Sólo en el planeta Tierra coexisten (entre innumerables formas distintas de vida) algas, escarabajos, esponjas, medusas, serpientes, cóndores y secuoyas gigantes. Imaginemos a estos siete tipos de organismos vivos alineados uno junto a otro por orden de tamaño. Si no fuera porque sabemos la verdad, nos costaría creer que todos vienen del mismo universo, no digamos ya del mismo planeta. Intentemos describir una serpiente a alguien que no ha visto nunca ninguna: «Has de creerme. En el planeta Tierra acabo de ver un animal que: 1) acecha a sus presas con detectores de infrarrojos, 2) se traga animales vivos hasta cinco veces más grandes que su cabeza, 3) no tiene brazos ni patas ni ningún otro apéndice, pero 4) ¡por terreno llano es capaz de deslizarse casi a la misma velocidad que tú al andar!».

En contraste con la asombrosa variedad de vida en la Tierra, la cortedad de miras y la escasa creatividad de los guionistas de Hollywood que imaginan otras formas de vida son vergonzosas. Desde luego, los guionistas echan la culpa al público, que prefiere fantasmas e invasores familiares a alienígenas de verdad. Sin

embargo, con algunas notables excepciones, como las formas de vida de *La masa devoradora* (1958) y la de *2001: una odisea del espacio* (1968), de Stanley Kubrick, todos los extraterrestres de Hollywood parecen extraordinariamente humanoides. Al margen de lo feos (o monos) que sean, casi todos tienen dos ojos, nariz, boca, dos orejas, cabeza, cuello, hombros, dos brazos, manos, dedos, torso, dos piernas, pies... y andan. Desde un punto de vista anatómico, estas criaturas son prácticamente indistinguibles de los seres humanos, aunque se supone que viven en otros planetas y son fruto de líneas de evolución independientes. Difícilmente hallaremos una violación más clara del principio copernicano.

La astrobiología —el estudio de las posibilidades de vida extraterrestre— se cuenta entre las ciencias más especulativas, pero los astrobiólogos ya pueden afirmar con seguridad que la vida en otras partes del universo, inteligente o no, seguramente parecerá al menos tan exótica como algunas de las formas de vida en la Tierra, o más incluso. Cuando evaluamos las posibilidades de vida en otras partes del universo, hemos de erradicar de nuestro cerebro las ideas inculcadas por Hollywood. No es fácil, pero es esencial si aspiramos a una estimación científica, no emocional, de nuestras posibilidades de descubrir criaturas con las que tener algún día una conversación tranquila.

## Capítulo 15

### El origen de la vida en la Tierra

La búsqueda de vida en el universo empieza con una pregunta de calado: ¿qué es la vida? Los astrobiólogos dirán con toda sinceridad que esta pregunta no tiene una respuesta simple ni comúnmente aceptada. No sirve de mucho decir que lo sabremos cuando lo veamos. Con independencia de qué características especifiquemos para separar en la Tierra la materia viva de la no viva, siempre podemos encontrar un ejemplo que desdibuje o borre esta distinción. Algunas criaturas vivas, o todas ellas, crecen, se mueven o se deterioran, pero eso mismo hacen muchos objetos que nunca consideraremos vivos. ¿La vida se reproduce por sí misma? También lo hace el fuego. ¿La vida evoluciona para generar formas nuevas? Lo mismo hacen ciertos cristales que crecen en soluciones acuosas. Somos capaces de identificar algunas formas de vida al verlas, sin duda — ¿alguien no ve vida en un salmón o un águila?—, pero cualquiera familiarizado con la vida en la Tierra en sus diversas formas reconocerá que muchas criaturas pasan totalmente desapercibidas hasta que la suerte o la destreza de un experto desvela su naturaleza viva.

Como la vida es breve, hemos de seguir adelante con un criterio sencillo, apropiado en líneas generales. Aquí está: la vida consiste en conjuntos de objetos capaces tanto de reproducirse como de evolucionar. No diremos que unos objetos están vivos sólo porque de ellos van saliendo otros. Para otorgarles vida, han de evolucionar y

transformarse en formas nuevas a medida que pasa el tiempo. Por tanto, esta definición elimina la posibilidad de que se considere vivo un objeto individual. Lo que hemos de hacer es examinar una variedad de objetos en el espacio y seguirlos a lo largo del tiempo. Esta definición quizás resulte aún demasiado restrictiva, pero es la que utilizaremos de momento.

Tras estudiar los diferentes tipos de vida en el planeta, los biólogos han descubierto una propiedad general de la vida en la Tierra. La materia contenida en cada una de sus criaturas vivas consta sólo de cuatro elementos: hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno. Todos los demás elementos juntos aportan menos del 1% a la masa de cualquier organismo vivo. Aparte de los cuatro grandes, entre los demás elementos se incluyen pequeñas cantidades de fósforo, considerado el más importante además de imprescindible para la mayoría de las formas de vida, junto con proporciones aún menores de azufre, sodio, magnesio, cloro, potasio, calcio y hierro.

En todo caso, ¿podemos llegar a la conclusión de que esta propiedad elemental de la vida en la Tierra debe asimismo describir otras formas de vida en el cosmos? Aquí cabe aplicar el principio copernicano a tope. Los cuatro elementos que constituyen el grueso de la vida en la Tierra aparecen en la breve lista de los seis elementos más abundantes del universo. Como los otros dos elementos de la lista, el helio y el neón, no se combinan casi nunca con nada más, la vida en la Tierra consta de los ingredientes más abundantes y químicamente activos del cosmos. De todas las predicciones que hagamos de la vida en otros mundos, la más segura es que se compondrá de casi los

mismos elementos utilizados por la de la Tierra. Si la vida de nuestro planeta consistiera sobre todo en cuatro elementos muy raros del cosmos, como el niobio, el bismuto, el galio y el plutonio, tendríamos buenas razones para sospechar que somos algo especial en el universo. Sin embargo, la composición química de la vida en nuestro planeta nos predispone a tener una idea optimista sobre las posibilidades de vida fuera del mismo.

La composición de la vida en la Tierra encaja en el principio copernicano aún más de lo que cabía esperar de entrada. Si viviéramos en un planeta compuesto sobre todo de hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno, el hecho de que la vida consistiera sobre todo en estos cuatro elementos poco debería sorprendernos. Sin embargo, la Tierra está hecha principalmente de oxígeno, hierro, silicio y magnesio, y sus capas exteriores contienen ante todo oxígeno, silicio, aluminio y hierro. Sólo uno de estos elementos, el oxígeno, aparece en la lista de los elementos más abundantes de la vida. Si miramos en los mares de la Tierra, constituidos casi exclusivamente por hidrógeno y oxígeno, sorprende que la vida incluya entre sus elementos más abundantes el carbono y el nitrógeno en vez del cloro, el sodio, el azufre, el calcio o el potasio, que son los elementos más comunes disueltos en agua de mar. La distribución de los elementos en la vida de la Tierra se parece mucho más a la composición de las estrellas que a la del propio planeta. Como consecuencia de ello, los elementos de la vida son más abundantes en el conjunto del cosmos que en la Tierra, lo cual constituye un buen inicio para quienes esperan descubrir vida en un sinfín de situaciones.

Una vez que hemos establecido que la materia prima de la vida abunda en todo el cosmos, quizá nos hagamos la siguiente pregunta: ¿con qué frecuencia esta materia prima, junto con un emplazamiento en el que dicha materia pueda reunirse y una conveniente fuente de energía como una estrella próxima, da origen a la vida propiamente dicha? Algún día, cuando hayamos realizado un buen estudio de lugares posibles para la vida en nuestro vecindario solar, tendremos una respuesta precisa a esta pregunta desde el punto de vista estadístico. A falta de estos datos, debemos hacer un rodeo y formularnos otra pregunta: ¿cómo empezó la vida en la Tierra?

\* \* \* \*

El origen de la vida permanece bloqueado por una incertidumbre oscura. Nuestra ignorancia sobre el inicio de la vida deriva, en parte, del hecho de que cualesquiera episodios que dieran vida a la materia inanimada se produjeron hace miles de millones de años y no dejaron a su paso rastros definitivos. No existe registro fósil ni geológico de la historia de la Tierra para períodos superiores a los cuatro mil millones de años. Sin embargo, el intervalo de la historia del sistema solar comprendido entre cuatro mil seiscientos y cuatro mil millones de años —los primeros seiscientos millones de años tras la formación del Sol y los planetas— incluye la era en que, a juicio de la mayoría de los paleobiólogos —especialistas en reconstruir la vida que existió en épocas desaparecidas hace tiempo—, apareció por primera vez la vida en nuestro planeta.

La inexistencia de pruebas geológicas de eras de hace más de cuatro mil millones de años tiene su origen en movimientos de la corteza

terrestre, denominados familiarmente «deriva continental», pero conocidos científicamente como «tectónica de placas». Estos movimientos, impulsados por el calor que brota desde el interior de la Tierra, obligan continuamente a fragmentos de la corteza a deslizarse, chocar y superponerse unos sobre otros. Los movimientos de la tectónica de placas han enterrado lentamente todo lo que en otro tiempo estuvo en la superficie terrestre. Debido a ello, tenemos unas cuantas rocas de más de dos mil millones de años, y ninguna de más de tres mil ochocientos millones. Este hecho, junto con la razonable conclusión de que la mayoría de las formas de vida tenían pocas posibilidades de dejar pruebas fósiles, ha provocado que nuestro planeta carezca de registros fiables de vida en sus primeros mil o dos mil millones de años. La evidencia definitiva más antigua de vida en la Tierra nos lleva a remontarnos a «solo» dos mil setecientos millones de años, y ciertas indicaciones indirectas revelan que ya había vida más de mil millones de años antes.

En opinión de casi todos los paleobiólogos, la vida apareció en la Tierra hace al menos tres mil millones de años, y muy posiblemente hace más de cuatro mil millones, en el período de los primeros seiscientos millones tras la formación del planeta. Su conclusión se basa en una suposición razonable sobre los organismos primitivos. Hace algo menos de tres mil millones de años, comenzaron a aparecer en la atmósfera de la Tierra cantidades considerables de oxígeno. Lo sabemos partiendo del registro geológico terrestre al margen de cualquier resto fósil: el oxígeno favorece la lenta oxidación de las rocas ricas en hierro, lo que genera preciosas tonalidades rojizas,



como las del Gran Cañón de Arizona. Las rocas de la era anterior al oxígeno no exhiben estos colores ni ningún signo revelador de la presencia de dicho elemento.

La aparición de oxígeno atmosférico fue la mayor contaminación jamás padecida por la Tierra. El oxígeno atmosférico hace algo más que combinarse con el hierro: también coge alimento de las bocas (metafóricas) de organismos primitivos al combinarse con todas las moléculas simples que, de lo contrario, habrían podido proporcionar nutrientes a formas de vida temprana. Por consiguiente, la aparición del oxígeno en la atmósfera terrestre significó que todas las formas de vida tuvieron que adaptarse o morir, y que si la vida no hubiera aparecido entonces, no habría podido hacerlo después, toda vez que los organismos en ciernes no habrían tenido nada que comer porque su comida potencial habría resultado oxidada. La adaptación evolutiva a esta contaminación funcionó bien en muchos casos, como pueden atestiguar todos los animales que respiran oxígeno. Escondarse del oxígeno también surtió efecto. A día de hoy, el estómago de cada animal, incluido el nuestro, alberga miles de millones de organismos que prosperan en el medio anóxico que les procuramos, pero morirían si estuvieran expuestos al aire.

¿Cómo acabó la atmósfera terrestre siendo relativamente rica en oxígeno? Buena parte del mismo derivaba de organismos minúsculos que flotaban en el mar, los cuales lo liberaban como parte de su fotosíntesis. Habría aparecido algo de oxígeno incluso en ausencia de vida, cuando los rayos ultravioleta del Sol descompusieron moléculas de H<sub>2</sub>O de la superficie de los océanos, lo que liberó en el aire átomos

de oxígeno e hidrógeno. Siempre que un planeta expone proporciones considerables de agua líquida a la luz de las estrellas, su atmósfera debe asimismo adquirir oxígeno, de forma lenta, pero segura, a lo largo de cientos o miles de millones de años. El oxígeno atmosférico también podría impedir la vida al combinarse con todos los nutrientes posibles que pueden sustentarla. ¡El oxígeno mata! No es lo que solemos decir de este octavo elemento de la tabla periódica, pero si hablamos de la vida en el conjunto del cosmos, el veredicto parece acertado: la vida debió de comenzar pronto en la historia del planeta, de lo contrario la aparición de oxígeno en su atmósfera habría dado al traste con todo para siempre.

\* \* \* \*

Por una extraña coincidencia, la época perdida del registro geológico que incluye el origen de la vida incluye también la denominada «era del bombardeo», que abarca estos primeros centenares de millones de años críticos posteriores a la formación de la Tierra. Todas las partes de la superficie terrestre debieron de soportar entonces una continua lluvia de objetos. Durante estos cientos de miles de milenios, objetos grandes como el que provocó el Cráter del Meteorito en Arizona seguramente golpearon el planeta varias veces cada siglo, y algunos objetos mayores, de varios kilómetros de diámetro, chocaron cada pocos miles de años. Cada impacto importante habría causado un remodelado local de la superficie, por lo que cien mil impactos habrían producido cambios globales en la topografía planetaria.

¿Cómo afectaron estos impactos al origen de la vida? Según los biólogos, habrían podido desencadenar tanto la aparición como la

extinción de la vida no una vez, sino varias veces. Gran parte del material caído durante la era del bombardeo se componía de cometas, que son en esencia grandes bolas de nieve cargadas de tierra y piedras pequeñas. Esta «nieve» cometaria consta de agua congelada y dióxido de carbono congelado, conocido comúnmente como «hielo seco». Además de nieve, polvo y piedras ricas en minerales y metales, los cometas que bombardearon la Tierra durante sus primeros centenares de millones de años contenían muchos tipos diferentes de moléculas pequeñas, como metano, amoníaco, alcohol metílico, cianuro de hidrógeno o formaldehído. Estas moléculas, junto con el agua, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, procuran la materia prima para la vida. Todos constan de hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, y todos representan los primeros pasos en la creación de moléculas complejas.

Por tanto, el bombardeo cometario parece haber proporcionado a la Tierra algo del agua para sus mares y material a partir del cual pudiera comenzar la vida. La propia vida acaso llegara en estos cometas, aunque sus bajas temperaturas, normalmente de cientos de grados Fahrenheit bajo cero, desmienten la formación de moléculas realmente complejas. De todos modos, al margen de si la vida llegó o no con los cometas, los objetos más grandes que cayeron durante la era del bombardeo pudieron muy bien haber destruido la vida surgida hasta entonces en la Tierra. La vida tal vez había comenzado muchas veces, al menos en sus formas más primitivas, a trompicones intermitentes, de manera que cada nueva serie de organismos sobrevivía cientos de miles o incluso millones de años, hasta que la

colisión de un objeto especialmente grande causaba tales estragos que toda existencia quedaba destruida, sólo para resurgir, y ser destruida de nuevo, tras el paso de un período similar de tiempo.

Dos hechos bien establecidos pueden darnos cierta seguridad respecto del origen de la vida a base de intermitencias. En primer lugar, la vida apareció en el planeta más pronto que tarde, durante el primer tercio de su existencia. Si la vida pudo surgir, y de hecho surgió, en un lapso de mil millones de años, quizá podría hacerlo en mucho menos tiempo. Puede que el origen de la vida requiera apenas unos millones de años, o acaso unas decenas de millones. Segundo, sabemos que los choques entre objetos grandes y la Tierra, a intervalos de tiempo medidos en decenas de millones de años, acabaron con casi todas las especies vivas del planeta. El caso más famoso, la extinción del Cretácico-Terciario hace sesenta y cinco millones de años, mató a todos los dinosaurios no aves, además de muchísimas otras especies. Pero incluso esta extinción masiva quedó lejos de la más importante, la del Pérmico-Triásico, que hace doscientos cincuenta y dos millones de años acabó con casi el 90% de todas las especies de vida marina y el 70% de todas las de vertebrados terrestres, con lo que los hongos pasaron a ser las formas de vida terrestre dominantes.

Las extinciones masivas del Cretácico-Terciario y el Pérmico-Triásico derivaron de choques entre la Tierra y objetos de dos o tres docenas de kilómetros de diámetro. Los geólogos han descubierto un enorme cráter de impacto de sesenta y cinco millones de años de edad, coincidente en el tiempo con la extinción del Cretácico-Terciario, que

se extiende por el norte de la península del Yucatán y el lecho marino contiguo. Existe un gran cráter de la misma edad que la extinción del Pérmico-Triásico, descubierto frente a la costa noroeste de Australia, si bien este moribundo masivo habría podido surgir de algo más aparte de la colisión, acaso de erupciones volcánicas sostenidas. Incluso el ejemplo individual de la extinción de los dinosaurios en el Cretácico-Terciario nos recuerda el inmenso daño que puede causar a la vida el impacto de un cometa o un asteroide. En la era del bombardeo, la Tierra seguramente se tambaleó debido no sólo a esta clase de impactos, sino también a los efectos mucho más graves de las colisiones con objetos de 80, 150 o incluso 400 kilómetros de diámetro. Cada una de estas colisiones terminaría con la vida o bien del todo, o bien hasta el punto de que sólo un diminuto porcentaje de organismos consiguiera sobrevivir, y dichas colisiones probablemente se produjeron con mucha más frecuencia que las actuales con objetos de 15 kilómetros de diámetro. Nuestros conocimientos actuales de astronomía, biología, química y geología apuntan a una Tierra que muy pronto estuvo preparada para generar vida, y a un entorno cósmico preparado para eliminarla. Y dondequiera que se hayan formado recientemente una estrella y sus planetas, quizás incluso ahora un intenso bombardeo de desechos del proceso de formación esté eliminando todas las formas de vida de esos planetas.

Hace más de cuatro mil millones de años, la mayor parte de los desechos de la formación del sistema solar chocaban con un planeta o se incorporaban a órbitas donde no podían producirse colisiones. Como consecuencia de ello, nuestro vecindario cósmico dejó poco a

poco de ser una región de bombardeo continuo para tener la calma global de la que disfrutamos en la actualidad, interrumpida sólo cada varios millones de años por colisiones con objetos lo bastante grandes para amenazar la vida en la Tierra. Podemos comparar la amenaza antigua y la actual de los impactos cada vez que miremos la Luna llena. Las gigantescas llanuras de lava que conforman la cara del «hombre en la Luna» son el resultado de tremendos impactos de hace unos cuatro mil millones de años, cuando terminó la era de los bombardeos, mientras el cráter denominado Tycho, de 90 kilómetros de diámetro, surgía de un impacto más pequeño, pero todavía considerable, producido poco después de que los dinosaurios desaparecieran de la Tierra.

No sabemos si hace cuatro mil millones de años ya había vida que hubiera sobrevivido a la tormenta de impactos tempranos, o si aquella surgió en la Tierra sólo después de una tranquilidad relativa. Estas dos alternativas incluyen la posibilidad de que objetos llegados de fuera sembrasen nuestro planeta de vida o bien en la era del bombardeo, o bien poco después. Si la vida comenzaba y se extinguía repetidamente mientras llovía caos del cielo, los procesos mediante los cuales se originó parecen sólidos, por lo que sería lógico suponer que se hayan producido una y otra vez en otros mundos parecidos al nuestro. Si, en cambio, la vida surgió en la Tierra sólo una vez, fuera vida local o resultado de una siembra cósmica, acaso su origen se debiera sólo al azar.

En cualquier caso, la pregunta clave de cómo se inició realmente la vida en la Tierra, una única vez o varias veces, todavía no tiene

respuesta, si bien las conjeturas sobre el tema ya tienen una larga y fascinante historia. A quienes sepan descifrar el misterio les aguardan importantes recompensas. Desde la costilla de Adán al monstruo de Frankenstein, los seres humanos han contestado a la pregunta del origen de la vida recurriendo a un misterioso *élan vital* que infunde vida a una materia por lo demás inanimada.

Los científicos quieren explorar más a fondo, con experimentos de laboratorio y análisis de registros fósiles que permitan establecer la altura de la barrera entre la materia animada y la inanimada, y descubrir cómo la naturaleza abrió una brecha en este dique. Las primeras discusiones científicas sobre el origen de la vida imaginaban la interacción de moléculas simples, concentradas en charcas o estanques de marea, para crear otras más complejas. En 1871, una docena de años después de la publicación del maravilloso libro *El origen de las especies*, en el que se conjeturaba que «todos los seres orgánicos que han vivido en esta Tierra han descendido de alguna forma primordial», Charles Darwin escribió a su amigo Joseph Hooker que:

*Se dice con frecuencia que todas las condiciones para la primera producción de un organismo vivo que pudiesen existir están ahora presentes. Pero si (¡oh!, qué «si» tan enorme) pudiéramos concebir un estanque pequeño con amoníaco y sales fosfóricas, luz, con la presencia de calor, electricidad, etc., en el que se formó químicamente un compuesto de proteínas listas para sufrir cambios aún más complejos, en la actualidad tal materia sería*

*instantáneamente devorada o absorbida, lo cual no habría podido ser el caso antes de que se formaran los seres vivos.*

En otras palabras, cuando la Tierra estaba madura para la vida, quizá ya había un exceso de compuestos básicos necesarios para el metabolismo, sin nada que pudiera comérselos (y, como hemos visto, sin oxígeno para combinarse con ellos y arruinar sus posibilidades de servir de comida).

Desde una óptica científica, nada como los experimentos que se pueden comparar con la realidad. En 1953, mientras trataba de verificar la idea de Darwin sobre el origen de la vida en charcas o estanques de marea, Stanley Miller, a la sazón estudiante norteamericano de posgrado que trabajaba en la Universidad de Chicago con el premio Nobel Harold Urey, llevó a cabo un famoso experimento que reproducía las condiciones de una charca de agua hipotética y muy simplificada de la Tierra temprana. Miller y Urey llenaron a medias un matraz de laboratorio con agua que remataron con una mezcla gaseosa de vapor de agua, hidrógeno, amoníaco y metano. Calentaron el matraz por abajo, con lo que se vaporizó parte del contenido, que trasladaron por un tubo de vidrio a otro matraz, donde una descarga eléctrica simuló el efecto de un rayo. La mezcla fue devuelta desde ahí a su recipiente original, lo cual completó el ciclo que se repetiría una y otra vez a lo largo de varios días, en vez de varios miles de años. Tras este pequeñísimo intervalo temporal, Miller y Urey observaron que el agua del matraz abundaba en «porquería orgánica», un compuesto formado por numerosas



moléculas complejas, entre ellas diferentes clases de azúcares, así como dos de los aminoácidos más simples, alanina y guanina.

Como las moléculas proteínicas consisten en veinte tipos de aminoácidos dispuestos en distintas formas estructurales, el experimento Miller-Urey nos permite recorrer, en un lapso extraordinariamente breve, un buen trecho del camino que va desde las moléculas más sencillas a las moléculas de aminoácidos que constituyen los componentes esenciales de los organismos vivos. El experimento Miller-Urey también fabricó algunas de las moléculas moderadamente complejas denominadas «nucleótidos», que procuran el elemento estructural clave del ADN, la molécula gigante que lleva las instrucciones para formar copias nuevas de un organismo. De todos modos, aún queda mucho por hacer antes de que surja vida de los laboratorios experimentales. Una distancia enormemente significativa, hasta ahora no salvada por inventos o experimentos humanos, separa la formación de aminoácidos —aunque los experimentos produjeran los veinte, cosa que no hacen— y la creación de vida. También se han observado moléculas de aminoácidos en algunos de los meteoritos más viejos y menos alterados, que al parecer no han cambiado nada durante los casi cuatro mil seiscientos millones de años de historia del sistema solar. Esto respalda la conclusión general de que los procesos naturales pueden fabricar aminoácidos en muchas situaciones diferentes. Una visión mesurada de los resultados experimentales no detecta nada tan sorprendente: las moléculas más simples observadas en organismos vivos se forman de prisa en muchas situaciones, pero la

vida no. La pregunta clave sigue ahí: ¿qué hace un conjunto de moléculas, incluso uno imprimado para que aparezca vida, para llegar a generar vida propiamente dicha?

Como la Tierra temprana no contó con semanas, sino con muchos millones de años para originar vida, los resultados experimentales Miller-Urey parecían respaldar el modelo charca-estanque. En la actualidad, sin embargo, la mayoría de los científicos que quieren explicar el origen de la vida consideran que el experimento estuvo muy limitado por la técnica. El cambio de actitud se debió no a dudas sobre los resultados del test, sino más bien a la identificación de un fallo potencial en las hipótesis subyacentes al experimento. Para entender este fallo, hemos de tener en cuenta lo que ha demostrado la biología moderna acerca de las formas de vida más antiguas.

\* \* \* \*

Actualmente, la biología evolutiva se apoya en el estudio meticuloso de las semejanzas y las diferencias entre criaturas vivas en cuanto a sus moléculas de ADN y ARN, portadoras de la información que le dice a un organismo cómo debe funcionar y reproducirse. Una comparación detallada de estas moléculas relativamente enormes y complejas ha permitido a los biólogos, entre ellos el gran pionero Carl Woese, crear un árbol evolutivo que contiene las «distancias evolutivas» entre diversas formas de vida, determinadas por el grado en que dichas formas tienen un ADN y un ARN no idénticos.

El árbol de la vida consta de tres grandes ramas —arqueas, bacterias y eucariotas— que sustituyen a los «reinos» biológicos antes considerados fundamentales. En los eucariotas se incluye todo

organismo cuyas células individuales tengan un centro o núcleo bien definido que contenga el material genético regulador de la reproducción de las células. Debido a esta característica, los eucariotas son más complejos que los otros dos tipos, y de hecho todas las formas de vida reconocibles para el no experto pertenecen a esta rama. Podemos concluir razonablemente que los eucariotas aparecieron después que las arqueas y las bacterias. Y como las bacterias están más lejos del origen del árbol de la vida que las arqueas —por la sencilla razón de que su ADN y su ARN han cambiado más—, estas, como su nombre indica, representan casi con seguridad las formas de vida más antiguas. Y ahora el bombazo. A diferencia de las bacterias y los eucariotas, las arqueas constan sobre todo de «extremófilos», organismos que aman la vida y viven para amar en lo que ahora denominamos «condiciones extremas»: temperaturas cercanas o superiores al punto de ebullición del agua, acidez elevada u otras situaciones que acabarían con otras formas de vida. (Por supuesto, si los extremófilos contaran con sus propios biólogos, se clasificarían a sí mismos como normales, y cualquier vida que prosperara a temperatura ambiente sería extremófila). Las investigaciones modernas sobre el árbol de la vida tienden a sugerir que esta comenzó con los extremófilos, y sólo más adelante evolucionó y se convirtió en formas de vida que sacan provecho de lo que denominamos «condiciones normales».

En este caso, la «pequeña charca caliente» de Darwin así como los estanques de marea replicados en el experimento Miller Urey se desvanecerían en la niebla de las hipótesis rechazadas. Los ciclos

relativamente suaves de «seco» y «húmedo» pasaron a la historia. Ahora, quienes quieran encontrar los lugares donde acaso comenzara la vida deberían buscar escenarios donde brotase de la Tierra agua calentísima, posiblemente cargada de ácidos.

Las últimas décadas han permitido a los oceanógrafos descubrir este tipo de sitios, además de las extrañas formas de vida que sustentan. En 1977, dos científicos al mando de un sumergible de aguas profundas descubrieron las primeras fumarolas marinas, a más de 2 kilómetros por debajo de la tranquila superficie del océano Pacífico, cerca de las islas Galápagos. En estas fumarolas, la corteza de la Tierra se comporta localmente como una cocina doméstica: genera alta presión dentro de una olla resistente con una tapa que se puede cerrar y calienta agua por encima de su temperatura normal de ebullición sin dejarle alcanzar una ebullición real. Como la tapa se levanta un poco, el agua presurizada y super calentada sale a borbotones de debajo de la corteza terrestre y pasa a las frías cuencas oceánicas.

El agua marina super calentada que emerge de estas fumarolas lleva minerales disueltos que rápidamente se reúnen y solidifican para rodearlas con chimeneas gigantes, de roca porosa, muy calientes en el centro y muy frías en los bordes que están en contacto directo con el agua marina. A lo largo de este gradiente de temperaturas viven innumerables formas de vida que no han visto nunca el Sol y no les importa nada el calentamiento solar, aunque sí requieren el oxígeno disuelto en el agua, que a su vez proviene de vida impulsada por el sol cerca de la superficie. Estos bichos duros viven de energía

geotérmica, que combina calor procedente de la formación de la Tierra con calor producido continuamente por la desintegración radiactiva de isótopos inestables como el aluminio 26, que dura millones de años, o el potasio 40, que dura miles de millones.

Cerca de estas fumarolas, muy por debajo de las profundidades a las que puede penetrar la luz del sol, los oceanógrafos descubrieron gusanos tubulares gigantes, largos como un hombre, que crecían en grandes colonias de bacterias y otras criaturas pequeñas. En vez de extraer su energía de la luz solar, como hacen las plantas en la fotosíntesis, la vida cercana a las fumarolas de aguas profundas se basa en la «quimiosíntesis», la producción de energía mediante reacciones químicas, que su vez dependen del calentamiento geotérmico.

¿Cómo se produce esta quimiosíntesis? El agua caliente que se derrama de las fumarolas va cargada de sulfuro de hidrógeno y compuestos de hidrógeno-hierro. Las bacterias próximas a las fumarolas combinan estas moléculas con los átomos de hidrógeno y oxígeno de las moléculas de agua y con los átomos de carbono y oxígeno de las moléculas de dióxido de carbono disueltas en el agua de mar. Estas reacciones forman moléculas más grandes —hidratos de carbono— a partir de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno. Así pues, las bacterias cercanas a las fumarolas de aguas profundas imitan las actividades de sus primos de arriba, que fabrican, asimismo, hidratos de carbono a partir de carbono, oxígeno e hidrógeno. Un conjunto de microorganismos obtiene energía para formar hidratos de carbono partiendo de la luz solar, y el otro gracias

a reacciones químicas que tienen lugar en los lechos marinos. Muy cerca de estas fumarolas, otros organismos consumen las bacterias fabricantes de hidratos de carbono, beneficiándose de su energía igual que los animales comen plantas o animales herbívoros.

No obstante, cerca de las fumarolas marinas no sólo se producen reacciones químicas para producir moléculas de hidratos de carbono. Los átomos de hierro y azufre, no incluidos en la molécula del hidrato, se combinan para generar compuestos propios, sobre todo cristales de piritita de hierro, denominada comúnmente «oro del tonto» y conocida por los antiguos griegos como «piedra de fuego», porque un buen golpe con otra piedra hace saltar chispas. La piritita de hierro, el mineral de azufre más abundante en la Tierra, quizás ha desempeñado un papel crucial en el origen de la vida al estimular la formación de moléculas parecidas a los hidratos de carbono. Esta hipótesis surgió de la mente de un abogado de patentes alemán y biólogo aficionado, Günter Wächtershäuser, cuya profesión no le excluye precisamente de la especulación biológica más de lo que impidió a Einstein su trabajo de abogado de patentes tener grandes percepciones en el mundo de la física. (Cierto, Einstein tenía un título superior en física, mientras que Wächtershäuser es, ante todo, autodidacta).

En 1994, Wächtershäuser propuso que las superficies de cristales de piritita de hierro, formadas de manera natural por combinación de hierro y azufre surgidos de fumarolas del fondo marino al principio de la historia de la Tierra, eran lugares idóneos donde podían acumularse moléculas ricas en carbono al adquirir átomos de

carbono nuevos del material expulsado por las fumarolas cercanas. Como quienes conjeturaban que la vida empezó en charcas y estanques de marea, Wächtershäuser no tiene claro cómo pasar de los componentes esenciales a los seres vivos. No obstante, con este énfasis en el origen de la vida en zonas de altas temperaturas, quizás esté en el buen camino (como él está convencido). Al hacer referencia a la muy ordenada estructura de los cristales de piritita de hierro, en cuyas superficies acaso se formasen las primeras moléculas complejas para la vida, Wächtershäuser ha hecho frente a sus críticos, en congresos científicos, con la sorprendente afirmación de que «algunos dicen que el origen de la vida extrae orden del caos, pero yo digo “¡orden del orden del orden!”». Pronunciada con brío alemán, esta frase adquiere cierta contundencia, si bien sólo el tiempo dirá lo acertada que puede llegar a ser.

Entonces, ¿qué modelo básico del origen de la vida es más susceptible de ser correcto, los estanques de marea en el borde de los mares o las fumarolas super calentadas en los lechos marinos? De momento, las apuestas están más o menos igualadas. Algunos expertos en el origen de la vida han puesto en entredicho la afirmación de que las formas más antiguas de vida vivieron a temperaturas elevadas, pues los métodos actuales de ubicación de organismos en diferentes puntos a lo largo de las ramas del árbol de la vida siguen siendo objeto de debate. Además, los programas informáticos que rastrean cuántos compuestos de distintos tipos existían en las viejas moléculas de ARN, las primas hermanas del ADN que al parecer precedió al ADN en la historia de la vida, sugieren que los compuestos favorecidos por

las altas temperaturas aparecieron sólo después de que la vida hubiera experimentado un período de su historia a temperaturas relativamente bajas.

Así pues, el resultado de nuestra investigación más sutil, como suele suceder en la ciencia, resulta perturbador para quienes buscan certezas. Aunque podemos establecer aproximadamente cuándo comenzó la vida en la Tierra, no sabemos dónde ni cómo se produjo este maravilloso acontecimiento. Hace poco, los paleontólogos han dado a este escurridizo antecesor de la vida en la Tierra el nombre de LUCA, por el último antepasado común universal (*last universal common ancestor*). (Véase con qué firmeza las mentes de estos científicos siguen fijas en el planeta: deberían llamarlo LECA, por el último antepasado común terrestre [*last earthly common ancestor*]). De momento, dar nombre a este antecesor —una serie de organismos primitivos que compartían los mismos genes— pone sobre todo de relieve la distancia que todavía hemos de recorrer para ser capaces de descorrer el velo que separa el origen de la vida y nuestros conocimientos.

En cuanto a nuestros comienzos, hay algo más que una curiosidad natural. Diferentes orígenes de la vida suponen distintas posibilidades para el origen, la evolución y la supervivencia tanto aquí como en otros lugares del cosmos. Por ejemplo, los lechos marinos pueden llegar a ser el ecosistema más estable del planeta. Si un asteroide gigante se estrellara contra la Tierra y extinguiera la vida en la superficie, casi seguro que los extremófilos oceánicos seguirían impertérritos y tan felices. Podrían incluso evolucionar para repoblar



la superficie de la Tierra tras cada episodio de extinción. Y si el Sol fuera misteriosamente arrancado del centro del sistema solar y la Tierra fuera a la deriva por el espacio, este hecho apenas merecería atención en la prensa extremófila, pues la vida cerca de las fumarolas proseguiría relativamente sin novedad. Pero en cinco mil millones de años, el Sol llegará a ser un gigante rojo mientras se expande para llenar el sistema solar interior. Entretanto, los mares de la Tierra hervirán hasta vaporizarse parcialmente. Esto sí sería noticia para cualquier forma de vida terrestre.

La omnipresencia de los extremófilos en la Tierra nos lleva a una pregunta de calado: ¿podría existir vida en lo más profundo de los planetesimales o los planetas huérfanos que fueron expulsados del sistema solar durante su formación? Sus depósitos «geo»-térmicos podrían durar miles de millones de años. Y ¿qué hay de los innumerables planetas expulsados a la fuerza por todos los sistemas solares que han llegado a formarse? ¿Podría estar el sistema interestelar rebosante de vida... formada y evolucionada en niveles profundos de estos planetas sin estrella? Antes de que los astrofísicos reconocieran la importancia de los extremófilos, imaginaron una «zona habitable» alrededor de cada estrella, en la cual el agua u otra sustancia podría mantenerse en estado líquido, lo que permitiría a las moléculas flotar, interaccionar y producir más moléculas complejas. En la actualidad, hemos de modificar este concepto, de tal modo que, lejos de ser una región ordenada alrededor de una estrella que recibe la cantidad justa de luz solar, una zona habitable puede estar en cualquier lugar y en todas partes, sustentada no por

calentamiento de la luz de las estrellas, sino por fuentes de calor localizadas, a menudo generadas por rocas radiactivas. Así pues, la casita de los Tres Osos quizá no era un sitio especial en los cuentos de hadas. La residencia de cualquiera, incluso de uno de los Tres Cerditos, podría contener un cuenco de comida a la temperatura idónea.

Pues bien, este cuento de hadas ha resultado ser prometedor, incluso clarividente. La vida, lejos de ser rara y valiosísima, podría ser algo tan común como los planetas. Sólo nos queda ir a buscarla.

## Capítulo 16

### La búsqueda de vida en el sistema solar

Las posibilidades de vida fuera de la Tierra han creado nuevos oficios, aplicables sólo a unos cuantos individuos, pero potencialmente capaces de un crecimiento súbito. Los «astrobiólogos» o los «bioastrónomos» forcejean con los problemas planteados por la vida fuera de la Tierra, al margen de las formas que pueda adoptar. De momento, los primeros sólo pueden especular sobre la vida extraterrestre o simular condiciones extraterrestres, a las que o bien exponen formas de vida terrestre (y verifican cómo pueden sobrevivir a situaciones duras y desconocidas), o bien someten mezclas de moléculas inanimadas, creando una variante del clásico experimento Miller-Urey o una glosa de la investigación de Wächtershäuser. Esta combinación de especulación y experimentación los ha conducido a varias conclusiones comúnmente aceptadas, que —en la medida en que describen el universo real— tienen repercusiones muy significativas. En la actualidad, los astrobiólogos creen que la existencia de vida en el conjunto del universo requiere lo siguiente:

1. Una fuente de energía;
2. Un tipo de átomo que permita la existencia de estructuras complejas;
3. Un líquido solvente en el que las moléculas puedan flotar e interactuar; y
4. Tiempo suficiente para que surja y evolucione la vida.

En esta breve lista, los requisitos 1) y 4) suponen sólo barreras bajas para el origen de la vida. Cada estrella del cosmos representa una fuente de energía, y todas menos el más masivo 1% de estas estrellas dura centenares de millones o miles de millones de años. Nuestro Sol, por ejemplo, ha aportado a la Tierra un suministro constante de calor y luz durante los últimos cinco mil millones de años, y seguirá haciéndolo durante otros cinco mil millones. Además, ahora vemos que la vida puede existir sin ninguna luz solar, y obtener su energía del calentamiento geotérmico y reacciones químicas. La energía geotérmica deriva, en parte, de la radiactividad de isótopos de elementos como el potasio, el torio y el uranio, cuya desintegración se produce en escalas temporales medidas en miles de millones de años, comparables a la vida de las estrellas similares al Sol.

\* \* \* \*

En la Tierra, la vida satisface el punto 2), el requisito de un átomo creador de estructuras, con el elemento carbono. Cada átomo de carbono puede unirse a uno, dos, tres o cuatro átomos, por lo que es el elemento clave de la estructura de la vida que conocemos. En cambio, cada átomo de hidrógeno puede unirse sólo a otro átomo, y el oxígeno sólo a uno o dos. Como los átomos de carbono pueden enlazarse hasta con otros cuatro, constituyen la «columna vertebral» de todas las moléculas —menos las más simples— de los organismos vivos, como las proteínas y los azúcares.

La capacidad para crear moléculas complejas ha convertido el carbono en uno de los cuatro elementos más abundantes —junto con el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno— de todas las formas de vida

en la Tierra. Hemos visto que, aunque los cuatro elementos más abundantes de la corteza terrestre tienen sólo un emparejamiento con estos cuatro, los seis más abundantes del universo incluyen los cuatro de la vida en la Tierra además de los gases inertes helio y neón. Este hecho podría respaldar la hipótesis de que la vida en la Tierra comenzó en las estrellas, o en objetos cuya composición se parece a la de las estrellas. En cualquier caso, el hecho de que el carbono constituya una fracción relativamente pequeña de la superficie terrestre, pero una gran parte de cualquier criatura viva, testimonia el papel fundamental del carbono en la provisión de estructura a la vida.

¿Es esencial el carbono para la vida en el conjunto del cosmos? ¿Qué hay del silicio, que suele aparecer en novelas de ciencia ficción como átomo estructural básico de formas vivientes exóticas? Como los de carbono, los átomos de silicio se unen hasta con otros cuatro átomos, pero la naturaleza de estos enlaces hace que el silicio tenga muchas menos probabilidades que el carbono para proporcionar la base estructural de las moléculas complejas. Como los enlaces del carbono con otros átomos son más bien débiles, las uniones carbono-oxígeno, carbono-hidrógeno y carbono-carbono, por ejemplo, se rompen con relativa facilidad. Esto permite a las moléculas basadas en el carbono formar tipos nuevos al chocar e interactuar, una parte esencial de la actividad metabólica de cualquier forma de vida. En comparación, el silicio se adhiere con fuerza a muchos otros tipos de átomos, en concreto el oxígeno. La corteza terrestre consta sobre todo de átomos de oxígeno y silicio, unidos con la suficiente fuerza como para durar

millones de años, y por tanto incapaces de participar en la formación de nuevas clases de moléculas. La diferente manera en que los átomos de silicio y carbono se combinan con otros átomos respalda la idea de que la columna vertebral de la mayor parte de la posible vida extraterrestre —si no toda— estará formada a partir del carbono, como la nuestra, no del silicio. Aparte del carbono y el silicio, sólo tipos de átomos relativamente exóticos, con una presencia cósmica muy inferior a la del silicio o el carbono, son capaces de unirse a otros cuatro átomos. Por razones estrictamente numéricas, la posibilidad de que la vida utilice átomos como el germanio, igual que en la Tierra, es muy remota.

\* \* \* \*

El requisito 3) especifica que todas las formas de vida necesitan un líquido solvente en el que las moléculas puedan flotar e interactuar. La palabra «solvente» subraya que un líquido posibilita esta situación de flotar-e-interactuar, en lo que los químicos denominan una «solución». Los líquidos permiten concentraciones relativamente elevadas de moléculas, pero no imponen restricciones muy estrictas a sus movimientos. En cambio, los sólidos fijan a los átomos y las moléculas en su sitio. En realidad, chocan e interactúan, pero lo hacen mucho más despacio que en los líquidos. En los gases, las moléculas se desplazan con más libertad aún que en los líquidos, y pueden colisionar incluso con menos trabas, pero las colisiones e interacciones se producen con mucha menos frecuencia que en los líquidos, pues por lo general la densidad de un líquido es mil veces, o más, superior a la de un gas. «Si tuviéramos mundo de sobra, y

tiempo...», escribió Andrew Marvell, quizá descubriríamos vida originada en gases y no en líquidos. En el cosmos real, con una edad de sólo catorce mil millones de años, los astrobiólogos no esperan encontrar vida iniciada en un gas. Lo que sí suponen es que toda vida extraterrestre, como toda vida en la Tierra, consiste en bolsas de líquido, en las cuales se producen procesos químicos complejos a medida que distintas clases de moléculas chocan y forman otras nuevas.

¿Este líquido ha de ser agua? Vivimos en un planeta acuoso cuyos mares cubren casi tres cuartas partes de su superficie. Esto nos hace excepcionales en nuestro sistema solar, y acaso muy inusuales en cualquier otro lugar de la galaxia de la Vía Láctea. El agua, que consta de moléculas compuestas de dos de los elementos más abundantes del cosmos, aparece al menos en cantidades moderadas en cometas, meteoritos y en la mayoría de los planetas del Sol y sus lunas. Por otro lado, el agua líquida del sistema solar existe sólo en la Tierra y debajo de la superficie helada de la gran luna Europa de Júpiter, cuyo mar global es todavía una posibilidad, no una realidad verificada. ¿Podrían otros compuestos ofrecer mejores oportunidades para los estanques o los mares líquidos, donde las moléculas se abrieran camino hacia la vida? Los tres compuestos más abundantes que pueden permanecer líquidos en un intervalo significativo de temperaturas son el amoníaco, el etano y el alcohol metílico. Cada molécula de amoníaco consta de tres átomos de hidrógeno y uno de nitrógeno; el etano, de dos de carbono y seis de hidrógeno; y el alcohol metílico, de cuatro de hidrógeno, uno de carbono y uno de oxígeno.

Cuando pensamos en las posibilidades de vida extraterrestre, podemos imaginar razonablemente a criaturas que utilizan amoníaco, etano o alcohol metílico igual que en la Tierra se utiliza agua —como líquido fundamental en el que presumiblemente se originó la vida y que aporta el medio en el que las moléculas pueden ir flotando hasta la gloria—. Los cuatro planetas gigantes del Sol poseen grandes cantidades de amoníaco, además de cantidades más pequeñas de alcohol metílico y etano, y la gran luna Titán de Saturno podría muy bien tener lagos de etano líquido en su gélida superficie. La elección de un determinado tipo de molécula como líquido básico de la vida implica la existencia de otro requisito: la sustancia debe seguir siendo líquida. No cabría esperar que se originase vida en el casquete polar de la Antártida o en nubes ricas en vapor de agua, pues necesitamos líquidos que posibiliten abundantes interacciones moleculares. Bajo presiones atmosféricas como las de la superficie de la Tierra, el agua sigue siendo líquida entre 0 y 100 grados Celsius (entre 32 y 212 grados Fahrenheit). Las tres alternativas de solventes permanecen en estado líquido en intervalos de temperaturas muy por debajo del agua. El amoníaco, por ejemplo, se congela a -78 grados Celsius y se vaporiza a -33 grados, lo que le impide ser un solvente líquido para la vida en la Tierra; sin embargo, en un mundo con una temperatura setenta y cinco grados más fría que la nuestra, donde el agua no pudiera ser el solvente para la vida, el talismán podría ser muy bien el amoníaco.

\* \* \* \*



El rasgo distintivo más importante del agua no es su bien merecida insignia de «solvente universal», sobre la que aprendimos algo en clase de química, ni el amplio intervalo de temperaturas en el que permanece en estado líquido. El atributo más notable del agua reside en el hecho de que mientras la mayoría de las cosas —agua incluida— se encogen y se vuelven más densas al enfriarse, el agua que se enfría por debajo de 4 grados Celsius se expande, con lo que se torna cada vez menos densa a medida que la temperatura desciende hasta cero. Y luego, cuando se congela a 0 grados Celsius, se transforma en una sustancia menos densa incluso que el agua líquida. El hielo flota, lo que es una buena noticia para los peces. Durante el invierno, cuando la temperatura del aire disminuye bajo cero, el agua a 4 grados se hunde hasta el fondo y ahí se queda, pues es más densa que el agua fría de encima, mientras en la superficie se forma muy lentamente una capa flotante de hielo, lo que aísla el agua más caliente de abajo. Sin esta inversión de la densidad por debajo de 4 grados, los estanques y los lagos se congelarían de abajo arriba, no de arriba abajo. Cada vez que la temperatura del aire exterior disminuyera por debajo de cero, la superficie superior de un estanque se enfriaría y se hundiría hacia el fondo al tiempo que el agua caliente subiría desde abajo. Esta convección forzada haría descender enseguida la temperatura del agua a 0 grados a medida que la superficie comenzara a congelarse. A continuación, el hielo sólido y más denso bajaría al fondo. Si toda la masa de agua no se congelara desde el fondo hacia arriba en una única estación, la acumulación de hielo en el fondo permitiría que la congelación total se produjera en el

transcurso de varios años. En un mundo así, la pesca en el hielo produciría aún peores resultados que en la actualidad, pues todos los peces estarían muertos —congelados en fresco—. Los pescadores se encontrarían en una capa de hielo sumergida por debajo de toda el agua líquida restante, o encima de una masa de agua completamente congelada. Ya no harían falta rompehielos para cruzar el congelado Ártico: o bien estaría congelado todo el océano, o bien las partes congeladas se habrían hundido hasta el fondo y podríamos navegar con nuestra embarcación sin incidentes. Podríamos deslizarnos y patinar en lagos y estanques sin miedo a caer por un agujero. En este mundo alterado, los cubitos de hielo y los icebergs se hundirían, de modo que en abril de 1912, el *Titanic* habría llegado sin novedad al puerto de Nueva York, insumergible (y no sumergido), como se anunciaba.

Por otro lado, quizás aquí se noten nuestros prejuicios de latitudes medias. La mayoría de los mares de la Tierra no están en peligro de congelarse, ni de arriba abajo ni de abajo arriba. Si el hielo se hundiera, el océano Glacial Ártico podría llegar a ser sólido, lo mismo que podría pasarles a los Grandes Lagos o al mar Báltico. Este efecto habría hecho de Brasil y la India las mayores potencias mundiales a costa de Europa y los Estados Unidos, pero en la Tierra la vida habría persistido y florecido igual.

De momento, adoptaremos la hipótesis de que el agua tiene ventajas tan importantes respecto a sus principales rivales, el amoníaco y el alcohol metílico, que la mayoría de las formas de vida extraterrestre, si no todas, deben de basarse en el mismo solvente que la vida en la

Tierra. Provistos de esta suposición, amén de la abundancia general de materia prima para la vida, el predominio de los átomos de carbono y los largos períodos de tiempo en los que la vida pudo aparecer y evolucionar, haremos una visita a nuestros vecinos reformulando la vieja pregunta: si antes decíamos ¿dónde está la vida?, ahora decimos ¿dónde está el agua?

\* \* \* \*

Si tuviéramos que evaluar la materia según el aspecto de algunos lugares secos y aparentemente hostiles de nuestro sistema solar, quizá llegaríamos a la conclusión de que el agua, aunque en la Tierra abunda mucho, en cualquier otro lugar de la galaxia es un artículo raro. Sin embargo, de todas las moléculas que pueden formarse con tres átomos, el agua es con mucho la más abundante, sobre todo porque sus dos componentes, el hidrógeno y el oxígeno, ocupan los puestos primero y tercero en la lista de la abundancia; lo cual sugiere que en vez de preguntar por qué algunos objetos tienen agua, deberíamos preguntar por qué no todos poseen grandes cantidades de esta sencilla molécula.

¿Cómo consiguió la Tierra sus mares de agua? El registro casi prístino de cráteres de la Luna nos revela que esta ha recibido impactos de objetos exteriores a lo largo de toda su historia. Quizá quepa suponer, con razón, que la Tierra también ha experimentado muchas colisiones. De hecho, el mayor tamaño y gravedad de la Tierra dan a entender que hemos sido golpeados muchas más veces, y por objetos más grandes, que la Luna. Y esto ha sido así desde su nacimiento y hasta la actualidad. Después de todo, la Tierra no

emergió de un vacío interestelar, no empezó a existir de buenas a primeras como un grumo esférico preformado, sino que creció en la nube de gas en condensación que formaron el Sol y los otros planetas. En este proceso, la Tierra se desarrolló mediante la adición de grandes cantidades de pequeñas partículas sólidas, y a la larga gracias a incesantes impactos de asteroides ricos en minerales y cometas ricos en agua. ¿Hasta qué punto incesantes? El ritmo de impactos tempranos de los cometas pudo ser lo bastante alto para habernos traído el agua de todos los mares. Esta hipótesis sigue rodeada de incertidumbres (y controversias). El agua del cometa Halley tiene una proporción de deuterio —isótopo del hidrógeno que lleva un neutrón adicional en el núcleo— muy superior a la de la Tierra. Si los mares de la Tierra llegaron en cometas, los que golpearon el planeta poco después de haberse formado el sistema solar tendrían una composición química muy distinta de la de los cometas actuales, o al menos diferente de la del tipo de cometas al que pertenece el Halley.

En todo caso, si añadimos la aportación al vapor de agua arrojado a la atmósfera por las erupciones volcánicas, no escasean las vías mediante las cuales la Tierra haya podido adquirir su provisión de agua superficial.

\* \* \* \*

Si queremos visitar un sitio sin agua ni aire, no hace falta ir más allá de nuestra Luna. La presión atmosférica de la Luna, próxima a cero, combinada con sus días de dos semanas de duración en que la temperatura alcanza los 200 grados Fahrenheit, hace que cualquier

cantidad de agua se evapore enseguida. Durante la noche lunar de dos semanas, las temperaturas pueden bajar a 250 grados bajo cero, lo suficiente para congelarlo prácticamente todo. Por tanto, los astronautas del *Apolo* que visitaron la Luna llevaron consigo el agua y el aire (y el aire acondicionado) que necesitaban para su viaje de ida y vuelta.

No obstante, sería extraño que la Tierra hubiera obtenido mucha agua mientras a la cercana Luna no le llegaba casi nada. Una posibilidad, desde luego cierta al menos en parte, es que el agua se evaporó de la superficie de la Luna mucho más fácilmente que de la Tierra debido a la menor gravedad del satélite. Otra posibilidad sugiere que las misiones lunares quizás a la larga no necesiten importar agua ni el surtido de productos derivados de la misma. Ciertas observaciones del módulo lunar *Clementine*, que llevaba un instrumento para detectar los neutrones producidos cuando partículas interestelares de movimiento rápido chocaban con átomos de hidrógeno, respaldan la vieja idea de que puede haber depósitos de hielo ultra congelados bajo cráteres próximos a los polos norte y sur de la Luna. Si la Luna recibe un número razonable de impactos anuales de desechos interplanetarios, la mezcla de estos agentes impactantes debería incluir, de vez en cuando, cometas de proporciones considerables ricos en agua, como los que han golpeado la Tierra. ¿Cuál podría ser el tamaño de estos cometas? El sistema solar contiene muchos cometas que podrían fundirse en un charco del tamaño del lago Erie.

Aunque no cabría esperar que un lago recién creado sobreviviera a muchos días lunares bajo temperaturas de 200 grados, cualquier cometa que se estrellara casualmente en el fondo de un cráter profundo cerca de uno de los polos de la Luna (o creara directamente un profundo cráter polar) quedaría envuelto en oscuridad, pues los cráteres profundos cercanos a los polos son los únicos lugares de la Luna donde «no brilla el Sol». (Si alguien creía que la Luna tiene un lado perpetuamente oscuro, es que varias fuentes le habían inducido a error, entre ellas seguramente el álbum de 1973 de Pink Floyd *Dark Side of the Moon*). Como saben bien los habitantes del Ártico y el Antártico, tan privados de luz, en estas regiones el Sol nunca asciende alto en el cielo en ningún momento del día ni en ninguna estación del año. Ahora imaginemos que vivimos en el fondo de un cráter cuyo borde supera la máxima altura jamás alcanzada por el Sol. Sin aire para dispersar luz solar en las sombras, viviríamos en una oscuridad eterna.

Pero el hielo se evapora lentamente incluso en la oscuridad fría. Fijémonos en los cubitos del congelador a la vuelta de unas largas vacaciones: el tamaño es claramente menor que cuando nos fuimos. No obstante, si el hielo se ha mezclado bien con partículas sólidas (como pasa en los cometas), puede sobrevivir miles y millones de años en el fondo de los profundos cráteres polares de la Luna. Un puesto avanzado que estableciéramos en la Luna sacaría gran provecho de su ubicación junto a este lago. Aparte de las evidentes ventajas de disponer de hielo para fundirlo, filtrarlo y luego beberlo, también podríamos beneficiarnos de la disociación del agua en sus átomos de

hidrógeno y oxígeno. Utilizaríamos el hidrógeno y algo de oxígeno como ingredientes activos del combustible del cohete, y respiraríamos el resto del oxígeno. Y en nuestro tiempo libre entre misiones espaciales, podríamos patinar un poco.

\* \* \* \*

Aunque Venus tiene casi el mismo tamaño y la misma masa que la Tierra, varios atributos distinguen nuestro planeta hermano de los demás planetas del sistema solar, entre ellos especialmente su atmósfera reflectante, espesa, densa, de dióxido de carbono, que ejerce en la superficie una presión cien veces superior a la de la Tierra. A excepción de las criaturas que habitan los fondos marinos y que viven bajo presiones parecidas, en Venus todas las formas de vida en la Tierra acabarían aplastadas. Sin embargo, el rasgo más peculiar de Venus reside en los cráteres relativamente jóvenes diseminados por su superficie. Esta descripción aparentemente inocua da a entender que una reciente catástrofe en el conjunto del planeta puso otra vez a cero el reloj de la formación de cráteres —y, por tanto, nuestra capacidad para datar la superficie de un planeta según la creación de cráteres— al eliminar las pruebas de todos los impactos anteriores. Esto también podría deberse a un importante fenómeno meteorológico erosivo, por ejemplo, una inundación global del planeta. O a una determinada actividad geológica (¿deberíamos decir venusológica?); por ejemplo, ríos de lava que hubieran convertido toda la superficie de Venus en el sueño automotor americano: un planeta totalmente pavimentado. Fueran cuales fueran los sucesos que pusieran a cero el reloj de la formación de

cráteres, cesaron bruscamente. Sin embargo, siguen pendientes cuestiones importantes, en concreto sobre el agua de Venus: si en este planeta se produjo efectivamente una inundación general, ¿adónde ha ido toda el agua? ¿Se hundió por debajo de la superficie? ¿Se evaporó en la atmósfera? ¿O es que la inundación consistió en una sustancia común distinta del agua? Aunque no hubiera tenido lugar inundación alguna, es de suponer que Venus adquirió tanta agua como su planeta hermano la Tierra. ¿Qué le pasó?

Al parecer, la respuesta es que Venus perdió su agua al calentarse demasiado, lo cual es atribuible a su atmósfera. Aunque las moléculas de dióxido de carbono dejan pasar la luz visible, atrapan radiación infrarroja con gran eficiencia. Por tanto, la luz del Sol puede penetrar en la atmósfera de Venus, aunque el reflejo atmosférico reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie. Esta luz del Sol calienta la superficie del planeta, que irradia infrarrojos, los cuales no pueden escapar; lo que sí ocurre es que las moléculas de dióxido de carbono lo atrapan, mientras que la radiación infrarroja calienta la atmósfera inferior y la superficie de debajo. A esta captación de radiación infrarroja los científicos la denominan «efecto invernadero», por vaga analogía con las ventanas de cristal, que admiten luz visible, pero bloquean parte de la infrarroja. Como Venus y su atmósfera, la Tierra produce un efecto invernadero, esencial para muchas formas de vida, que eleva la temperatura del planeta en unos 25 grados Fahrenheit por encima de la que habría en ausencia de atmósfera. Casi todo nuestro efecto invernadero se debe a los efectos combinados de las moléculas de agua y dióxido de carbono. Como la



atmósfera de la Tierra tiene sólo una diezmilésima parte del dióxido de carbono de la de Venus, nuestro efecto invernadero es, en comparación, insignificante. No obstante, como vamos añadiendo más dióxido de carbono al quemar combustibles fósiles, incrementamos constantemente el efecto invernadero, con lo que llevamos a cabo un experimento global no deliberado para averiguar qué consecuencias perjudiciales derivan de la captura adicional de calor. En Venus, el efecto invernadero atmosférico, originado exclusivamente por moléculas de dióxido de carbono, eleva la temperatura varios cientos de grados, con lo que la superficie es un horno cercano a los 500 grados Celsius (900 grados Fahrenheit), lo que lo convierte en el planeta más caliente del sistema solar.

¿Cómo llegó Venus a este estado tan lamentable? Los científicos aplican el oportuno término «efecto invernadero desbocado» para describir lo sucedido cuando la radiación infrarroja atrapada por la atmósfera de Venus elevó su temperatura y estimuló la evaporación del agua líquida. El agua adicional en la atmósfera atrapó los rayos infrarrojos aún con más eficacia, lo que acrecentó el efecto invernadero; esto, a su vez, hizo que entrara en la atmósfera más agua, con lo que aumentó más todavía el efecto invernadero. Cerca de la parte superior de la atmósfera de Venus, la radiación solar ultravioleta descompondría las moléculas de agua en átomos de hidrógeno y oxígeno. Debido a las altas temperaturas, los átomos de hidrógeno escaparían mientras que el oxígeno, más pesado, se combinaba con otros átomos, y nunca más volvería a formarse agua. Con el paso del tiempo, toda el agua que Venus había tenido antaño

dentro o cerca de la superficie ha desaparecido básicamente de la atmósfera por calentamiento, y el planeta la ha perdido para siempre. En la Tierra suceden procesos similares, pero a un ritmo mucho más lento porque tenemos temperaturas atmosféricas muy inferiores. En la actualidad, nuestros inmensos mares ocupan casi toda la superficie de la Tierra, si bien su moderada profundidad les concede sólo cinco milésimas aproximadamente de la masa total del planeta. Pese a ello, esta pequeña proporción del total permite a los mares pesar nada menos que 1,5 quintillones de toneladas, el 2% de las cuales están congeladas en un momento dado. Si la Tierra debiera experimentar un efecto invernadero desbocado como el acaecido en Venus, nuestra atmósfera atraparía mayores cantidades de energía solar, lo que elevaría la temperatura del aire y provocaría la rápida evaporación de los mares en la atmósfera al soportar una ebullición vigorosa. Esto no sería una buena noticia. Aparte de las obvias maneras en que morirían la flora y la fauna de la Tierra, una causa de muerte especialmente grave sería que la atmósfera del planeta se volvería trescientas veces más masiva al espesarse con vapor de agua. Acabaríamos aplastados y achicharrados por el aire que respiramos.

\* \* \* \*

Nuestra fascinación (e ignorancia) planetaria no se limita ni mucho menos a Venus. Con sus largamente secos, serpenteantes y aún preservados lechos fluviales, sus planicies aluviales, sus deltas, sus redes de afluentes y sus cañones erosionados por ríos, Marte seguramente fue en otro tiempo el Edén primigenio del agua en movimiento. Si algún lugar del sistema solar aparte de la Tierra pudo

alardear alguna vez de una próspera provisión de agua, es Marte. Por razones desconocidas, sin embargo, hoy Marte tiene una superficie completamente seca. Un examen minucioso de Venus y Marte, nuestros planetas hermanos, nos obliga a observar la Tierra de nuevo y maravillarnos de lo frágil que puede resultar nuestra provisión superficial de agua líquida.

A principios del siglo XX, ciertas observaciones imaginativas de Marte realizadas por el célebre astrónomo norteamericano Percival Lowell le llevaron a suponer que diversas colonias de ingeniosos marcianos habían construido una compleja red de canales para redistribuir agua desde los casquetes polares a las más pobladas latitudes medias. Para explicar lo que creía ver, Lowell imaginó una civilización en vías de extinción que estaba agotando sus recursos hídricos, como Phoenix al descubrir que el río Colorado tenía sus límites. En su meticuloso, aunque curiosamente erróneo, tratado titulado *Mars as the Abode of Life* [Marte como morada de la vida], publicado en 1909, Lowell lamentaba el inminente final de la civilización marciana que creía ver.

En realidad, parece seguro que Marte se ha secado hasta el punto de que su superficie ya no puede sustentar vida alguna. De forma lenta, pero segura, el tiempo acabará con la vida si no lo ha hecho ya. Cuando se extinga el último rescoldo, el planeta rodará por el espacio como un mundo muerto, su carrera evolutiva habrá concluido para siempre.

Pero resulta que Lowell acertó en una cosa. Si Marte tuvo en algún momento una civilización (o cualquier clase de vida) que necesitara

agua en la superficie, debió de hacer frente a una catástrofe, pues en algún período desconocido de la historia marciana, y por alguna razón desconocida, toda el agua superficial se agotó del todo, lo que se tradujo exactamente en el destino de la vida —aunque en el pasado, no el presente— descrito por Lowell. Lo que le pasó al agua que fluía en abundancia por la superficie de Marte hace miles de millones de años sigue siendo un misterio extraordinario entre los geólogos planetarios. Marte sí posee un poco de hielo en los casquetes polares, que constan principalmente de dióxido de carbono congelado («hielo seco») y una minúscula cantidad de vapor de agua en su atmósfera. Aunque los casquetes polares contengan las únicas cantidades significativas de agua que ahora sabemos que existe en Marte, el contenido total de hielo es muy inferior a la cantidad necesaria para explicar los viejos registros de agua en circulación en la superficie del planeta.

Si la mayor parte de la vieja agua de Marte no se evaporó en el espacio, su escondite más probable está bajo tierra, atrapado en el permafrost sub superficial. ¿Pruebas? Los grandes cráteres de la superficie marciana son más susceptibles que los pequeños de exhibir restos de barro en los bordes. Si el permafrost está a mucha profundidad, para llegar a él hará falta una colisión fuerte. El aporte de energía resultante de tal impacto fundiría este hielo sub superficial por contacto, con lo que salpicaría hacia arriba. Los cráteres con esta firma de restos de barro derramado son más habituales en las latitudes polares, frías, justo donde cabe esperar que la capa de permafrost esté más cerca de la superficie marciana. Según

estimaciones optimistas del contenido en hielo del permafrost marciano, la fusión de capas sub superficiales de Marte liberaría agua suficiente para que el planeta tuviera un océano global de decenas de metros de profundidad. Una búsqueda rigurosa de vida contemporánea (o fósil) en Marte ha de incluir el examen de muchos emplazamientos, sobre todo bajo la superficie. En cuanto a las posibilidades de encontrar vida en el planeta, la gran pregunta es la siguiente: ¿existe actualmente agua líquida en algún sitio de Marte? Parte de la respuesta surge de nuestros conocimientos de física. En la superficie marciana no puede existir agua líquida porque la presión atmosférica, inferior al 1% de la que tenemos en la Tierra, no lo permite. Como saben los montañeros entusiastas, el agua se vaporiza a temperaturas cada vez más bajas a medida que disminuye la presión atmosférica. En la cima del monte Whitney, donde la presión del aire desciende a la mitad del valor al nivel del mar, el agua no hierve a 100 grados, sino a 75 grados Celsius. En la cima del monte Everest, con la presión del aire igual a una cuarta parte del valor al nivel del mar, la ebullición se produce a 50 grados; 35 kilómetros más arriba, donde la presión atmosférica equivale sólo al 1% de la que notamos en las aceras de Nueva York, el agua hierve a unos 5 grados Celsius. Y si subimos unos cuantos kilómetros más, el agua líquida «hervirá» a 0 grados; es decir, se vaporizará en cuanto la exponamos al aire. Los científicos usan la palabra *sublimación* para describir el paso de una sustancia de sólido a gas sin fase líquida intermedia. Todos conocemos la sublimación desde que éramos pequeños, cuando el heladero abría su puerta mágica para dejar ver no sólo las

exquisiteces de dentro, sino también los trozos de hielo «seco» que las mantenían frías. El hielo seco supone para el heladero una gran ventaja respecto al conocido hielo de agua: se sublima de sólido a gas y no deja residuos de humedad que haya que limpiar. Un viejo acertijo detectivesco habla del hombre que, para colgarse, se colocó de pie sobre una pastilla de hielo seco hasta que, tras sublimarse esta, quedó suspendido de la soga. Los detectives no tenían ninguna pista (a menos que analizaran detenidamente el ambiente de la habitación) sobre cómo lo había hecho. Lo que le pasa al dióxido de carbono en la superficie de la Tierra es lo que le pasa al agua en la superficie de Marte. Aunque, en un día caluroso, la temperatura del verano marciano supera los 0 grados Celsius, no hay ninguna posibilidad de que allí exista líquido. Esto parece correr un triste velo sobre las perspectivas de vida: hasta que nos damos cuenta de que puede haber agua líquida bajo la superficie. Las futuras misiones a Marte, estrechamente ligadas a la posibilidad de encontrar vida antigua o incluso actual en el planeta rojo, se dirigirán a regiones donde sea posible perforar la superficie en busca del fluido elixir de vida.

Aunque, por mucho elixir que parezca, el agua es una sustancia mortal entre los alfabetos químicos, a quienes debemos evitar con diligencia. En 1997, Nathan Zohner, un estudiante de catorce años del instituto Eagle Rock Junior de Idaho, llevó a cabo un ahora famoso (entre los divulgadores de la ciencia) experimento en un concurso científico para verificar sentimientos anti tecnológicos y fobias químicas asociadas. Zohner invitó a algunas personas a firmar la petición de un control estricto o de una prohibición total del

monóxido de di hidrógeno. Enumeraba algunas de las detestables propiedades de esta sustancia incolora e inodora:

- Es un componente importante de la lluvia ácida.
- A la larga disuelve casi cualquier cosa con la que establezca contacto.
- Si se inhala de manera fortuita, puede matar.
- En estado gaseoso, puede provocar quemaduras graves.
- Se ha observado en tumores de pacientes con cáncer terminal.

De cincuenta personas abordadas por Zohner, cuarenta y tres firmaron la petición, seis se mostraron indecisas y una dijo ser una gran defensora de la molécula y no quiso firmar. Sí, el 86% de los transeúntes votaron prohibir la entrada del monóxido de di hidrógeno ( $H_2O$ ) en el medio ambiente.

Quizá fue esto lo que le pasó al agua en Marte.

\* \* \* \*

Los tres juntos, Venus, la Tierra y Marte, nos cuentan un instructivo cuento sobre los riesgos y los beneficios de centrarnos en el agua (o acaso otros solventes) como elemento clave de la vida. Cuando los astrónomos se plantearon dónde encontrar agua líquida, al principio se concentraron en planetas que describen órbitas a las distancias adecuadas de sus estrellas anfitrionas para mantener el agua en forma líquida —no demasiado cerca ni demasiado lejos—. Así empezamos el cuento de Ricitos de Oro.

Érase una vez —hace algo más de cuatro mil millones de años— la formación del sistema solar casi había concluido. Venus se había

formado lo bastante cerca del Sol para que la intensa energía solar vaporizase lo que habría podido ser su provisión de agua. Marte se formó tan lejos que su provisión de agua quedó congelada para siempre. Sólo un planeta, la Tierra, estaba a una distancia «idónea», en su punto, para que el agua conservara su forma líquida y para que, por tanto, su superficie llegara a ser un santuario para la vida. Esta región periférica del Sol donde el agua puede permanecer líquida llegó a ser conocida como la «zona habitable».

A Ricitos de Oro también le gustaban las cosas «idóneas». Uno de los cuencos de gachas de la casita de los Tres Osos estaba demasiado caliente. Otro, demasiado frío. El tercero estaba en su punto, así que se lo comió. Arriba, una cama era demasiado dura. Otra, demasiado blanda. La tercera era la idónea, así que Ricitos de Oro escogió esta para dormir. Cuando los Tres Osos regresaron a casa descubrieron no sólo el cuenco de gachas que faltaba, sino también a Ricitos de Oro profundamente dormida en la cama. (No recuerdo cómo termina la historia, pero sigue siendo un misterio por qué los Tres Osos — omnívoros y situados en lo más alto de la cadena alimentaria— no se comieron a Ricitos de Oro).

La relativa habitabilidad de Venus, la Tierra y Marte intrigaría a Ricitos de Oro, si bien la verdadera historia de estos planetas es un tanto más complicada que la de los tres cuencos de gachas. Hace cuatro mil millones de años, restos de cometas ricos en agua y asteroides ricos en minerales aún acribillaban las superficies planetarias, si bien a un ritmo muy inferior al de antes. Durante esta partida de billar cósmico, algunos planetas migraron hacia dentro



desde donde se habían formado, mientras que otros fueron lanzados a órbitas más grandes. Y entre los montones de planetas formados, unos se integraron en órbitas inestables y se estrellaron en el Sol o en Júpiter, y otros fueron expulsados del sistema solar. Al final, los pocos planetas que quedaron tenían órbitas «idóneas» para sobrevivir en ellas miles de millones de años.

La Tierra se estableció en una órbita a una distancia media de 150 millones de kilómetros del Sol. A esta distancia, nuestro planeta cruza unas míseras dos mil millonésimas partes de la energía total irradiada por el astro rey. Si presuponemos que la Tierra absorbe toda la energía recibida del Sol, la temperatura promedio del planeta debe ser de unos 280 grados Kelvin (45 grados Fahrenheit), a medio camino entre las temperaturas de verano e invierno. A presiones atmosféricas normales, el agua se congela a 273 grados Kelvin y hierve a 373 grados Kelvin, por lo que estamos bien colocados con respecto al Sol para que casi toda el agua de la Tierra permanezca en estado líquido.

No tan deprisa. En ciencia, a veces tenemos la respuesta correcta por razones equivocadas. En realidad, la Tierra absorbe sólo dos tercios de la energía que le llega desde el Sol. El resto es reflejado por la superficie (sobre todo por los mares) y las nubes, y vuelve al espacio. Si tenemos en cuenta este reflejo en las ecuaciones, la temperatura media de la Tierra desciende a unos 255 grados Kelvin, bastante por debajo del punto de ebullición del agua. Debe de haber en funcionamiento algo que eleve nuestra temperatura promedio hasta un nivel algo más confortable.

Un momento otra vez. Todas las teorías de la evolución estelar revelan que hace cuatro mil millones de años, cuando estaba formándose la vida a partir de la sopa primordial de la Tierra, el Sol era tres veces menos luminoso que en la actualidad, por lo que la temperatura media de la Tierra estaba aún más por debajo del punto de congelación. Quizás en el pasado remoto la Tierra simplemente estaba más cerca del Sol. No obstante, en cuanto hubo terminado el período temprano del bombardeo intenso, ningún mecanismo conocido ha podido mover órbitas estables de un lado a otro del sistema solar. Tal vez el efecto invernadero de la atmósfera terrestre era más fuerte en el pasado. No lo sabemos seguro. Lo que sí sabemos es que las zonas habitables, tal como se concebían al principio, apenas tienen importancia sobre si puede existir vida en un planeta ubicado en las mismas. Esto ha llegado a ser evidente gracias al hecho de que no podemos explicar la historia de la Tierra basándonos en un modelo simple de zona habitable, y más aún de haber comprendido que el agua u otros solventes no tienen por qué depender del calor de una estrella para conservar la forma líquida.

Nuestro sistema solar contiene dos buenos recordatorios de que el «enfoque de zona habitable» para buscar vida tiene limitaciones graves. Uno reside fuera de la zona donde el Sol puede mantener el agua líquida, aunque tiene un océano planetario de agua. El otro, demasiado frío para el agua líquida, ofrece la posibilidad de otro solvente líquido, tóxico para nosotros, pero potencialmente fundamental para otras formas de vida. Muy pronto deberíamos tener la oportunidad de investigar de cerca estos dos objetos con

exploradores robóticos. Veamos lo que sabemos actualmente sobre Europa y Titán.

\* \* \* \*

Europa, la luna de Júpiter, aproximadamente del tamaño de nuestra Luna, presenta en la superficie grietas entrecruzadas que cambian en escalas temporales de semanas o meses. Para los geólogos y científicos planetarios expertos, este comportamiento da a entender que Europa tiene una superficie compuesta casi exclusivamente de hielo de agua, como un manto gigante de hielo antártico rodeando el mundo entero. Y el aspecto cambiante de las fisuras y quebradas de esta superficie helada conduce a una conclusión asombrosa: al parecer, el hielo flota en un mar global. Sólo recurriendo al líquido que hay debajo del hielo pueden los científicos explicar satisfactoriamente lo que han visto, gracias a los sensacionales éxitos de las naves *Voyager* y *Galileo*. Como observamos cambios en toda la superficie que rodea Europa, podemos concluir que el mar global de líquido ha de estar debajo de dicha superficie.

¿Qué líquido podría ser? Y ¿por qué permanece en estado líquido esta sustancia? Los científicos planetarios han llegado de forma admirable a dos conclusiones adicionales bastante sólidas: el líquido es el agua, y permanece en estado líquido debido a los efectos de marea en Europa producidos por el planeta gigante Júpiter. El hecho de que las moléculas de agua sean más abundantes que el amoníaco, el etano o el alcohol metílico hace del agua la sustancia más probable para ser el líquido de debajo del hielo de Europa; la existencia de esta agua congelada da a entender asimismo que existe más agua en las

inmediaciones. Pero ¿cómo puede el agua seguir siendo líquida cuando las temperaturas inducidas por el Sol en las cercanías de Júpiter son sólo de unos 120 grados Kelvin (-150 grados Celsius)? El interior de Europa permanece relativamente caliente porque las fuerzas de marea de Júpiter y las dos grandes lunas cercanas, Ío y Ganímedes, alteran continuamente las rocas de Europa cuando esta luna cambia su posición con respecto a los objetos vecinos. En todo momento, los lados de Ío y Europa más próximos a Júpiter experimentan una fuerza de gravedad —del planeta gigante— más fuerte que los lados más alejados. Estas diferencias de fuerza alargan ligeramente las lunas sólidas en la dirección orientada hacia Júpiter. No obstante, como las distancias de las lunas respecto a Júpiter cambian durante sus órbitas, también cambia el efecto de marea de Júpiter —la diferencia entre la fuerza ejercida en el lado cercano y el lado alejado—, lo que produce pequeños pulsos en sus ya distorsionadas formas. Esta distorsión cambiante calienta el interior de las lunas. Como una bola de squash o de frontenis constantemente golpeada, en todo sistema que experimente una tensión estructural continuada se producirá un aumento de la temperatura interna.

Con una distancia respecto al sol que, por lo demás, garantizaría un mundo eternamente helado, gracias a su nivel de estrés Ío ostenta el título de lugar geológicamente más activo del sistema solar, con volcanes en erupción, fisuras superficiales, tectónica de placas, de todo. Algunos han establecido analogías entre la Ío moderna y la Tierra temprana, cuando nuestro planeta aún estaba muy caliente a raíz de su episodio de formación. Dentro de Ío, la temperatura sube

hasta el punto en que los volcanes expulsan sin parar compuestos malolientes de azufre y sodio a muchos kilómetros por encima de la superficie del satélite. De hecho, Ío tiene una temperatura demasiado elevada para que perdure el agua líquida, pero Europa, que experimenta menos deformación por mareas (gravitatorias) que Ío al estar más lejos de Júpiter, se calienta más moderadamente aunque todavía de forma significativa. Además, el casquete polar global de Europa coloca una tapa de presión en el líquido de abajo, lo cual impide al agua evaporarse permitiéndole existir miles de millones de años sin congelarse. Por lo que sabemos, Europa nació con su mar de agua y el hielo arriba, y ha mantenido este mar, cerca del punto de congelación, pero aún por encima, a lo largo de cuatro mil quinientos millones de años de historia cósmica.

Por tanto, para los astrobiólogos el mar global de Europa es un importantísimo tema de investigación. Nadie conoce el grosor del casquete de hielo, que acaso oscile entre unas docenas de metros y media milla o más. Dada la fecundidad de la vida en los mares de la Tierra, Europa sigue siendo el lugar más seductor del sistema solar en el que buscar vida fuera de nuestro planeta. Imaginémonos allí pescando en el hielo. De hecho, los ingenieros y los científicos del Laboratorio de Propulsión a Chorro de California han comenzado a visualizar una sonda espacial que aterriza, encuentra (o hace) un agujero en el hielo y deja caer una cámara sumergible para echar un vistazo a la vida primitiva que pueda nadar o arrastrarse abajo.

«Primitiva» sintetiza más o menos nuestras expectativas, pues cualquier forma incipiente de vida tendría a su disposición sólo

pequeñas cantidades de energía. No obstante, el descubrimiento de enormes masas de organismos a profundidades de una milla o más bajo los basaltos del estado de Washington, viviendo sobre todo de calor geotérmico, sugiere que quizás algún día encontremos los mares de Europa plagados de organismos diferentes de cualquier otro de la Tierra. Pero sigue habiendo una pregunta apremiante: ¿cómo llamaríamos a estos seres, «europeos» o «europanos»?

\* \* \* \*

Marte y Europa suponen los objetivos uno y dos en la búsqueda de vida extraterrestre dentro del sistema solar. Una tercera señal de «Busca en mí» aparece dos veces más lejos del Sol que Júpiter y sus lunas. Saturno tiene una luna gigante, Titán, que comparte con la campeona de Júpiter, Ganímedes, el título de luna más grande del sistema solar. Con la mitad de tamaño que nuestra Luna, Titán posee una atmósfera espesa, cualidad sin paralelo en ninguna otra luna (ni en el planeta Mercurio, no mucho mayor que Titán, pero mucho más cercano al Sol, cuyo calor evapora cualquier gas mercuriano). A diferencia de las atmósferas de Marte y Venus, la de Titán, muchas veces más espesa que la de Marte, consta ante todo de moléculas de nitrógeno, como pasa en la Tierra. Flotando en este gas nitrógeno transparente hay muchísimas partículas en suspensión, una niebla titaniana permanente, que envuelve eternamente la superficie de la luna y la oculta a nuestra mirada. Como consecuencia de ello, las conjeturas sobre las posibilidades de vida en Titán han hecho su agosto. Hemos medido la temperatura de la luna haciendo rebotar ondas de radio (que traspasan los gases atmosféricos y las partículas

en suspensión) en su superficie. La temperatura de la superficie de Titán, próxima a -179 grados Celsius (94 grados Kelvin), es muy inferior a las que permiten existir al agua líquida, pero procura la temperatura adecuada para el etano líquido, un compuesto de carbono e hidrógeno que resultará familiar a quienes refinan productos del petróleo. Los astrobiólogos han estado décadas imaginando lagos de etano en Titán, a tope de organismos que flotan, comen, se conocen y se reproducen.

Pero en la primera década del siglo XXI, la exploración ha sustituido por fin a la especulación. La misión Cassini-Huygens a Saturno, una colaboración de la NASA con la Agencia Espacial Europea (ESA), salió de la Tierra en octubre de 1997. Casi siete años después, tras recibir ayudas gravitatorias de Venus (dos veces), la Tierra (una vez) y Júpiter (una vez), la nave alcanzó el sistema de Saturno, donde accionó los cohetes para describir una órbita alrededor del planeta del anillo.

Los científicos responsables de la misión dispusieron que la sonda *Huygens* se separara de la nave *Cassini* a finales de 2004 para efectuar el primer descenso a través de las opacas nubes del satélite Titán y alcanzar la superficie, valiéndose de un protector térmico para evitar quemaduras por rozamiento debido al rápido paso por la atmósfera superior, y una serie de paracaídas para aminorar la velocidad de la sonda en la atmósfera inferior. A bordo de la sonda *Huygens* se instalaron seis instrumentos para medir la temperatura, la densidad y la composición química de la atmósfera de Titán, así como para enviar imágenes a la Tierra mediante la nave *Cassini*. En

la actualidad, sólo podemos esperar estos datos e imágenes para ver qué nos dicen sobre el enigma que hay bajo las nubes de Titán. Es improbable que veamos vida —caso de que existiera algo en esta luna remota—, pero quizá sí seamos capaces de determinar si las condiciones favorecen o no la existencia de vida al procurar estanques y charcas líquidas donde podría originarse y prosperar. Como mínimo, cabe esperar que averigüemos la disposición de distintos tipos de moléculas que existen en y cerca de la superficie de Titán, lo que acaso arroje nueva luz sobre el modo en que los precursores de la vida surgieron en la Tierra y en el conjunto del sistema solar.

\* \* \* \*

Si necesitamos agua para vivir, ¿debemos limitarnos a planetas y lunas en cuyas superficies sólidas pueda acumularse agua en cantidad? En absoluto. En nubes frías de gas interestelar aparecen rutinariamente moléculas de agua, junto con otras sustancias químicas domésticas como el amoníaco, el metano y el alcohol etílico. En condiciones especiales de temperatura baja y densidad alta, se puede inducir a un conjunto de moléculas de agua a transformarse y a canalizar energía desde una estrella cercana hasta un rayo amplificado de microondas de alta intensidad. La física atómica de este fenómeno se parece a lo que hace un láser con la luz visible. Pero, en este caso, el acrónimo pertinente es «maser», por *microwave amplification by the stimulated emission of radiation* [amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación]. No es sólo que hay agua prácticamente en todas partes de la galaxia, sino que de vez en cuando también nos irradia. El gran problema que afronta la vida



incipiente en las nubes interestelares surge no de la falta de materia prima, sino de las densidades bajísimas de la materia, lo que reduce enormemente el ritmo al que chocan e interaccionan las partículas. Si la vida tarda millones de años en aparecer en un planeta como la Tierra, podría tardar billones de años en hacer lo propio a densidades mucho menores; un tiempo muy superior al proporcionado hasta ahora por el universo.

\* \* \* \*

Al completar nuestra búsqueda de vida en el sistema solar, quizá parezca que hemos terminado el recorrido por las cuestiones fundamentales de nuestros orígenes cósmicos. Sin embargo, no podemos abandonar este escenario sin echar un vistazo al gran tema del origen que mira al futuro: el inicio de nuestros contactos con otras civilizaciones. Ningún asunto astronómico se apodera de la imaginación pública de manera más vívida, y ninguno ofrece una oportunidad mejor para reunir todo lo aprendido acerca del universo. Ahora que sabemos algo sobre cómo pudo empezar la vida en otros mundos, examinaremos las posibilidades de satisfacer un deseo humano tan profundo como el que más: el de encontrar en el cosmos a otros seres con quienes podamos comentar cosas.

## Capítulo 17

### La búsqueda de vida en la galaxia de la Vía Láctea

Hemos visto que, dentro de nuestro sistema solar, Marte, Europa y Titán brindan las mejores esperanzas para descubrir vida extraterrestre, en forma viva o fósil. Estos tres objetos procuran, de lejos, las mejores posibilidades para encontrar agua o cualquier otra sustancia capaz de proporcionar un líquido solvente en el que las moléculas pueden encontrarse para llevar a cabo la labor de la vida. Como sólo estos tres objetos parecen susceptibles de poseer charcas o estanques, la mayoría de los astrobiólogos limitan sus esperanzas de encontrar vida en el sistema solar al descubrimiento de formas primitivas en uno o más de ellos. Los pesimistas tienen el razonable argumento —que algún día será confirmado o refutado por las exploraciones actuales— de que, aunque encontremos condiciones apropiadas para la vida en este trío de favoritos, la vida propiamente dicha puede estar totalmente ausente. Sea como fuere, los resultados de nuestras investigaciones en Marte, Europa y Titán tendrán especial trascendencia a la hora de evaluar el grado de difusión de la vida en el cosmos. Los optimistas y los pesimistas ya coinciden en una conclusión: si esperamos hallar formas avanzadas de vida —con criaturas más grandes que los organismos simples, unicelulares, que fueron los primeros en aparecer y siguen predominando en la vida de la Tierra—, hemos de mirar más allá del sistema solar, a planetas que dan vueltas a estrellas distintas del Sol.

Érase una vez un tiempo en que sólo podíamos conjeturar la existencia de estos planetas. Ahora que ya hemos descubierto más de cien planetas exosolares, en esencia parecidos a Júpiter y Saturno, quizá podamos predecir con seguridad que sólo el tiempo y observaciones más precisas nos separan del descubrimiento de planetas como la Tierra. Los últimos años del siglo XX seguramente marcarán el momento de la historia en que obtuvimos pruebas reales de la abundancia de mundos habitables en el conjunto del cosmos. Así pues, los dos primeros términos de la ecuación de Drake, que conjuntamente miden el número de planetas que describen órbitas alrededor de estrellas existentes desde hace miles de millones de años, ahora tienen valores más altos que bajos. No obstante, los dos términos siguientes, que definen la probabilidad de descubrir planetas adecuados para la vida, y de vida real en estos planetas, siguen siendo casi tan inciertos como antes del descubrimiento de los planetas exosolares. Con todo, nuestros intentos por estimar estas probabilidades parecen apoyarse en bases más sólidas que las cifras para los dos últimos términos: la probabilidad de que la vida en otro mundo evolucione para producir una civilización inteligente, y la proporción entre la cantidad promedio de tiempo que una civilización así sobrevivirá a la vida de la galaxia de la Vía Láctea.

\* \* \* \*

Para los cinco primeros términos de la ecuación de Drake, nuestro sistema planetario y nosotros mismos podemos ser un ejemplo representativo, si bien siempre hemos de recurrir al principio copernicano para no comparar el cosmos con nosotros. Sin embargo,

cuando llegamos al último término de la ecuación y tratamos de calcular la vida media de una civilización en cuanto ha adquirido la capacidad tecnológica para enviar señales a distancias interestelares, no logramos una respuesta, aunque tomemos la Tierra como guía, pues todavía no hemos determinado cuánto durará nuestra civilización. Llevamos casi un siglo con capacidad de señalización interestelar, desde que potentes transmisores de radio comenzaron a mandar mensajes a través de los mares de la Tierra. El hecho de que como civilización duremos hasta el próximo siglo, hasta el próximo milenio o mil siglos más dependerá de factores que trascienden nuestra capacidad de previsión, bien que muchas señales no parecen propicias para nuestra supervivencia a largo plazo.

Averiguar si nuestro destino concuerda con el promedio de la Vía Láctea nos lleva a otra dimensión de las especulaciones, por lo cual hemos de considerar totalmente desconocido el término final de la ecuación de Drake, que afecta al resultado tan directamente como todos los demás. Si, en una evaluación optimista, la mayoría de los sistemas planetarios contienen al menos un objeto adecuado para la vida, y si la vida se origina en una proporción apreciablemente elevada (pongamos una décima parte) de estos objetos, y si las civilizaciones inteligentes aparecen asimismo en, quizás, una décima parte de los objetos con vida, en algún momento de la historia de los cien mil millones de estrellas de la Vía Láctea, mil millones de ubicaciones podrían generar una civilización inteligente. Esta enorme cifra surge, desde luego, del hecho de que nuestra galaxia contiene muchas estrellas, la mayoría parecidas al Sol. Para una perspectiva

pesimista de la situación, cambiemos simplemente lo de décima parte por diezmilésima. Entonces los mil millones de ubicaciones se convertirían en mil, un millón de veces menos.

Esto supone una diferencia importante. Supongamos que una civilización normal, considerada «civilización» por poseer capacidad para las comunicaciones interestelares, dura diez mil años —aproximadamente una parte por millón de la vida de la Vía Láctea—. Según la idea optimista, mil millones de lugares dan origen a una civilización en algún momento de su historia, de modo que, en cualquier momento representativo, deberían estar prosperando unas mil civilizaciones. En cambio, la opinión pesimista da a entender que en cada era representativa deberían existir 0,001 civilizaciones, con lo cual nosotros somos un accidente solitario y aislado que temporalmente se ha colocado por encima del valor promedio.

¿Qué estimación tiene más probabilidades de acercarse al valor verdadero? En ciencia, nada convence mejor que las pruebas experimentales. Si queremos determinar el número promedio de civilizaciones de la Vía Láctea, el mejor enfoque científico calcularía cuántas civilizaciones existen ahora. La manera más directa de llevar a cabo esta proeza consistiría en inspeccionar la galaxia entera, como les encanta hacer a los protagonistas de *Star Trek*, y anotar número y tipo de cada civilización que nos encontrásemos, caso de haber realmente alguna. (Una galaxia sin extraterrestres es un aburrimiento, casi nunca aparece en la pequeña pantalla). Por desgracia, esta inspección escapa a nuestra capacidad tecnológica actual y a nuestras limitaciones presupuestarias.

Además, para estudiar toda la galaxia harían falta millones de años, si no más. Pensemos en cómo sería un programa de televisión sobre inspecciones del espacio interestelar si estuviera limitado por lo que sabemos de la realidad física. Una hora típica mostraría a los miembros de la tripulación quejándose y discutiendo, conscientes de que han llegado muy lejos, pero que aún les queda mucho. «Ya hemos leído todas las revistas —comentaría uno—. Estamos hartos unos de otros, y usted, capitán, es un pesado de dimensiones cósmicas». Luego, mientras otros tripulantes canturrean para sí y aún otros caen en mundos personales de locura, una larga toma de seguimiento nos recuerda que las distancias respecto a otras estrellas de la Vía Láctea son millones de veces superiores a las que nos separan de otros planetas del sistema solar.

En realidad, esta proporción define sólo las distancias a los vecinos más próximos al Sol, ya tan lejanos que su luz tarda muchos años en alcanzarnos. Un recorrido completo de la Vía Láctea nos llevaría casi diez mil veces más lejos. Las películas de Hollywood en que aparecen vuelos espaciales interestelares se enfrentan a este importante hecho pasándolo por alto (*La invasión de los ladrones de cuerpos*, 1956 y 1978), presuponiendo que bastaría con mejores cohetes o mayores conocimientos de física (*La guerra de las galaxias*, 1977) o presentando ideas intrigantes, como la de los astronautas liofilizados capaces de sobrevivir a viajes inmensamente largos (*El planeta de los simios*, 1968).

Todos estos enfoques tienen cierto atractivo, y algunos ofrecen posibilidades creativas. Quizá podamos mejorar los cohetes, que en

la actualidad alcanzan velocidades de aproximadamente sólo una diez milésima parte de la velocidad de la luz, lo más deprisa que podemos viajar conforme a nuestros actuales conocimientos de física. Incluso a la velocidad de la luz, no obstante, viajar a las estrellas más cercanas supondría muchos años, y atravesar la Vía Láctea cerca de mil siglos. Lo de los astronautas liofilizados suena prometedor, pero para quienes, en la Tierra, deberían pagar por el viaje y permanecer descongelados, el largo tiempo que ha de transcurrir hasta el regreso no facilita la financiación. Dados nuestros breves períodos de atención, el mejor enfoque para establecer contacto con civilizaciones extraterrestres —siempre y cuando existan— lo tenemos aquí en la Tierra. Lo único que hemos de hacer es aguardar a que ellas establezcan contacto con nosotros. Esto cuesta mucho menos y puede ofrecer las recompensas inmediatas que nuestra sociedad tanto anhela.

Sólo hay un problema: ¿por qué iban a hacerlo? ¿Qué tiene nuestro planeta de especial que despierte la atención de sociedades extraterrestres, suponiendo que existan? En este aspecto, más que en ningún otro, los seres humanos han violado sistemáticamente el principio copernicano. Si preguntamos por qué la Tierra merece algún tipo de examen, seguramente recibiremos una mirada airada y severa. Casi todas las ideas sobre visitantes alienígenas de la Tierra, así como una parte considerable del dogma religioso, se basan en la conclusión obvia, tácita, de que nuestro planeta y nuestra especie figuran tan arriba en la lista de maravillas universales que no es necesario ningún razonamiento para respaldar la astronómicamente

extraña opinión de que nuestra mota de polvo, casi perdida en la periferia de la Vía Láctea, destaca de algún modo como un faro galáctico, que exige y también recibe atención a escala cósmica.

Esta conclusión deriva del hecho de que la situación actual aparece invertida cuando contemplamos el cosmos desde la Tierra. Entonces, aunque las estrellas sean minúsculos puntos de luz, las cuestiones planetarias parecen de gran importancia. Desde un punto de vista cotidiano, esto tiene todo el sentido. Nuestro éxito en la supervivencia y la reproducción, como el de prácticamente todos los organismos, tiene poco que ver con el cosmos que nos rodea. Entre todos los objetos astronómicos, sólo afectan a nuestra vida el Sol y en mucha menor medida la Luna, cuyos movimientos se repiten con tanta regularidad que casi forman parte del escenario terráqueo. Nuestra conciencia humana, formada en la Tierra a partir de innumerables encuentros con criaturas y episodios terrestres, comprensiblemente representa el ámbito extraterrestre como un lejano telón de fondo de la importante acción que se desarrolla en el centro del escenario. Nuestro error radica en la presuposición de que el telón de fondo nos considera asimismo el centro de la actividad.

Como todos y cada uno hemos adoptado esta actitud errónea mucho antes de que la mente consciente alcanzara algún dominio o control sobre los patrones de pensamiento, no podemos eliminarla totalmente de nuestro enfoque del cosmos, aunque queramos. Los que imponen el principio copernicano deben permanecer siempre vigilantes ante los murmullos de nuestro cerebro reptiliano, que nos



garantizan la posición central en el universo, el cual dirige su atención hacia nosotros de forma natural.

Cuando leemos informes sobre visitantes extraterrestres en la Tierra, hemos de reconocer otra falacia del pensamiento humano, tan omnipresente y engañosa como nuestros prejuicios anti copernicanos. Los seres humanos confían en sus recuerdos mucho más de lo que la realidad puede justificar. Y lo hacen por las mismas razones de valor para la supervivencia por las que consideramos la Tierra el centro del cosmos. Los recuerdos registran lo que percibimos; y hacemos bien en prestar atención a este registro si queremos sacar conclusiones para el futuro.

No obstante, ahora que contamos con mejores medios para registrar el pasado, sabemos de sobra que no debemos basarnos en los recuerdos individuales para todos los asuntos importantes de la sociedad. Imprimimos los debates parlamentarios y las leyes, grabamos en vídeo escenarios del crimen y efectuamos furtivas grabaciones de audio de actividades criminales porque sabemos que estos medios tienen más capacidad que nuestro cerebro para crear un registro permanente de episodios pasados. Pero sigue habiendo una importante —y aparente— excepción a esta regla. Continuamos aceptando el testimonio del testigo presencial como algo preciso, o al menos de carácter probatorio, en los procesos judiciales. Y lo hacemos aunque en un test tras otro se pone de manifiesto que cada uno de nosotros, pese a nuestras mejores intenciones, no recordamos los hechos con exactitud, sobre todo cuando dichos recuerdos —como suele suceder en casos lo bastante importantes para ir a juicio—

tienen que ver con acontecimientos inusuales y con cierto grado de emoción. Nuestro sistema legal acepta los testigos oculares en virtud de una larga tradición, debido a su resonancia emotiva y ante todo debido a que suele suponer la única prueba directa de episodios pasados. Sin embargo, cada grito del tipo «¡Este es el hombre que sostenía la pistola!» pronunciado en una sala de juicios debe ser contrapuesto a los muchos casos demostrados en que aquel no era el hombre a pesar de la sincera creencia del testigo en sentido contrario. Si tenemos presentes estos hechos al analizar informes sobre objetos voladores no identificados (ovnis), reconocemos al instante grandes posibilidades de error. Por definición, los ovnis son incidentes extravagantes, en los que los observadores distinguen entre objetos conocidos y desconocidos en el telón de fondo celestial rara vez examinado, y por lo general requieren conclusiones rápidas antes de que dichos objetos desaparezcan rápidamente. Si sumamos a esto la carga psíquica ligada al hecho de que el observador cree haber presenciado un suceso de lo más extraño, estamos ante un excelente ejemplo canónico de situación susceptible de generar un recuerdo equivocado.

¿Qué podemos hacer para obtener datos sobre informes de ovnis más fiables que los relatos de testigos presenciales? En la década de 1950, al astrofísico J. Allen Hynek, a la sazón destacado asesor de la Fuerza Aérea sobre ovnis, le gustaba hacer hincapié en esta cuestión sacándose del bolsillo una cámara en miniatura y diciendo que, si alguna vez veía un ovni, la usaría para obtener alguna evidencia científica válida, pues sabía que el testimonio de un testigo ocular no

tendría suficiente crédito. Por desgracia, como las mejoras tecnológicas que se han ido produciendo desde aquella época permiten la creación de imágenes falsas y grabaciones de vídeo apenas distinguibles de las verdaderas, la prueba fotográfica de Hynek ya no basta para confirmar la visión de un ovni. De hecho, si tenemos en cuenta la interacción de la frágil capacidad de la memoria y el ingenio de los estafadores, podemos fácilmente diseñar un test para distinguir entre realidad y fantasía para cada visión individual de un ovni.

Si nos ocupamos del fenómeno más moderno de las abducciones realizadas por ovnis, la capacidad de la psique humana para falsificar la realidad es aún más evidente. Aunque no es fácil obtener cifras precisas y verificables, en los últimos años decenas de miles de personas han llegado a creer, según parece, que se han visto obligadas a subir a bordo de una nave espacial alienígena y han sido sometidas a diversos exámenes, a menudo de lo más humillantes. Vista con calma, la mera afirmación basta para refutar su validez. La aplicación directa del principio de la navaja de Occam, que exige la explicación más simple que encaje con los presuntos hechos, conduce a la conclusión de que estas abducciones han sido imaginadas, no se han producido. Como casi todas las nuevas versiones sitúan estos secuestros en plena noche, y la mayoría en pleno sueño, la explicación más probable habla del estado hipnagógico, la frontera entre el sueño y la vigilia. En muchas personas, este estado provoca alucinaciones visuales y auditivas, y a veces la situación de «soñar despierto», en la que la persona se nota consciente, pero incapaz de

moverse. Estos efectos atraviesan los filtros del cerebro para fabricar recuerdos aparentemente reales, capaces de suscitar una inquebrantable creencia en su certeza.

Comparemos esta explicación de las abducciones de los ovnis con una alternativa: que los visitantes extraterrestres han seleccionado la Tierra y llegado en número suficiente para abducir seres humanos por miles, si bien sólo por poco tiempo y al parecer para examinarlos detenidamente (pero ¿no deberían haber sabido hace tiempo lo que les interesaba?... ¿o es que no habían podido abducir suficientes cuerpos para conocer la anatomía humana en detalle?). Algunos relatos dan a entender que los alienígenas extraen de sus abducidos ciertas sustancias útiles, o plantan sus semillas en víctimas femeninas, o les alteran los patrones mentales para evitar detecciones posteriores (pero, en tal caso, ¿no podían eliminar del todo los recuerdos de la abducción?). No cabe rechazar de manera categórica estas afirmaciones más de lo que cabe descartar la posibilidad de que algunos visitantes extraterrestres escribiesen estas palabras en un intento de hacer notar a los lectores humanos una falsa sensación de seguridad que favorecerá los planes alienígenas de dominio mundial o cósmico. En todo caso, si confiamos en nuestra capacidad para analizar situaciones de manera racional, y distinguimos entre explicaciones más y menos admisibles, podemos conceder una probabilidad sumamente baja a la hipótesis de la abducción.

Hay una conclusión al parecer incuestionable tanto para los escépticos como para los creyentes en los ovnis. Si ciertas sociedades extraterrestres visitan efectivamente la Tierra, sabrán que contamos

con capacidad mundial para divulgar información y entretenimiento, si es que queremos distinguir entre ambos. Decir que estas prestaciones estarán al servicio de cualquier visitante alienígena interesado en utilizarlas es un burdo eufemismo. Recibirían permiso inmediato (si lo pensamos un poco, quizá no lo necesitarían), y podrían hacer notar su presencia en un minuto —si estuvieran interesados—. La ausencia de aparentes extraterrestres en nuestras pantallas de televisión certifica o bien su ausencia de la Tierra, o bien su poca disposición a mostrarse ante nosotros —el problema de la «timidez»—. La segunda explicación plantea un acertijo interesante. Si los visitantes alienígenas de la Tierra deciden no ser detectados, y si cuentan con una tecnología muy superior a la nuestra, como darían a entender sus viajes a distancias interestelares, ¿por qué no les salen bien los planes? ¿Por qué hemos de esperar alguna prueba —imágenes visuales, círculos en campos de cultivo, pirámides construidas por antiguos astronautas, recuerdos de abducciones—, si ellos prefieren que no las tengamos? Seguramente están fastidiándonos la mente, disfrutando del jueguito del gato y el ratón. Es también muy probable que estén manipulando en secreto a nuestros líderes, conclusión que pone en evidencia buena parte de la política y el entretenimiento.

El fenómeno de los ovnis pone de relieve un aspecto importante de nuestra conciencia. Por mucho que creamos que el planeta constituye el centro de la creación, y que nuestros estrellados alrededores son el decorado del mundo, y no al revés, mantenemos igualmente un fuerte deseo de conectarnos con el cosmos, manifestado en actividades

mentales tan distintas como el crédito a los informes sobre visitas de extraterrestres o la creencia en una deidad benevolente que envía a la Tierra rayos, truenos y emisarios. Las raíces de esta actitud están en la época en que había una diferencia evidente entre el cielo de arriba y la Tierra de abajo, entre los objetos que podíamos tocar y arañar, y los que se movían y brillaban, pero permanecían siempre fuera de nuestro alcance. Partiendo de estas diferencias, establecimos distinciones entre el cuerpo terrenal y el alma cósmica, lo rutinario y lo maravilloso, lo natural y lo sobrenatural. La necesidad de un puente mental que conectara estos aspectos aparentes de la realidad ha inspirado muchos de los intentos por crear un cuadro coherente de nuestra existencia. La demostración de la ciencia moderna de que somos polvo de estrellas ha dado a nuestro equipamiento mental una enorme vuelta de tuerca de la que aún estamos intentando recuperarnos. Los ovnis sugieren la presencia de nuevos mensajeros procedentes de otra parte de la existencia, visitantes todopoderosos que saben lo que quieren, mientras que nosotros permanecemos en la ignorancia, apenas conscientes de que la verdad está ahí fuera. Esta postura estuvo bien captada en *Ultimátum a la Tierra* (1951), película clásica en la que un visitante extraterrestre, mucho más sensato que nosotros, llega a la Tierra a advertirnos de que nuestra conducta violenta puede llevarnos a la destrucción.

Nuestra actitud innata sobre el cosmos muestra un lado oscuro que proyecta nuestros sentimientos hacia los extranjeros humanos en los visitantes no humanos. Muchos informes sobre ovnis contienen

frases como «oí algo extraño fuera, así que cogí el rifle y fui a ver». De la misma manera, las películas en las que aparecen alienígenas en la Tierra suelen incluir una modalidad hostil, desde la épica *La Tierra contra los platillos volantes* (1956), historia de la guerra fría en la que los militares acribillan una nave espacial alienígena sin pararse a preguntarles sus intenciones, hasta *Señales* (2002), en la que, a falta de rifle, el héroe pacifista utiliza un bate de béisbol para castigar a los intrusos, un método con pocas probabilidades de éxito contra los actuales extraterrestres, capaces de recorrer distancias interestelares.

Los argumentos más sólidos contra la interpretación de los informes sobre ovnis como pruebas de visitas de extraterrestres se basan en la poca importancia de nuestro planeta y en las enormes distancias entre las estrellas. Ninguno se puede considerar por separado un obstáculo absoluto para esta interpretación, pero conjuntamente constituyen un razonamiento convincente. ¿Significa esto que hemos de llegar a la conclusión de que, como la Tierra carece de gancho popular, nuestras esperanzas de encontrar otras civilizaciones deben esperar al día en que podamos gastar nuestros propios recursos para emprender viajes a otros sistemas planetarios?

De ningún modo. El enfoque científico del establecimiento de contacto con otras civilizaciones de la Vía Láctea y más allá, caso de existir, se ha basado siempre en dejar que la naturaleza opere en nuestro favor. Este principio modifica la pregunta. La cuestión «¿Qué aspecto de las civilizaciones extraterrestres nos parecería más interesante?» (Respuesta: los visitantes en carne y hueso) se convertiría en otra

científicamente más provechosa: «¿Cuál parece ser el medio más adecuado para establecer contacto con otras civilizaciones?». La naturaleza y las inmensas distancias entre las estrellas dan la solución: hay que utilizar el medio de comunicación más barato y rápido, que seguramente ostenta el mismo rango en otros lugares de la galaxia.

La forma más rápida y barata de enviar mensajes entre las estrellas se vale de la radiación electromagnética, el mismo medio que transporta casi todas las comunicaciones de largo alcance en la Tierra. Las ondas de radio han revolucionado la sociedad humana al permitirnos mandar palabras e imágenes por todo el mundo a 300 000 kilómetros por segundo. Estos mensajes viajan tan deprisa que, aunque los teletransportemos a un satélite estacionario en órbita a una altura de 37 000 kilómetros que los transmita a otra parte de la superficie terrestre, experimentan una demora inferior a un segundo en cada etapa del viaje.

A distancias interestelares, el desfase temporal aumenta, si bien sigue siendo el más corto que esperamos alcanzar. Si planeamos enviar un mensaje de radio a Alfa Centauro, el sistema estelar más cercano al Sol, hemos de calcular un período de 4,4 años en cada dirección. Los mensajes que viajan, pongamos, durante veinte años pueden llegar a varios centenares de estrellas y a los planetas que giran a su alrededor. Por tanto, si estamos preparados para un viaje de ida y vuelta de cuarenta años, podemos transmitir un mensaje a cada una de estas estrellas y en última instancia averiguar si recibimos alguna respuesta. Este enfoque presupone, desde luego,



que si cerca de dichas estrellas hay civilizaciones, tendrán un comando de radio e interés en su aplicación, al menos como nosotros. La explicación fundamental de por qué no adoptamos este enfoque en la búsqueda de otras civilizaciones está no en sus supuestos, sino en nuestras actitudes. Cuarenta años es mucho tiempo para esperar algo que quizá no llegue a suceder. (En cualquier caso, si hubiéramos mandado mensajes cuarenta años atrás, ahora tendríamos buena información sobre la abundancia de civilizaciones que utilizan ondas de radio en nuestra región de la Vía Láctea). El único intento serio en esta dirección se produjo en la década de 1970, cuando los astrónomos celebraron la actualización del telescopio de radio cercano a Arecibo, Puerto Rico, usándolo para transmitir un mensaje de algunos minutos en la dirección del cúmulo de estrellas M13. Como este cúmulo se halla a 25 000 años luz, cualquier mensaje de respuesta tardará mucho tiempo, con lo que el ejercicio es más una representación brechtiana que una verdadera selección de actores. Por si pensamos que la discreción ha inhibido nuestra radiodifusión (pues en un país nuevo es bueno ser astuto), recordemos que todas las emisiones de radio y televisión posteriores a la Segunda Guerra Mundial, así como los poderosos rayos del radar, han mandado al espacio cáscaras esféricas de ondas de radio. Difundiéndose a la velocidad de la luz, los «mensajes» de la época de *Honeymooners* y *I Love Lucy* ya han llegado a miles de estrellas, mientras que *Hawai 5.0* y *Los Ángeles de Charlie* habrán alcanzado a centenares. Si otras civilizaciones pudieran realmente entresacar programas individuales de la algarabía de emisiones de radio de la Tierra —ahora cuando

menos comparables a las de cualquier objeto del sistema solar, incluido el Sol—, podría haber algo de cierto en la divertida conjetura de que el contenido de estos programas explica por qué no hemos tenido noticia de nuestros vecinos, pues los habrán considerado tan atroces o (me atrevo a sugerir) tan abrumadoramente impresionantes que han decidido no responder.

\* \* \* \*

Mañana podría llegar un mensaje cargado de información y comentarios interesantes. Aquí está el máximo atractivo de la comunicación mediante radiación electromagnética. No es sólo barata (mandar al espacio cincuenta años de emisiones televisivas ha costado menos que una misión con nave espacial), sino también instantánea (siempre y cuando podamos recibir e interpretar las emisiones de otra civilización). Esto también remite a un aspecto fundamental del entusiasmo por los ovnis, si bien en este caso quizá recibiéramos realmente transmisiones que pudiesen ser registradas, verificadas como auténticas y estudiadas durante el tiempo que tardásemos en comprenderlas.

En la búsqueda de inteligencia extraterrestre, abreviada como SETI por los científicos dedicados a la tarea, el objetivo sigue siendo la localización de señales de radio, aunque no deberíamos rechazar la alternativa de buscar señales con ondas de luz. Pese a que las ondas lumínicas procedentes de otra civilización han de competir con numerosísimas fuentes naturales de luz, los rayos láser brindan la oportunidad de concentrar la luz en un solo color o una sola frecuencia —el mismo enfoque que permite a las ondas de radio

transportar mensajes desde diferentes emisoras de radio o televisión—. Teniendo en cuenta las limitaciones de las ondas de radio, nuestra esperanza de éxito en la SETI se apoya en antenas que inspeccionen el cielo, receptores que registren lo detectado por las antenas y potentes ordenadores que analicen las señales de los receptores en una búsqueda de lo poco natural. Hay dos posibilidades básicas: podríamos descubrir otra civilización escuchando a escondidas sus comunicaciones, parte de las cuales escapan al espacio igual que nuestras emisiones de radio y televisión; o podríamos descubrir señales transmitidas adrede, pensadas para atraer la atención de civilizaciones como la nuestra previamente no catalogadas.

Escuchar a escondidas incluye una tarea más difícil. Como una señal transmitida concentra su potencia en una dirección concreta, detectar esta señal es mucho más fácil si nos la envían directamente, mientras que la que se filtra al espacio se difunde de una manera más o menos uniforme en todas direcciones, por lo que a una distancia determinada de su fuente es mucho más débil que la transmitida. Además, es de suponer que una señal transmitida contendrá algunos ejercicios fáciles de calentamiento para decir a sus destinatarios cómo deben interpretarla, mientras que la radiación escapada al espacio seguramente no lleva un manual de instrucciones. Nuestra civilización lleva décadas filtrando señales, y ha mandado una señal transmitida en una dirección concreta durante unos minutos. Si las civilizaciones son excepcionales, todo intento de encontrarlas debe

concentrarse en la escucha clandestina y en evitar el señuelo de esperar señales transmitidas a propósito.

Con sistemas de antenas y receptores cada vez mejores, los defensores de la SETI han comenzado a escuchar el cosmos en secreto, a la espera de descubrir pruebas de otras civilizaciones. Precisamente porque no tenemos garantía de que así vayamos a escuchar nunca nada, quienes se dedican a estas actividades han tenido dificultades para conseguir financiación. A principios de la década de 1990, el Congreso de los Estados Unidos respaldó un programa de la SETI durante un año, hasta que cabezas más frías cerraron el grifo. En la actualidad, los científicos de la SETI consiguen ayuda, en parte, de millones de personas que, tras descargarse un salvapantallas (de la página web <setiathome.sl.berkeley.edu>) que coopta ordenadores domésticos, analizan datos en su tiempo libre. Han llegado más fondos de ciertas personas acaudaladas, en particular el fallecido Bernard Oliver, destacado ingeniero de Hewlett-Packard con un sempiterno interés en la SETI, y Paul Allen, cofundador de Microsoft. Oliver pasó muchos años pensando en el problema básico de la SETI, la dificultad de buscar a través de miles de millones de posibles frecuencias en las que otras civilizaciones podrían estar transmitiendo. Dividimos el espectro radioeléctrico en bandas relativamente anchas, de modo que para emisiones de radio y televisión existan sólo unas cuantas frecuencias distintas. En principio, sin embargo, las señales alienígenas podrían quedar confinadas a bandas de frecuencia tan estrechas que el dial de la SETI necesitaría miles de millones de entradas. Potentes sistemas

informáticos, clave de los actuales esfuerzos de la SETI, son capaces de afrontar este desafío analizando centenares de millones de frecuencias de forma simultánea. Por otro lado, todavía no han descubierto nada que sugiera la existencia de comunicaciones de radio de otra civilización.

Hace más de cincuenta años, el genio italiano Enrico Fermi, quizás el físico más importante que ha trabajado como teórico y como experimentalista, habló de la vida extraterrestre durante un almuerzo con colegas. Tras coincidir en que nada especial distingue la Tierra como morada para vivir, los científicos llegaron a la conclusión de que en la Vía Láctea la vida debería ser abundante. Entonces Fermi formuló una pregunta que se propaga de una década a otra: «¿Dónde están?».

Fermi quería decir que, si en muchos sitios de nuestra galaxia se ha producido el advenimiento de civilizaciones tecnológicamente avanzadas, sin duda a estas alturas habríamos oído hablar de ellas, mediante mensajes de radio o de láser, si no gracias a visitas reales. Y aunque la mayoría de estas civilizaciones se hubieran extinguido con rapidez, la existencia de un gran número de ellas da a entender que algunas deberían haber durado lo suficiente para organizar búsquedas de otras a largo plazo. Y aunque algunas de estas civilizaciones longevas no hubieran emprendido exploraciones así, otras sí lo habrían hecho. Así pues, el hecho de que no tengamos visitas a la Tierra científicamente verificadas, ni demostraciones fiables de señales producidas por otra civilización, acaso pruebe que

hemos sobreestimado mucho la probabilidad de que aparezcan civilizaciones inteligentes en la Vía Láctea.

Fermi tenía razón. Cada día que pasa tenemos una pequeña prueba más de que quizás estemos solos en nuestra galaxia. No obstante, cuando analizamos las cifras reales, la evidencia se debilita. Si existen varios miles de civilizaciones en la galaxia en cualquier momento representativo, la separación promedio entre civilizaciones vecinas será de unos cuantos miles de años luz, mil veces la distancia a las estrellas más próximas. Si una o varias de estas civilizaciones han durado millones de años, cabría esperar que a estas alturas nos hubieran mandado alguna señal, o se hubieran dejado ver ante nuestros moderados esfuerzos de escucha indiscreta. Sin embargo, si ninguna civilización alcanza una edad así, deberemos esforzarnos más por encontrar a nuestros vecinos, pues quizá ninguno esté realizando un intento galáctico por descubrir a otros, y ninguno esté transmitiendo con la suficiente potencia para que nuestros esfuerzos de escucha clandestina surtan efecto.

Así pues, permanecemos en una condición humana conocida, situados en el umbral de acontecimientos que acaso no se produzcan. La noticia más importante de la historia humana podría llegar mañana o el año que viene, o no llegar nunca. Avancemos hacia un nuevo amanecer, listos para aceptar el cosmos tal como nos rodea, y tal como se revela a sí mismo, resplandeciendo de energía y repleto de misterio.

## CODA

### **La búsqueda de nosotros mismos en el cosmos**

*Equipado con sus cinco sentidos, el hombre explora el universo a su alrededor, y a esta aventura la llama ciencia.*

*EDWIN P. HUBBLE, 1948*

Los sentidos humanos exhiben una agudeza y una variedad de sensibilidades increíbles. Los oídos pueden registrar el atronador lanzamiento de un transbordador espacial y oír asimismo el zumbido de un mosquito macho en el rincón de una habitación. El sentido del tacto nos permite notar el peso de una bola de la bolera en el dedo gordo del pie, o saber si un bicho de un miligramo se arrastra por el brazo. A ciertas personas les gusta masticar pimientos habaneros, mientras que algunas lenguas sensibles son capaces de identificar la presencia de sabores en una proporción de apenas unas partes por millón. Y los ojos alcanzan a captar el brillo de la arena de una playa soleada, y también pueden localizar una cerilla solitaria recién encendida a docenas de metros, al otro lado de un auditorio oscuro. Los ojos nos permiten ver al otro lado de la habitación y al otro lado del universo. Sin la visión, no existiría la ciencia de la astronomía, y la capacidad para calcular nuestro lugar en el universo se habría quedado irremediablemente atrofiada.

Combinados, estos sentidos nos permiten descodificar lo esencial de nuestro entorno inmediato, por ejemplo, si es de día o de noche, o si

alguna criatura tiene intención de darnos un bocado. Sin embargo, hasta los últimos siglos, apenas se sabía que los sentidos sólo abren una estrecha ventana al universo físico.

Algunas personas alardean de un sexto sentido, y aseguran saber o ver cosas vedadas al resto de los mortales. Los adivinos, los nigromantes y los místicos encabezan la lista de quienes reivindican para sí poderes misteriosos. Al hacer esto, infunden una fascinación generalizada en los demás. El discutible campo de la parapsicología se basa en la esperanza de que al menos algunas personas atesoren realmente este talento.

Por su parte, la ciencia moderna maneja montones de sentidos. Sin embargo, los científicos no consideran que dichos sentidos sean la expresión de poderes especiales, sino sólo un tipo de *hardware* que transforma la información recogida por estos sentidos adicionales en simples tablas, gráficos, diagramas o imágenes que los cinco sentidos innatos son capaces de interpretar.

Que Edwin P. Hubble me perdone, pero su comentario del principio, aunque poético y conmovedor, debería haber rezado así:

*Equipado con sus cinco sentidos, además de telescopios y microscopios y espectrómetros de masas y sismógrafos y magnetómetros y detectores y aceleradores de partículas e instrumentos que registran radiación de la totalidad del espectro electromagnético, exploramos el mundo que hay a nuestro alrededor, y a esta aventura la llamamos ciencia.*



Pensemos hasta qué punto el mundo nos parecería más extraordinario, y hasta qué punto habríamos descubierto antes la naturaleza fundamental del universo, si hubiéramos nacido con globos oculares sintonizables de alta precisión. Si movemos el dial a la parte de ondas de radio del espectro, el cielo diurno se vuelve oscuro como la noche, a excepción de algunas direcciones. El centro de la galaxia aparece como uno de los puntos más luminosos del cielo, que brilla intensamente tras algunas de las principales estrellas de la constelación de Sagitario. Si sintonizamos la radiación de microondas, todo el universo resplandece con restos de su etapa más temprana, un muro de luz que inició su viaje hacia nosotros trescientos ochenta mil años después del Big Bang. Pasamos a los rayos X e inmediatamente localizamos agujeros negros con materia que describe espirales en su interior. Y si nos desplazamos a los rayos gamma, observamos explosiones colosales desde direcciones aleatorias, aproximadamente una al día, en el conjunto del universo. Y vemos el efecto de estas explosiones en el material circundante mientras que este se calienta para producir rayos X, infrarrojos y luz visible.

Si hubiéramos nacido con detectores magnéticos, no se habría inventado la brújula porque no la habríamos necesitado. Si sintonizáramos las líneas del campo magnético de la Tierra, la dirección del norte magnético surgiría como la ciudad de Oz más allá del horizonte. Si en la retina tuviéramos analizadores de espectros, no tendríamos que preguntarnos de qué está hecha la atmósfera. Mirándola sin más sabríamos si contiene suficiente oxígeno para

sustentar la vida humana. Y sabríamos desde hace miles de años que las estrellas y las nebulosas de nuestra galaxia contienen los mismos elementos químicos que hay en la Tierra.

Y si hubiéramos nacido con unos ojos grandes y sensibles que llevaran incrustados detectores del movimiento Doppler, habríamos visto enseguida, incluso cuando éramos trogloditas gruñidores, que todo el universo está expandiéndose y que todas las galaxias lejanas se alejan de nosotros.

Si nuestros ojos tuvieran la resolución de un microscopio de buenas prestaciones, nadie habría echado jamás la culpa de la peste y otras enfermedades a la ira divina. Las bacterias y los virus que nos afectan habrían sido perfectamente visibles mientras se arrastraban por la comida o penetraban en heridas abiertas en la piel. Mediante experimentos sencillos, podríamos saber con facilidad qué bichos son malos y cuáles son buenos. Y haría cientos de años que habrían sido identificados los causantes de las infecciones posoperatorias.

Si fuéramos capaces de detectar partículas de alta energía, localizaríamos sustancias radiactivas a gran distancia. No harían falta los contadores Geiger. Veríamos incluso el gas radón filtrarse por el suelo del sótano de nuestra casa y no tendríamos que pagar a nadie para que lo detectara.

La puesta a punto de los cinco sentidos desde el nacimiento y a través de la infancia nos permite, como adultos, evaluar sucesos y fenómenos de nuestra vida, declarar si «tienen sentido» o no. El problema es que casi ningún descubrimiento científico del siglo pasado ha surgido de la aplicación directa de nuestros sentidos, sino

de la aplicación directa de matemáticas y *hardware* que trascienden los sentidos. Este simple hecho explica por qué la relatividad, la física de las partículas y la teoría de cuerdas de las once dimensiones carecen de sentido para las personas corrientes. Podemos añadir a la lista los agujeros negros, los agujeros de gusano o el Big Bang. La verdad es que estos conceptos tampoco tienen mucho sentido para los científicos; no lo tendrán al menos hasta que hayamos explorado el universo durante bastante tiempo con todos los sentidos disponibles desde el punto de vista tecnológico. Lo que surge al final es un nivel superior y más nuevo de «sentido poco común» que permite a los científicos pensar de forma creativa y emitir juicios en el desconocido submundo del átomo o en el alucinante ámbito del espacio multidimensional. El físico alemán del siglo XX Max Planck hizo una observación similar sobre el descubrimiento de la mecánica cuántica:

*La física moderna nos impresiona particularmente con la verdad de la antigua doctrina, que enseña que hay realidades más allá de nuestras percepciones sensoriales, y que hay problemas y conflictos donde estas realidades son más valiosas para nosotros que los más ricos tesoros del mundo de la experiencia.*

Cada nueva forma de saber anuncia una nueva ventana abierta al universo, un nuevo detector que añadimos a la creciente lista de sentidos no biológicos. Cada vez que pasa esto, alcanzamos un nuevo nivel de iluminación cósmica, como si estuviéramos evolucionando y convirtiéndonos en seres supersensibles. ¿Se había imaginado

alguien que nuestro intento de descifrar los misterios del universo, provistos de innumerables sentidos artificiales, nos aportaría percepciones sobre nosotros mismos? No llevamos a cabo esta búsqueda movidos por un simple deseo, sino por un mandato de nuestra especie para que encontremos nuestro lugar en el cosmos. La búsqueda viene de lejos, no es nueva, y ha suscitado la atención de pensadores grandes y pequeños, en todas las épocas y culturas. Los poetas conocían desde el principio lo que hemos descubierto:

*No dejaremos de explorar  
Y el fin de nuestra exploración  
Será encontrar el punto de partida  
Y conocer el lugar por primera vez...*

T. S. ELIOT, 1942

## Glosario de términos seleccionados

*Las palabras en cursiva que aparecen en las definiciones también figuran en el glosario.*

**Aceleración:** cambio en la velocidad o la dirección del movimiento (o ambas) de un objeto.

**Ácido nucleico:** *ADN* o *ARN*.

**Adición:** caída de materia que se añade a la masa de un objeto.

**AGN:** abreviación astronómica para una *galaxia* con un *núcleo* activo, forma modesta de describir galaxias cuyas regiones centrales brillan miles, millones o incluso miles de millones de veces más que las de una galaxia normal. Las AGN presentan una semejanza genérica con los *cuásares*, aunque normalmente se observan a distancias menores, y por tanto en fases de su vida posteriores a las de los propios cuásares.

**Agujero negro:** objeto con una *fuerza gravitatoria* tan enorme que nada, ni siquiera la luz puede escapar del mismo a una distancia específica de su centro, denominada *radio del agujero negro* del objeto.

**Agujero negro supermasivo:** *agujero negro* con una masa varios centenares de veces superior a la del Sol.

**Aminoácido:** clase de *moléculas* relativamente pequeñas, compuestas de *átomos* de *carbono*, *nitrógeno*, *hidrógeno*, *oxígeno* y *azufre*, entre trece y veintisiete, que pueden enlazarse en largas cadenas para formar *moléculas proteínicas*.

**Antimateria:** forma complementaria de la materia, compuesta de *antipartículas* que tienen la misma masa, pero *carga eléctrica* de signo opuesto al de las partículas que complementan.

**Antipartícula:** el complemento *antimateria* de una partícula de materia corriente.

**Año luz:** distancia que la luz u otras formas de *radiación electromagnética* recorren en un año, igual aproximadamente a 10 billones de kilómetros o 6 billones de millas.

**ARN (ácido ribonucleico):** molécula grande, compleja, compuesta de los mismos tipos de moléculas que el *ADN*, que lleva a cabo diversas funciones importantes en las células vivas, entre ellas transportar los mensajes genéticos plasmados en el *ADN* a los lugares donde se ensamblan las *proteínas*.

**Arqueas:** representantes de uno de los tres ámbitos de la vida; al parecer, las formas más antiguas de vida en la Tierra. Todas las arqueas son unicelulares y termofílicas (capaces de prosperar a temperaturas por encima de 50-70 grados Celsius).

**Asteroide:** objeto, compuesto sobre todo de roca o de roca y metal, que gira alrededor del Sol, principalmente entre las órbitas de Marte y Júpiter, y cuyo tamaño oscila entre los 1000 kilómetros y los 100 metros de diámetro. Los objetos parecidos a los asteroides, pero de menor tamaño, reciben el nombre de *meteoroides*.

**Astrofísico:** el que estudia el *universo* con el juego de herramientas completo permitido por las leyes de la física conocidas. Es el término preferido en la época actual.

**Astrónomo:** el que estudia el *universo*. Término más común en el pasado, antes de que se obtuviesen espectros de objetos cósmicos.

**Atmósfera primitiva:** atmósfera original de un planeta.

**Átomo:** la unidad eléctricamente neutra más pequeña de un *elemento*, compuesta de un *núcleo* con uno o más *protones* y algún *neutrón* o ninguno, alrededor del cual gira un número de *electrones* igual al de protones. Este número determina las características químicas del átomo.

**Auto gravitación:** las *fuerzas gravitatorias* que cada parte de un objeto ejerce en todas las demás partes.

**Bacterias:** uno de los tres ámbitos de la vida en la Tierra (antes conocido como el de los procariotas); son organismos unicelulares sin un *núcleo* bien definido que contenga material genético.

**Big Bang:** descripción científica del origen del *universo*, basada en la hipótesis de que el universo comenzó con una explosión que creó espacio y materia hace aproximadamente catorce mil millones de años. En la actualidad, el universo sigue expandiéndose en todas direcciones, en todas partes, como consecuencia de dicha explosión.

**Brazos espirales:** rasgos espirales observados en el disco de una *galaxia espiral*, perfilados por las estrellas más jóvenes, calientes y luminosas y por nubes gigantes de gas y polvo dentro de las cuales se han formado recientemente estas estrellas.

**Cambio a azul:** cambio a *frecuencias* superiores y *longitudes de onda* más cortas, normalmente provocado por el *efecto Doppler*.

**Cambio a rojo:** cambio a *frecuencias* más bajas y *longitudes de onda* más largas en el *espectro* de un objeto, normalmente provocado por el *efecto Doppler*.

**Carbono:** elemento cuyo *átomo* tiene un *núcleo* con seis *protones*, y cuyos diferentes *isótopos* tienen seis, siete u ocho *neutrones*.

**Carga eléctrica:** propiedad intrínseca de las *partículas elementales*, que puede ser positiva, cero o negativa; las *cargas eléctricas* distintas se atraen entre sí, y las iguales se repelen, debido a *fuerzas electromagnéticas*.

**Catalizador:** sustancia que incrementa el ritmo al que se producen reacciones específicas entre *átomos* o *moléculas*, sin intervenir en estas reacciones.

**CBR:** véase *radiación cósmica de fondo*.

**Célula:** unidad estructural y funcional observada en todas las formas de vida en la Tierra.

**Ciclo protón-protón:** cadena de tres reacciones de *fusión nuclear* en virtud de la cual la mayoría de las estrellas fusionan *protones* en núcleos de *helio* y transforman *energía* de masa en *energía cinética*.

**Cinturón de Kuiper:** material en órbita alrededor del Sol a distancias que se extienden desde unas 40 A.U. (unidades astronómicas, la distancia promedio a Plutón) hasta varios centenares de A.U.; casi todo son desechos sobrantes del *disco protoplanetario* del Sol. Plutón es uno de los objetos más grandes del cinturón de Kuiper.

**Civilización:** para las actividades de la SETI, grupo de seres con capacidad para comunicaciones interestelares al menos equivalentes a las nuestras en la Tierra.



**Código genético:** conjunto de «letras» de las moléculas de *ADN* o *ARN*, cada una de las cuales especifican un *aminoácido* concreto y consta de tres moléculas sucesivas como las que constituyen las uniones cruzadas entre las dos espirales gemelas de las moléculas de *ADN*.

**Cometa:** fragmento de material primitivo del sistema solar, normalmente se trata de una «bola de nieve sucia» hecha de hielo, rocas, polvo y *dióxido de carbono* congelado (hielo seco).

**Compuesto:** sinónimo de *molécula*.

**Constante cosmológica:** constante introducida por Albert Einstein en la ecuación acerca del comportamiento global del *universo*, que especifica la cantidad de energía, ahora denominada *energía oscura*, en cada centímetro cúbico de espacio aparentemente vacío.

**Constante de Hubble:** constante que aparece en la *ley de Hubble* y relaciona las distancias de las galaxias con sus velocidades de alejamiento.

**Constelación:** grupo localizado de estrellas, visto desde la Tierra, con nombre de animal, planeta, instrumento científico o personaje mitológico, que pocas veces describe realmente el dibujo; uno de los ochenta y ocho grupos así que hay en el cielo.

**Cosmología:** estudio del *universo* en su conjunto, así como de su estructura y su evolución.

**Cosmólogo:** *astrofísico* especializado en el origen y la estructura del *universo* a gran escala.

**Cosmos:** todo lo que existe; sinónimo de *universo*.

**Cromosoma:** molécula de *ADN*, junto con las *proteínas* asociadas a la misma, que almacena información genética en subunidades llamadas *genes* y transmite esta información cuando se *replica* el *ADN* y se produce la mitosis celular.

**Cuásar (fuente de radio cuasi estelar):** objeto de aspecto casi estelar, pero cuyo *espectro* muestra un gran *cambio a rojo* como consecuencia de la inmensa distancia del objeto respecto de la *Vía Láctea*.

**Cúmulo de estrellas:** grupo de estrellas nacidas al mismo tiempo y en el mismo lugar, capaces de perdurar como grupo durante miles de millones de años gracias a la atracción gravitatoria mutua.

**Cúmulo de galaxias:** grupo grande de *galaxias*, normalmente acompañado de gas y polvo y una cantidad mucho mayor de *materia oscura*, que se mantiene unido gracias a la atracción gravitatoria mutua del material que lo constituye.

**Desacoplamiento:** era de la historia del *universo* en que por primera vez los *fotones* tuvieron demasiado poca fuerza para interaccionar con *átomos*, de modo que, por primera vez, los átomos pudieron formarse y perdurar sin acabar hechos pedazos por los impactos de los fotones.

**Desintegración radiactiva:** proceso en virtud del cual ciertos tipos de *núcleos* atómicos se transforman espontáneamente en otros tipos.

**Desplazamiento Doppler:** cambio fraccional en la *frecuencia*, *longitud de onda* y *energía* producido por el *efecto Doppler*.

**Dinámica:** estudio del movimiento y el efecto de ciertas *fuerzas* en la interacción de los objetos. Si se aplica al movimiento de objetos en el sistema solar y el universo, suele denominarse «mecánica celeste».

**Dinámica newtoniana modificada (MOND):** variante de la teoría de la gravedad, propuesta por el físico israelí Mordehai Milgrom.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** *molécula con un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno.*

**Dióxido de carbono:** moléculas de CO<sub>2</sub>, cada una con un *átomo de carbono* y dos átomos de *oxígeno*.

**Disco de adición:** material que circunda un objeto masivo, por lo general un *agujero negro*, que gira a su alrededor y describe lentas espirales hacia dentro.

**Disco protoplanetario:** disco de gas y polvo que rodea una *estrella* mientras se forma, a partir del cual, y dentro del cual, pueden formarse planetas individuales.

**Doble hélice:** forma estructural básica de las *moléculas de ADN*.

**Eclipse:** oscurecimiento total o parcial de un objeto celeste por otro, tal como lo ve un observador cuando los objetos aparecen casi o exactamente uno detrás de otro.

**Ecuación de Drake:** ecuación, debida al astrónomo estadounidense Frank Drake, que resume nuestra estimación del número de *civilizaciones* con capacidad de comunicación interestelar que existen actualmente en cualquier momento representativo.

**Efecto Doppler:** cambio de *frecuencia, longitud de onda y energía* observado en fotones que llegan de una fuente que tiene una velocidad relativa de acercamiento o alejamiento a lo largo de una línea de visión del observador a la fuente. Estos cambios de frecuencia y longitud de onda son un fenómeno general que se produce con cualquier tipo de movimiento ondulatorio. No dependen

de si está moviéndose la fuente o el observador; lo importante es el movimiento relativo de la fuente con respecto al observador a lo largo de la línea de visión de este último.

**Efecto invernadero:** captura de radiación *infrarroja* por la atmósfera de un planeta, lo que eleva la temperatura en la superficie y justo por encima.

**Efecto invernadero desbocado:** *efecto invernadero* que se intensifica cuando el calentamiento de la superficie del planeta aumenta el ritmo de evaporación líquida, lo que a su vez incrementa el efecto invernadero.

**Electrón:** *partícula elemental* con una unidad de *carga eléctrica* negativa, que en un *átomo* gira alrededor del *núcleo* atómico.

**Elementos:** componentes básicos de la materia, clasificados según el número de *protones* del *núcleo*. Toda la materia corriente del *universo* se compone de noventa y dos elementos que oscilan entre el *átomo* más pequeño, el *hidrógeno* (con un protón en el núcleo), y el más grande presente en la naturaleza, el uranio (con noventa y dos protones en el núcleo). Los elementos más pesados que el uranio se han obtenido en el laboratorio.

**Elipse:** curva cerrada definida por el hecho de que la suma de las distancias desde cualquier punto de la curva a dos puntos interiores fijos, llamados «focos», tiene siempre el mismo valor.

**Enana blanca:** núcleo de una estrella que ha fusionado *helio* en *núcleos de carbono*, por lo que consiste en núcleos de carbono más *electrones*, apretujados en un pequeño diámetro (aproximadamente

el tamaño de la Tierra) y una alta densidad (más o menos un millón de veces superior a la del agua).

**Enana marrón:** objeto con una composición similar a la de una estrella, pero con una masa demasiado pequeña para convertirse en estrella iniciando la *fusión nuclear* en su núcleo.

**Energía:** capacidad para realizar trabajo; en física, el «trabajo» se especifica mediante una cantidad dada de *fuerza* que actúa a lo largo de una distancia específica.

**Energía cinética:** *energía* que posee un objeto en virtud de su movimiento, expresada como la mitad de la masa del objeto por el cuadrado de su velocidad. Por tanto, un objeto más masivo, como un camión, tiene más energía cinética que otro de menos masa, como un triciclo, que se desplace a la misma velocidad.

**Energía de masa:** *energía* equivalente a una cantidad específica de masa, igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado.

**Energía de movimiento:** véase *energía cinética*.

**Energía oscura:** *energía* invisible e indetectable para cualquier medición directa, cuya magnitud depende del valor de la *constante cosmológica*, y que tiende a impulsar la expansión del espacio.

**Energía térmica:** energía contenida en un objeto (sólido, líquido o gaseoso) en virtud de sus vibraciones atómicas o moleculares. La *energía cinética* promedio de estas vibraciones es la definición oficial de «temperatura».

**Enzima:** tipo de *molécula*, *proteínica* o de *ARN*, que es un lugar donde las moléculas pueden interaccionar de ciertas maneras específicas, y

por tanto funciona como *catalizador*, lo que incrementa el ritmo al que se producen reacciones moleculares concretas.

**Escala Celsius o de temperaturas centígradas:** escala de *temperaturas* así llamada por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744), que la introdujo en 1742, según la cual el agua se congela a 0 grados y hierve a 100 grados.

**Escala de temperaturas absolutas (Kelvin):** *temperatura* medida en una escala (expresada mediante K) en la que el agua se congela a 273,16 K y hierve a 373,16 K, siendo 0 K el cero absoluto, la temperatura más fría alcanzable desde el punto de vista teórico.

**Escala de temperaturas Fahrenheit:** escala de *temperaturas* así llamada por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736), que la introdujo en 1724, según la cual el agua se congela a 32 grados y hierve a 212 grados.

**Escala de temperaturas Kelvin (absolutas):** escala de *temperaturas* así llamada por lord Kelvin (William Thomson, 1824-1907), y creada a mediados del siglo XIX, en la que la temperatura más fría posible es, por definición, cero grados. En esta escala (designada como K), los intervalos de temperatura son los mismos que en la *escala de temperaturas Celsius (centígrada)*, por lo que en la escala Kelvin el agua se congela a 273,16 grados y hierve a 373,16 grados.

**Escala logarítmica:** método de representación gráfica de datos gracias al cual caben en el mismo trozo de papel inmensos intervalos de números. En términos oficiales, la escala logarítmica aumenta de manera exponencial (p. ej., 1, 10, 100, 1.000, 10.000), no aritmética (p. ej., 1, 2, 3, 4, 5).

**Escepticismo:** estado mental de cuestionamiento o duda, que está en la raíz de la investigación científica del cosmos.

**Escucha a escondidas, en secreto:** técnica para intentar detectar una *civilización* extraterrestre capturando algunas de las señales de *radio* utilizadas en sus comunicaciones internas.

**Esfera:** única forma sólida en la que cada punto de la superficie se halla a la misma distancia del centro.

**Espacio-tiempo:** combinación matemática de espacio y tiempo que considera el tiempo como una coordenada con todos los derechos y privilegios concedidos al espacio. Gracias a la *teoría de la relatividad especial*, se ha puesto de manifiesto que la manera más precisa de describir la naturaleza es mediante un formalismo espacio-tiempo. Este requiere tan sólo que todos los acontecimientos se especifiquen con coordenadas de tiempo y espacio. Las matemáticas apropiadas no se ocupan de la diferencia.

**Especie:** tipo particular de organismo, cuyos miembros poseen características anatómicas similares y pueden reproducirse entre sí.

**Espectro:** distribución de *fotones* según la *frecuencia* o la *longitud de onda*, a menudo expresada como gráfico que presenta el número de fotones en cada frecuencia o longitud de onda específica.

**Estrella:** masa de gas que se mantiene unida por su *auto gravitación*, en cuyo centro las reacciones de *fusión nuclear* convierten energía de masa en *energía cinética* que calienta toda la estrella, debido a lo cual la superficie resplandece.

**Estrella de neutrones:** restos diminutos (menos de 40 kilómetros de diámetro) del núcleo de una explosión *supernova*; está compuesta

casi exclusivamente de *neutrones* y es tan densa que su materia concentra lo equivalente a dos mil transatlánticos en cada centímetro cúbico de espacio.

**Estrella fugaz:** nombre popular para *meteoro*.

**Estrella gigante roja:** *estrella* que ha evolucionado a través de su fase de secuencia principal y ha empezado a contraer su núcleo y a expandir sus capas exteriores. La contracción provoca un mayor ritmo de *fusión nuclear*, eleva su *luminosidad* y deposita energía en las capas exteriores, lo que obliga a la estrella a aumentar de tamaño.

**Ecariota:** organismo unicelular o multicelular, que mantiene el material genético en cada una de sus células, dentro de un núcleo delimitado por una membrana.

**Eukaria:** totalidad de los organismos clasificados como *eucariotas*.

**Europa:** uno de los cuatro satélites grandes de Júpiter, caracterizado por su superficie helada que acaso cubra un océano global.

**Evolución:** en biología, resultado en curso de la *selección natural*, que bajo determinadas circunstancias hace que grupos de organismos similares, denominados «especies», cambien con el tiempo de tal modo que sus descendientes difieren considerablemente en cuanto a estructura y aspecto; en general, cualquier transformación gradual de un objeto en otra forma u otro estado de desarrollo.

**Exentricidad:** medida de la condición plana de una *elipse*, igual a la proporción de la distancia entre los dos focos de la elipse respecto a su eje largo.



**Exosolar** (también **extrasolar**): perteneciente a objetos situados más allá del *sistema solar*. Preferimos «exo-» por su correspondencia con la exobiología, el estudio de formas de vida con orígenes fuera de la Tierra.

**Extinción masiva**: episodio de la historia de la vida en la Tierra, en algunos casos resultado de un impacto enorme, debido al cual una considerable cantidad de todas las especies de organismos desaparecieron en un breve período de tiempo.

**Extremófilo**: organismo que prospera a altas *temperaturas*, normalmente entre 70 y 100 grados Celsius.

**Fisión**: división de un *núcleo* atómico grande en dos o más núcleos más pequeños. La fisión de núcleos mayores que el hierro libera energía. Esta fisión (llamada también «fisión atómica») es la fuente de energía de todas las centrales nucleares actuales.

**Fósil**: resto o indicio de un organismo antiguo.

**Fotón**: partícula elemental sin masa ni *carga eléctrica*, capaz de transportar *energía*. Flujos de fotones forman la *radiación electromagnética* y se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz, 299 792 kilómetros por segundo. **Fotosíntesis**: uso de *energía* en forma de *luz visible* o *fotones ultravioleta* para producir moléculas de *hidratos de carbono* a partir de *dióxido de carbono* y agua. En algunos organismos, el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) desempeña el mismo papel que el agua (H<sub>2</sub>O) en casi toda la fotosíntesis de la Tierra.

**Frecuencia**: de *fotones*, número de oscilaciones o vibraciones por segundo.

**Fuerza:** capacidad para realizar trabajo o producir un cambio físico; influencia que tiende a *acelerar* un objeto en la dirección en que se aplica la fuerza al objeto.

**Fuerza débil:** uno de los cuatro tipos básicos de *fuerzas*, que actúa sólo entre partículas elementales a distancias de aproximadamente  $10^{-13}$  centímetros o menos, y es la responsable de la descomposición de ciertas partículas elementales en otros tipos. Según algunas investigaciones recientes, las fuerzas débiles y las *fuerzas electromagnéticas* son diferentes aspectos de una única *fuerza electrodébil*.

**Fuerza electromagnética:** uno de los cuatro tipos básicos de *fuerzas*, que actúa entre partículas con *carga eléctrica* y disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia entre las partículas. Según investigaciones recientes, estas fuerzas y las *fuerzas débiles* son aspectos diferentes de una única *fuerza electrodébil*.

**Fuerza fuerte:** uno de los cuatro tipos básicos de *fuerzas*, siempre de atracción, que actúan entre los nucleones (*protones* y *neutrones*) para unirlos en núcleos atómicos, pero sólo si se acercan a distancias comparables a  $10^{-13}$  centímetros.

**Fuerzas electrodébiles:** aspecto unificado de las *fuerzas electromagnéticas* y de las *fuerzas débiles*, cuyos aspectos parecen bastante distintos con energías relativamente bajas, pero que acaban unificados cuando actúan con energías enormes como las típicas de los primeros instantes del *universo*.

**Fuerzas gravitatorias:** uno de los cuatro tipos de *fuerzas*, siempre de atracción, cuya intensidad entre dos objetos varía en proporción

al producto de las masas dividido por el cuadrado de la distancia entre los respectivos centros.

**Fusión:** combinación de *núcleos* pequeños para formar otros mayores. Cuando se fusionan núcleos más pequeños que el hierro, se libera energía. La fusión es la principal fuente de energía de las armas nucleares y de todas las estrellas del universo. Recibe también el nombre de *fusión nuclear* o *fusión termonuclear*.

**Fusión nuclear:** unión de dos *núcleos* bajo la influencia de *fuerzas fuertes*, que se produce sólo si los núcleos se acercan uno a otro a una distancia aproximadamente del tamaño de un protón ( $10^{-13}$  centímetros).

**Fusión termonuclear:** otro nombre para la *fusión nuclear*, a la que a veces denominamos simplemente «fusión».

**Galaxia:** grupo grande de estrellas, cuyo número oscila entre varios millones y muchos cientos de miles de millones, que se mantiene unido gracias a la atracción gravitatoria mutua de las estrellas y, por lo general, también contiene cantidades considerables de gas y polvo.

**Galaxia de Andrómeda:** la *galaxia espiral* grande más cercana a la Vía Láctea, aproximadamente a 2,4 millones de *años luz* de la nuestra.

**Galaxia elíptica:** galaxia con una distribución de estrellas elipsoidal, casi sin gas ni polvo interestelar, cuya forma parece elíptica en una proyección bidimensional.

**Galaxia espiral:** *galaxia* caracterizada por un disco muy aplanado de estrellas, gas y polvo, y *brazos espirales* en su seno.

**Galaxia espiral barrada:** *galaxia espiral* en la que la distribución de las estrellas y el gas en sus regiones centrales tiene una configuración alargada que recuerda a una barra.

**Galaxia irregular:** *galaxia* de forma irregular, es decir, ni *espiral* (discoidal) ni *elíptica*.

**Gas interestelar:** en una *galaxia*, gas que no forma parte de ninguna estrella.

**Gen:** parte de un *cromosoma* que especifica, mediante el código genético, la formación de una cadena específica de *aminoácidos*.

**Genoma:** dotación completa de los *genes* de un organismo.

**Grupo Local:** nombre dado a las aproximadamente dos docenas de *galaxias* existentes en las inmediaciones de la galaxia de la *Vía Láctea*. En el Grupo Local se incluyen las *Nubes Grande y Pequeña de Magallanes* y la *galaxia de Andrómeda*.

**Halo:** regiones más exteriores de una galaxia —que ocupan un volumen muy superior al de la galaxia visible—, en las cuales reside la mayor parte de su *materia oscura*.

**Helio:** el segundo *elemento* más ligero y más abundante, cuyo núcleo contiene dos *protones* y uno o dos *neutrones*. Las estrellas generan energía mediante la *fusión* de núcleos de *hidrógeno* (*protones*) en núcleos de helio.

**Hercio:** unidad de *frecuencia*, correspondiente a una vibración por segundo.

**Hidrato de carbono:** *molécula* compuesta sólo de *átomos* de *carbono*, *hidrógeno* y *oxígeno*, normalmente con el doble de átomos de hidrógeno que de oxígeno.

**Hidrógeno:** *elemento* más ligero y abundante, cuyo *núcleo* tiene un *protón* y un número de *neutrones* igual a uno, dos o ninguno.

**Hielo seco:** *dióxido de carbono* (CO<sub>2</sub>) congelado.

**Horizontes de sucesos:** nombre poético dado al *radio de agujero negro* de un objeto; esto es, distancia al centro del *agujero negro* que señala el punto de no retorno, pues nada puede escapar de la *fuerza gravitatoria* del agujero tras cruzar hacia dentro el horizonte de sucesos. Podemos considerar que el horizonte de sucesos es el «borde» de un agujero negro.

**Infrarrojos:** *radiación electromagnética* consistente en *fotones* cuyas *longitudes de onda* son más largas, y cuyas *frecuencias* son mayores, que las de los fotones que forman la luz visible.

**Ión:** *átomo* que ha perdido uno o más de sus *electrones*.

**Ionización:** proceso de transformación de un *átomo* en un *ion* al perder el primero uno o más *electrones*.

**Isótopo:** *núcleos* de un *elemento* específico, que contienen el mismo número de *protones*, pero distinto número de *neutrones*.

**JWST (Telescopio Espacial James Webb):** telescopio aerotransportado que sustituirá al *Telescopio Espacial Hubble*; llevará un espejo más grande e instrumentos más avanzados.

**Kilogramo:** unidad de masa en el sistema métrico, equivalente a 1000 gramos.

**Kilohercio:** unidad de *frecuencia* equivalente a 1000 vibraciones u oscilaciones por segundo.

**Kilómetro:** unidad de longitud en el sistema métrico, equivalente a 1000 metros y aproximadamente 0,62 millas.

**Latitud:** en la Tierra, coordenada que mide el norte y el sur al especificar el número de grados desde el ecuador (cero grados) hasta el polo norte (90 grados norte) o el polo sur (90 grados sur).

**Lente gravitatoria:** objeto que ejerce, sobre los rayos que pasan, la suficiente *fuerza gravitatoria* para curvarlos, centrándose a menudo en ellos para producir una imagen más brillante que la que vería un observador sin dicha lente.

**Ley de Hubble:** resumen de la expansión del *universo* observada en la actualidad, según el cual la velocidad de retroceso de las galaxias remotas es igual a la distancia respecto de la Vía Láctea multiplicada por una constante.

**Lluvia de meteoros:** gran número de *meteoros* que irradian desde un punto específico del cielo, a causa de que la Tierra cruza las órbitas de un gran número de *meteoroides* en poco tiempo.

**Longitud:** en la Tierra, coordenada que mide el este y el oeste al especificar el número de grados desde el arbitrariamente definido «primer meridiano», la línea norte-sur que pasa por Greenwich, Inglaterra. Las longitudes oscilan entre los 0 grados y los 180 grados este o 180 grados oeste respecto de Greenwich, por lo que abarcan los 360 grados de la superficie terrestre.

**Longitud de onda:** distancia entre sucesivas crestas o depresiones de ondas; para los *fotones*, la distancia recorrida por un fotón mientras oscila una vez.

**Luminosidad:** cantidad total de *energía* emitida cada segundo por un objeto en todos los tipos de *radiación electromagnética*.

**Luminosidad aparente:** brillo que parece tener un objeto cuando lo mide un observador; por tanto, brillo que depende de la *luminosidad* del objeto y su distancia respecto del observador.

**Luz (luz visible):** *radiación electromagnética* compuesta de fotones cuyas *frecuencias* y *longitudes de onda* se sitúan en la banda «de la luz visible», entre la *infrarroja* y la *ultravioleta*.

**Luz visible:** *fotones* cuyas *frecuencias* y *longitudes de onda* corresponden a las detectadas por el ojo humano; entre la *radiación infrarroja* y la *ultravioleta*.

**Mareas:** abombamientos producidos en un objeto deformable por la *fuerza gravitatoria* de un objeto cercano, debido a que este objeto ejerce diferentes cantidades de fuerza en distintas partes del objeto deformable, pues dichas partes están a diferentes distancias.

**Masa:** medida del contenido material de un objeto —no confundir con el peso—, que mide la cantidad de *fuerza gravitatoria* en un objeto. Para objetos situados en la superficie de la Tierra, no obstante, la masa y el peso varían en proporción directa.

**Materia oscura:** materia de forma desconocida que no emite *radiación electromagnética* y de la que se ha deducido, partiendo de las *fuerzas gravitatorias* que ejerce en la materia visible, que comprende el grueso de toda la materia del universo.

**Mecánica cuántica:** descripción del comportamiento de las partículas en las escalas de tamaño más pequeñas, y por tanto de la estructura de los *átomos* y su interacción con otros átomos y *fotones*, así como el comportamiento de los *núcleos* atómicos.

**Megahercio:** unidad de *frecuencia*, igual a un millón de vibraciones u oscilaciones por segundo.

**Metabolismo:** totalidad de procesos químicos de un organismo, medida por el ritmo al que el organismo consume *energía*. Un animal de metabolismo rápido debe consumir energía (comida) mucho más a menudo para sustentarse.

**Meteorito:** *meteoroides* que sobrevive a su paso por la atmósfera de la Tierra.

**Meteoro:** rayo luminoso de luz producido por el calentamiento de un *meteoroides* al cruzar la atmósfera de la Tierra.

**Meteoroides:** objeto de roca o metal, o una mezcla de metal y roca, más pequeño que un *asteroides*, que se mueve en una órbita alrededor del Sol; parte de los desechos resultantes de la formación del sistema solar o de colisiones entre objetos del sistema solar.

**Metro:** unidad fundamental de longitud del sistema métrico.

**Modelo:** constructo mental, a menudo creado con la ayuda de lápiz y papel u ordenadores de alta velocidad, que representa una versión simplificada de la realidad y permite a los científicos intentar aislar y entender los procesos más importantes que se producen en una situación determinada.

**Molécula:** agrupamiento estable de dos o más *átomos*.

**Molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico):** *molécula* larga y compleja consistente en dos hebras espirales entrelazadas, unidas por miles de uniones cruzadas entre pequeñas moléculas. Cuando las moléculas de ADN se dividen y se *replican*, se parten a lo largo, separando cada par de moléculas pequeñas que forman las uniones



cruzadas. A continuación, cada mitad de la molécula forma una réplica nueva de la molécula original a partir de moléculas más pequeñas que existen en el entorno cercano.

**Mutación:** cambio en el *ADN* de un organismo que puede ser heredado por sus descendientes.

**Nave espacial *Cassini-Huygens*:** nave espacial lanzada en 1997 desde la Tierra y que llegó a Saturno en julio de 2004, tras lo cual el módulo orbital *Cassini* inspeccionó el planeta y sus lunas y soltó la sonda *Huygens* para que bajara a la superficie de Titán, el satélite más grande de Saturno.

**Nave espacial *Galileo*:** la nave espacial enviada por la NASA a Júpiter en 1990, que llegó en diciembre de 1995, dejó caer una sonda en la atmósfera de Júpiter y se pasó varios años dando vueltas alrededor del planeta gigante, fotografiándolo junto a sus grandes satélites.

**Nave espacial *Voyager*:** las dos naves espaciales de la NASA, llamadas *Voyager 1* y *Voyager 2*, lanzadas desde la Tierra en 1978, que unos años después pasaron junto a Júpiter y Saturno; la *Voyager* siguió hasta llegar a Urano en 1986 y a Neptuno en 1989.

**Nebulosa:** masa difusa de gas y polvo, normalmente iluminada desde dentro por estrellas jóvenes y muy luminosas que se han formado recientemente a partir de este material.

**Neutrino:** *partícula elemental sin carga eléctrica* y con una masa muy inferior a la de un *electrón*, normalmente producida o absorbida en reacciones entre partículas elementales regidas por *fuerzas débiles*.

**Neutrón:** *partícula elemental sin carga eléctrica*; uno de los dos componentes básicos de un *núcleo* atómico.

**Nitrógeno:** elemento formado por un *átomo* con un *núcleo* de siete *protones*, y cuyos distintos *isótopos* tienen núcleos con seis, siete, ocho, nueve o diez neutrones. La mayoría de los núcleos de nitrógeno tienen siete neutrones.

**Nube de Oort:** los miles de millones o billones de *cometas* que giran alrededor del Sol, que inicialmente se formaron cuando el *protosol* comenzó a contraerse, y que casi en su totalidad se mueven en órbitas miles, o incluso decenas de miles, de veces mayores que la órbita de la Tierra.

**Nube de polvo:** nubes de gas en el espacio interestelar lo bastante frías para que los *átomos* se combinen y formen *moléculas*, muchas de las cuales se mezclan para formar partículas de polvo de millones de átomos cada una.

**Nube Grande de Magallanes:** la mayor de las dos *galaxias* satélite irregulares de la *Vía Láctea*.

**Nube interestelar:** región del espacio interestelar bastante más densa que la media, que abarca normalmente un diámetro de varias docenas de *años luz*, con densidades de materia que oscilan entre diez átomos y millones de moléculas por centímetro cúbico.

**Núcleo:** 1) región central de un *átomo*, compuesta de uno o más *protones* y cero o más *neutrones*; 2) dentro de una célula *eucariota*, región que contiene el material genético de la célula en forma de cromosomas; 3) región central de una *galaxia*.

**Nucleótido:** una de las moléculas de unión cruzada en el *ADN* o el *ARN*. En el *ADN*, los cuatro nucleótidos son la adenina, la citosina, la guanina y la timina; en el *ARN*, el uracilo desempeña el mismo papel que la timina en el *ADN*.

**Orgánico:** referencia a compuestos químicos con *átomos de carbono* como elemento estructural importante; las orgánicas son las moléculas basadas en el carbono, también con propiedades asociadas a la vida.

**Organismo:** objeto dotado de la propiedad de estar vivo.

**Ovnis (objeto volador no identificado):** objetos observados en el cielo de la Tierra para los que no es fácil tener una explicación natural, lo que revela o bien la profunda ignorancia de la comunidad científica, o bien la profunda ignorancia del observador.

**Oxidación:** combinación con *átomos de oxígeno*, ejemplificada en la herrumbre de los metales tras la exposición al oxígeno de la atmósfera terrestre.

**Oxígeno:** elemento cuyo *núcleo* tiene ocho *protones*, y cuyos diferentes *isótopos* tienen siete, ocho, nueve, diez, once o doce neutrones en el núcleo. La mayoría de los núcleos de oxígeno tienen ocho neutrones que acompañan a los ocho protones.

**Ozono (O<sub>3</sub>):** moléculas compuestas de tres *átomos de oxígeno*, que, a grandes alturas de la atmósfera, protegen la superficie de la Tierra contra la radiación *ultravioleta*.

**Panspermia:** hipótesis de que la vida en un escenario se puede transferir a otro; p. ej., de un planeta a otro dentro del sistema solar; también se denomina «siembra cósmica».

**Partícula elemental:** partícula fundamental de la naturaleza, normalmente indivisible en otras partículas. Por lo general, los *protones* y los *neutrones* se designan como partículas elementales, aunque unos y otros constan de tres partículas denominadas *quarks*.

**Pequeña Nube de Magallanes:** la más pequeña de las dos *galaxias irregulares* que son satélites de nuestra *Vía Láctea*.

**Planeta:** objeto en órbita alrededor de una estrella; no es otra estrella y tiene un tamaño al menos tan grande como el de Plutón, que es o bien el planeta más pequeño del Sol, o bien un objeto del *cinturón de Kuiper* demasiado pequeño para ser un planeta.

**Planeta exosolar** (también **planeta extrasolar**): *planeta* que describe órbitas alrededor de una *estrella* distinta del Sol.

**Planeta gigante:** planeta parecido, en cuanto a tamaño y composición, a Júpiter, Saturno, Urano o Neptuno, consistente en un centro sólido de roca y hielo rodeado de gruesas capas de gas, sobre todo *hidrógeno* y *helio*, con una masa que oscila entre aproximadamente una docena y muchos centenares de masas de la Tierra.

**Planetas interiores:** los planetas solares Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, todos ellos pequeños, densos y rocosos en comparación con los *planetas gigantes*.

**Planetesimal:** objeto mucho más pequeño que un planeta, capaz de formar planetas mediante numerosas colisiones mutuas.

**Polvo interestelar:** partículas de polvo, compuesta cada una aproximadamente de un millón de *átomos*, probablemente

expulsadas de la atmósfera de *estrellas gigantes rojas* muy enrarecidas.

**Procariota:** miembro de uno de los tres ámbitos de la vida, compuesto de organismos unicelulares en los que el material genético no reside en el bien definido *núcleo* de la célula.

**Proteína:** *molécula* larga compuesta de una o más cadenas de *aminoácidos*.

**Protoestrella:** *estrella* en formación, que se contrae a partir de una nube de gas y polvo mucho mayor como consecuencia de su auto gravitación.

**Protón:** *partícula elemental* con una unidad de *carga eléctrica* positiva observada en el *núcleo* de cada *átomo*. El número de protones del *núcleo* define la identidad elemental del átomo. Por ejemplo, el *elemento* que tiene un protón es el *hidrógeno*; el que tiene dos, el *helio*; y el que tiene noventa y dos, el uranio.

**Protoplaneta:** planeta en sus fases posteriores de formación.

**Pulsar:** objeto que emite pulsos regularmente espaciados de *fotones* de radio (y a menudo también de fotones de energía superior) como consecuencia de la rápida rotación de una *estrella de neutrones*, lo que produce *radiación* mientras partículas cargadas aceleran en el intenso campo magnético asociado a dicha estrella.

**Radiación:** abreviación de *radiación electromagnética*. En esta era nuclear, el término también ha acabado refiriéndose a cualquier partícula o forma de luz mala para la salud.

**Radiación cósmica de fondo (CBR):** mar de *fotones* producidos en todas partes del *universo* poco después del *Big Bang*, que todavía

llena el universo y actualmente se caracteriza por una *temperatura* de 2,73 grados Kelvin.

**Radiación electromagnética:** flujos de *fotones* que transportan energía desde una fuente de fotones.

**Radiación gravitatoria (ondas de gravedad):** *radiación*, muy distinta de la *radiación electromagnética* salvo por el hecho de que se desplaza a la velocidad de la luz, producida en grandes cantidades cuando objetos masivos se deslizan unos junto a otros a gran velocidad.

**Radiación ultravioleta:** *fotones* con *frecuencias* y *longitudes de onda* entre las de la *luz visible* y los *rayos X*.

**Radio:** *fotones* con la *longitud de onda* más larga y la *frecuencia* más baja.

**Radio del agujero negro:** para cualquier objeto de masa  $M$ , medida en unidades de la masa del Sol, es una distancia igual a  $3M$  kilómetros, también denominada *horizonte de sucesos*.

**Rayos gamma:** tipo de *radiación electromagnética* de la *energía* máxima, de la *frecuencia* máxima y de la *longitud de onda* más corta.

**Rayos X:** *fotones* con *frecuencias* superiores a las de la *radiación ultravioleta*, pero inferiores a las de los *rayos gamma*.

**Relatividad:** término general utilizado para describir la *teoría de la relatividad especial* y la *teoría de la relatividad general* de Einstein.

**Replicación:** proceso en virtud del cual una molécula de *ADN* «padre» se divide en dos hebras individuales, cada una de las cuales forma una molécula «hija» idéntica al padre.

**Resolución:** capacidad de un dispositivo acumulador de luz, como una cámara, un telescopio o un microscopio, para captar detalles. La

resolución mejora siempre con lentes o espejos más grandes, pero esta mejora puede resultar invalidada por el empañamiento atmosférico.

**Revolución:** movimiento alrededor de otro objeto; por ejemplo, la Tierra gira alrededor del Sol. Se confunde a menudo con la *rotación*.

**Rotación:** giro de un objeto alrededor de su propio eje. Por ejemplo, la Tierra da una vuelta sobre sí misma cada 23 horas y 56 minutos.

**Satélite:** objeto relativamente pequeño que describe una órbita mucho mayor; para ser más exactos, ambos objetos dan vueltas alrededor de su centro común de masa, en órbitas cuyas magnitudes son inversamente proporcionales a las masas de los objetos.

**Satélite COBE (COsmic Background Explorer):** satélite lanzado en 1989 que observó la *radiación cósmica de fondo* y realizó la primera detección de pequeñas diferencias en la cantidad de esta radiación procedente de distintas direcciones en el cielo.

**Satélite WMAP (sonda Wilkinson Microwave Anisotropy):** satélite lanzado en 2001 para estudiar la *radiación cósmica de fondo* con mayor detalle que el *satélite COBE*.

**Selección natural:** éxito diferencial en la reproducción entre organismos de la misma especie; fuerza impulsora subyacente a la *evolución* de la vida en la Tierra.

**SETI:** búsqueda de inteligencia extraterrestre.

**Singularidad inicial:** momento en el que comenzó la expansión del *universo*, también llamada *Big Bang*.

**Sistema solar:** el Sol y los objetos que giran a su alrededor, es decir, *planetas*, sus *satélites*, *asteroides*, *meteoroides*, *cometas* y polvo interplanetario.

**Solvente:** líquido capaz de disolver otra sustancia; líquido en el que los *átomos* y las *moléculas* pueden flotar e interactuar.

**Sublimación:** transición desde el estado sólido al gaseoso, o de gas a sólido, sin pasar por el estado líquido.

**Submilímetro:** *radiación electromagnética* con *frecuencias* y *longitudes de onda* comprendidas entre las ondas de *radio* y las *infrarrojas*.

**Supernova:** *estrella* que explota al final de su vida de *fusión nuclear*, alcanzando durante unas semanas una *luminosidad* tan enorme que casi iguala a la producción energética de una *galaxia* entera. Las supernovas producen y distribuyen *elementos* más pesados que el *hidrógeno* y el *helio* en el conjunto del espacio interestelar.

**Tectónica de placas:** movimientos lentos de las placas de la corteza de la Tierra y planetas similares.

**Telescopio (gamma, rayos X, ultravioleta, óptico [visible], infrarrojo, microondas, radio):** los astrónomos han diseñado telescopios y detectores especiales para cada parte del *espectro*. Algunas partes de este espectro no llegan a la superficie de la Tierra. Para ver los *rayos gamma*, *rayos X*, *ultravioleta* e *infrarrojos* emitidos por numerosos objetos cósmicos, estos telescopios deben ser puestos en órbita por encima de las capas absorbentes de la atmósfera de la Tierra. Los telescopios tienen diseños diferentes, pero comparten tres



principios básicos: 1) recogen *fotones*; 2) enfocan fotones; y 3) registran los fotones con algún tipo de detector.

**Telescopio Espacial Hubble:** telescopio aerotransportado, lanzado en 1991, que ha obtenido maravillosas imágenes en *luz visible* de muchísimos objetos astronómicos, debido a que dicho telescopio puede observar el cosmos sin los inevitables efectos distorsionadores o absorbentes de la atmósfera de la Tierra.

**Temperatura:** medida de la *energía cinética* promedio del movimiento aleatorio dentro de un grupo de partículas. En la *escala de temperaturas Kelvin*, o *absolutas*, la temperatura de un gas es directamente proporcional a la energía cinética promedio de las partículas del gas.

**Teoría de la relatividad especial:** propuesta en 1905 por Albert Einstein, procura un conocimiento renovado sobre el espacio, el tiempo y el movimiento. La teoría se basa en dos «Principios de la Relatividad»: 1) la velocidad de la luz es constante para todos con independencia del método que escojamos para calcularla; y 2) las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia que sean estacionarios o se muevan a velocidad constante. Más adelante, la teoría se amplió para incluir marcos de aceleración de referencia en la *teoría de la relatividad general*. Resulta que, como «suponía» Einstein, los dos Principios de la Relatividad han resultado ser válidos en todos los experimentos realizados desde entonces. Einstein extendió los principios de la relatividad a sus conclusiones lógicas y predijo una serie de conceptos inusuales, entre ellos los siguientes:

Los acontecimientos simultáneos absolutos no existen. Lo que es simultáneo para un observador puede estar separado en el tiempo para otro.

Cuanto más deprisa viajamos, más despacio progresa el tiempo con respecto a alguien que esté observándonos.

Cuanto más deprisa viajamos, más masivos nos volvemos, por lo que los motores de nuestra nave espacial aumentan la velocidad cada vez con más dificultad.

Cuanto más deprisa viajamos, más corta se vuelve nuestra nave espacial; todo se vuelve más corto en la dirección del movimiento.

A la velocidad de la luz, el tiempo se para, tenemos longitud cero y masa infinita. Tras comprender lo absurdo de este restrictivo caso, Einstein llegó a la conclusión de que no podemos alcanzar la velocidad de la luz.

Los experimentos inventados para evaluar las teorías de Einstein han verificado todas estas predicciones con precisión. Nos brindan un ejemplo excelente las partículas que tienen «vida media» de desintegración. Tras un período previsible, se espera que la mitad se descomponga en otra partícula. Cuando estas partículas se envían a velocidades cercanas a la de la luz (en aceleradores de partículas), la vida media se incrementa exactamente en la proporción pronosticada por Einstein. También les cuesta más acelerar, lo que implica que ha aumentado su masa efectiva.

**Teoría de la relatividad general:** introducida en 1915 por Albert Einstein, forma la extensión natural de la *teoría de la relatividad especial* al ámbito de los objetos *acelerados*; es una teoría moderna

de la gravedad que explica satisfactoriamente muchos resultados experimentales no explicables, por lo demás, con la teoría de la gravedad de Newton. Su premisa básica es el «principio de equivalencia», según el cual una persona en una nave espacial, por ejemplo, no distingue si la nave está acelerando a través del espacio o si está estacionaria en un campo gravitatorio que produciría la misma aceleración. De este sencillo principio, aunque profundo, surge un conocimiento totalmente revisado de la naturaleza de la gravedad. Según Einstein, la gravedad no es una *fuerza* en el sentido tradicional del término. La gravedad es la curvatura del espacio en las inmediaciones de una masa. El movimiento de un objeto cercano está totalmente determinado por su velocidad y la cantidad de curvatura presente. Por contraintuitivo que parezca, la teoría de la relatividad general explica todo el comportamiento conocido de los sistemas gravitatorios jamás estudiados y predice muchísimos más fenómenos contraintuitivos que son continuamente verificados y controlados de forma experimental. Por ejemplo, Einstein predijo que un campo gravitatorio fuerte debería combar el espacio y doblar la luz en sus cercanías. Más adelante se puso de manifiesto que la luz estelar que pasa cerca del borde del Sol (tal como se ve en un eclipse solar total) está desplazada respecto de su posición supuesta en una magnitud que se corresponde exactamente con las predicciones de Einstein. Quizá la aplicación más importante de la teoría de la relatividad general conlleva la descripción de nuestro universo en expansión, donde todo el espacio está curvado a partir de la gravedad reunida de cientos de miles de millones de galaxias. Una importante

y actualmente no verificada predicción es la existencia de «gravitones», partículas que transportan fuerzas gravitatorias y comunican cambios bruscos en un campo gravitatorio como los que se espera que surjan de una explosión supernova. **Termófilo:** organismo que prospera a temperaturas elevadas, próximas al punto de ebullición del agua.

**Termonuclear:** cualquier proceso perteneciente al comportamiento del *núcleo* atómico en presencia de temperaturas altas.

**Universo:** por lo general, se entiende que abarca todo lo que existe, si bien en las teorías modernas lo que denominamos «universo» quizá sea sólo una parte de un «metaverso» o «multiverso» mucho mayor.

**Velocidad de escape:** para un proyectil o nave espacial, velocidad mínima requerida por un objeto para abandonar su punto de lanzamiento y no regresar nunca pese a la *fuerza gravitatoria*.

**Vía Láctea:** *galaxia* que contiene el Sol y aproximadamente trescientos mil millones de otras estrellas, así como gas y polvo interestelar y una gran cantidad de materia oscura.

**Vida:** propiedad de la materia caracterizada por las capacidades de reproducirse y *evolucionar*.

**Viento solar:** partículas expulsadas del Sol, en su mayor parte *protones* y *electrones*, que surgen continuamente de las capas externas del Sol, si bien lo hacen en cantidades especialmente grandes en el momento de producirse un estallido denominado «erupción solar».

**Virus:** complejo de moléculas *proteínicas* y *ácidos nucleicos* que puede reproducirse a sí mismo sólo dentro de una célula «anfitriona» de otro organismo.

**Zona habitable:** región que rodea una estrella en la que el calor de esta puede mantener uno o más *solventes* en estado líquido; una especie de cáscara esférica en torno a la estrella, con un límite interior y otro exterior.

## Lecturas recomendadas

**Adams, Fred y Greg Laughlin**, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*, Nueva York, Free Press, 1999.

**Barrow, John**, *The Constants of Nature: From Alpha to Omega—The Numbers That Encode the Deepest Secrets of the Universe*, Nueva York, Knopf, 2003 (trad. cast.: *Las constantes de la naturaleza: de alfa a omega*, Barcelona Crítica, 2004).

—, *The Book of Nothing: Vacuums, Voids, and the Latest Ideas About the Origins of the Universe*, Nueva York, Pantheon Books, 2001 (trad. cast.: *El libro de la nada*, Barcelona, Crítica, 2009).

**Barrow, John** y Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford, Oxford University Press, 1986.

**Bryson, Bill**, *A Short History of Nearly Everything*, Nueva York, Broadway Books, 2003 (trad. cast.: *Una breve historia de casi todo*, Barcelona, RBA, 2004).

**Danielson, Dennis Richard**, *The Book of the Cosmos*, Cambridge, MA, Perseus, 2001.

**Goldsmith, Donald**, *Connecting with the Cosmos: Nine Ways to Experience the Majesty and Mystery of the Universe*, Naperville, Il, Sourcebooks, 2002.

—, *The Hunt for Life on Mars*, Nueva York, Dutton, 1997.

—, *Nemesis: The Death-Star and Other Theories of Mass Extinction*, Nueva York, Walker Books, 1985.

—, *Worlds Unnumbered: The Search for Extrasolar Planets*, Sausalito, CA, University Science Books, 1997.

—, *The Runaway Universe: The Race to Find the Future of the Cosmos*, Cambridge, MA., Perseus, 2000.

**Gott, J. Richard**, *Time Travel in Einstein's Universe: The Physical Possibilities of Travel Through Time*, Boston, Houghton Mifflin, 2001 (trad. cast.: *Los viajes en el tiempo y el universo de Einstein*, Barcelona, Círculo de Lectores, 2005).

**Greene, Brian**, *The Elegant Universe*, Nueva York, W.W. Norton & Co., 2000 (trad. cast.: *El universo elegante*, Barcelona, Crítica, 2010).

—, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*, Nueva York, Knopf, 2003 (trad. cast.: *El tejido del cosmos: espacio, tiempo y la textura de la realidad*, Barcelona, Crítica, 2006).

**Grinspoon, David**, *Lonely Planets: The Natural Philosophy of Alien Life*, Nueva York, Harper Collins, 2003.

**Guth, Alan**, *The Inflationary Universe*, Cambridge, MA, Perseus, 1997 (trad. cast.: *El universo inflacionario: la búsqueda de una nueva teoría sobre los orígenes del cosmos*, Madrid, Debate, 1999).

**Haack, Susan**, *Defending Science—Within Reason*, Amherst, NY, Prometheus, 2003.

**Harrison, Edward**, *Cosmology: The Science of the Universe*, 2.<sup>a</sup> ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

**Kirshner, Robert**, *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2002 (trad. cast.: *El universo extravagante: estrellas explosivas, energía oscura y el cosmos acelerado*, Madrid, Siruela, 2006).

**Knoll, Andrew**, *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2003 (trad. cast.: *La vida en un planeta joven: los primeros tres mil millones de años en la Tierra*, Barcelona, Crítica, 2004).

**Lemonick, Michael**, *Echo of the Big Bang*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2003.

**Rees, Martin**, *Before the Beginning: Our Universe and Others*, Cambridge, MA, Perseus, 1997 (trad. cast.: *Antes del principio: el cosmos y otros universos*, Barcelona, Tusquets, 1999).

—, *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe*, Nueva York, Basic Books, 1999 (trad. cast.: *Seis números nada más*, Madrid, Debate, 2001).

—, *Our Cosmic Habitat*, Nueva York, Orion, 2002 (trad. cast.: *Nuestro hábitat cósmico*, Barcelona, Paidós, 2002).

**Seife, Charles**, *Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe*, Nueva York, Viking, 2003.

**Tyson, Neil deGrasse**, *Just Visiting This Planet: Merlin Answers More Questions About Everything Under the Sun, Moon and Stars*, Nueva York, Main Street Books, 1998.

—, *Merlin's Tour of the Universe: A Skywatcher's Guide to Everything from Mars and Quasars to Comets, Planets, Blue Moons and Werewolves*, Nueva York, Main Street Books, 1997.

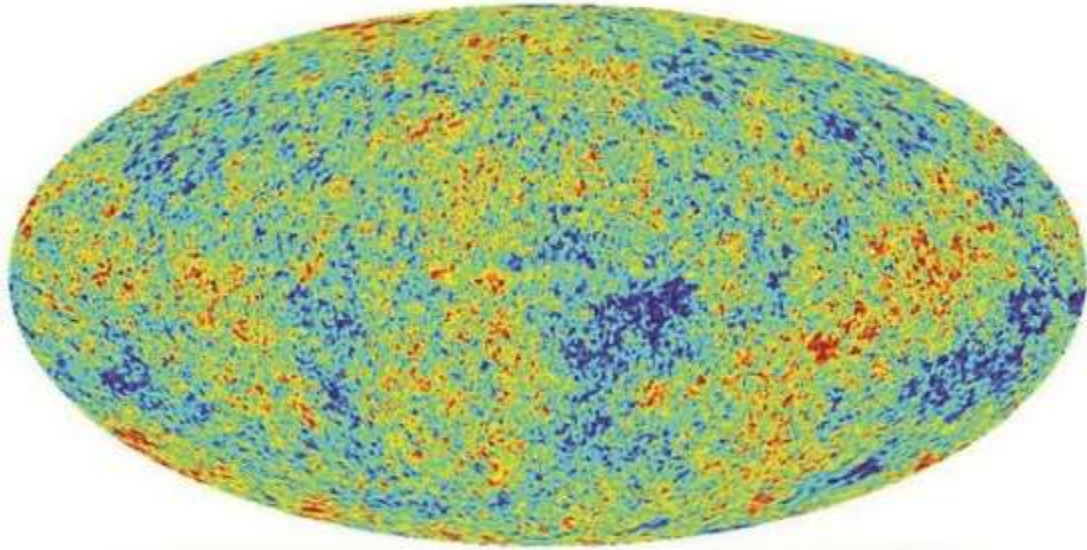
—, *The Sky Is Not the Limit: Adventures of an Urban Astrophysicist*, Nueva York, Doubleday & Co., 2000.

—, *Universe Downn to Earth*, Nueva York, Columbia University Press, 1994.

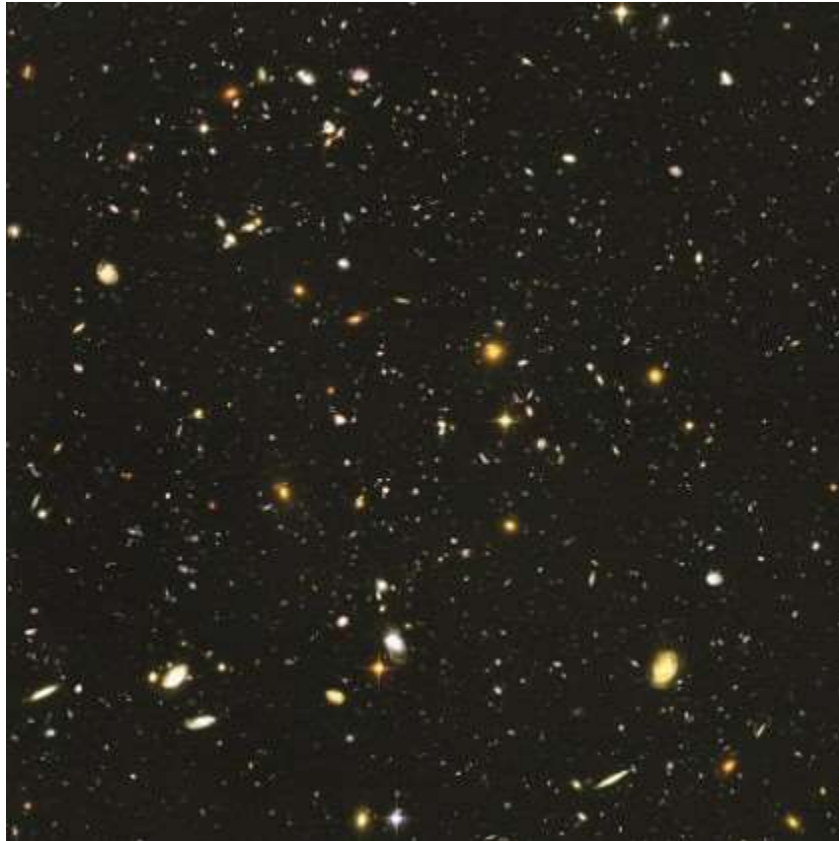


—, Robert Irion y Charles Tsun-Chu Liu, *One Universe: At Home in the Cosmos*, Washington, DC, Joseph Henry Press, 2000.

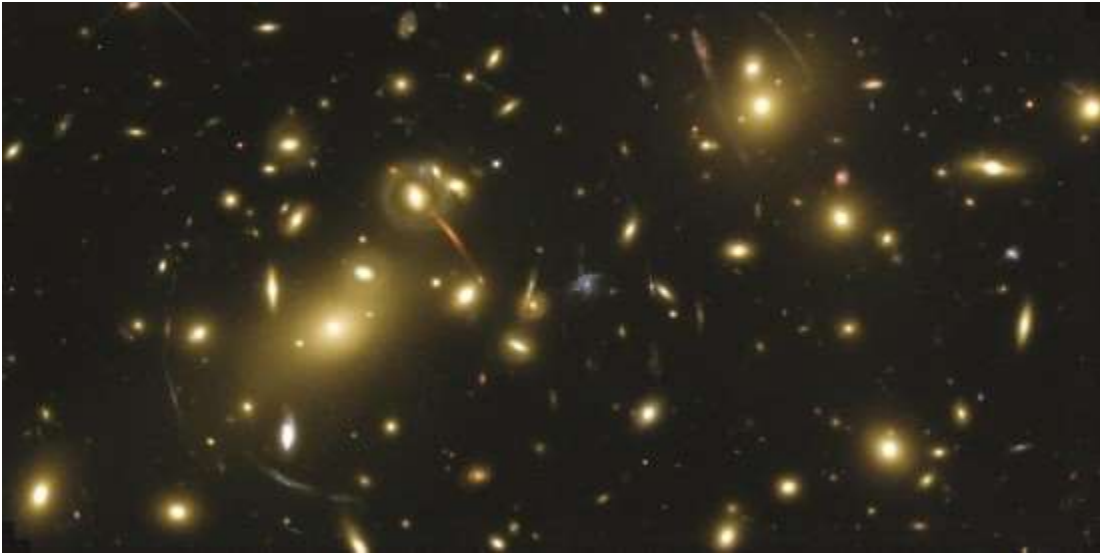
## Imágenes



*Lámina 1. Este mapa de la radiación cósmica de fondo moteada fue elaborado por la sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) de la NASA. En la imagen, las regiones del cielo ligeramente más calientes están codificadas en rojo, y las ligeramente más frías, en azul. Estas desviaciones de una temperatura inalterable delatan en todas partes variaciones en la densidad de la materia durante los primeros años del universo. Los supercúmulos de galaxias deben su origen a las regiones algo más densas de este cuadro cósmico de jardín de infancia. WMAP Science Team, NASA*



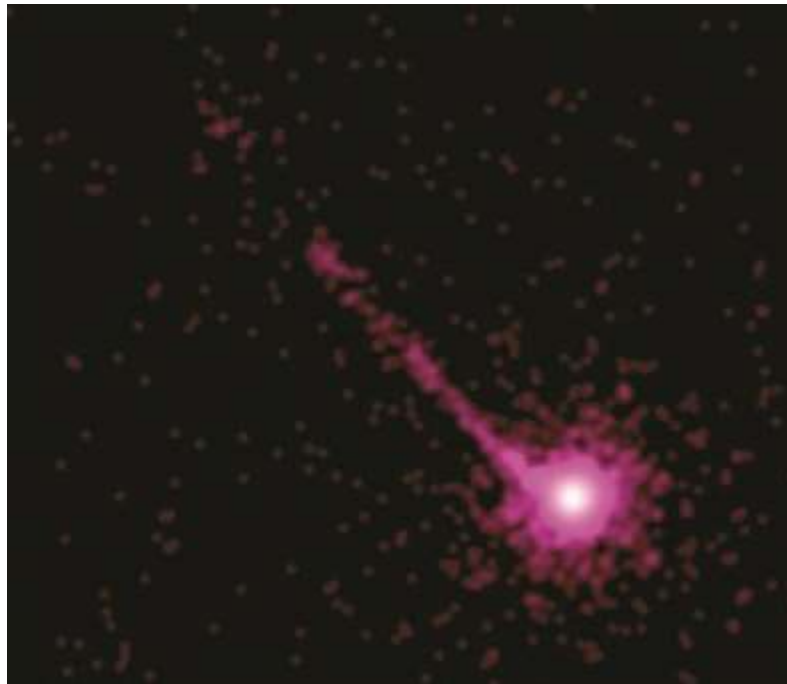
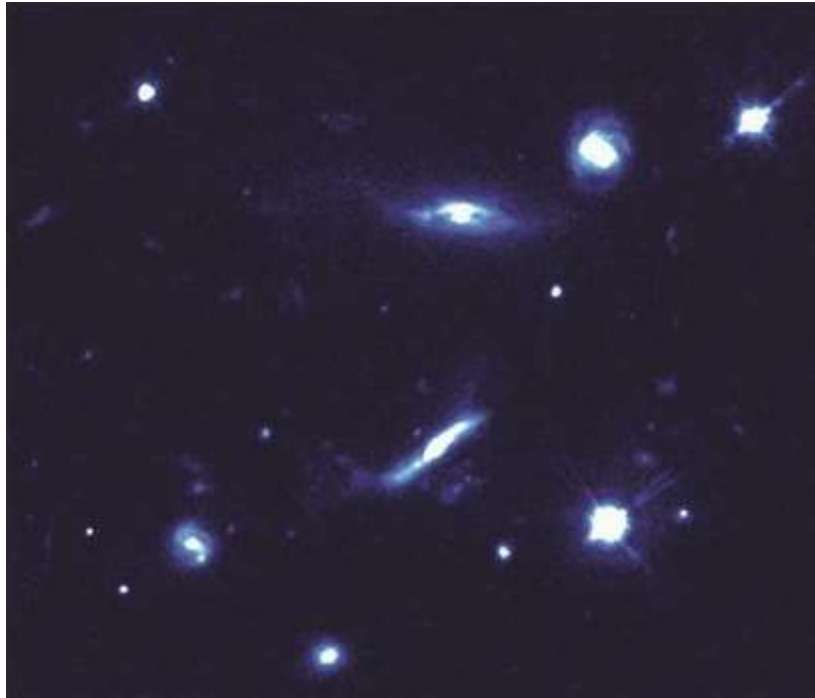
*Lámina 2. El Campo Profundo del Telescopio Espacial Hubble, obtenido en 2004, reveló objetos cósmicos casi imperceptibles que jamás habían sido registrados. Prácticamente cada objeto de la imagen, por pequeño que sea, es una galaxia distante de nosotros entre tres mil y diez mil millones de años luz. Como su luz ha viajado durante miles de millones de años antes de alcanzar el telescopio, las galaxias aparecen no como son hoy, sino como eran en otro tiempo, tras haber recorrido, desde su origen, las etapas subsiguientes de su evolución. S. Beckwith y el Hubble ultra deep field working group, esa, Nasa*



*Lámina 3. Este cúmulo gigante de galaxias, que los astrónomos denominan A2218, se encuentra a unos tres mil millones de años luz de la Vía Láctea. Detrás de las galaxias de este cúmulo hay otras aún más lejanas, cuya luz resulta curvada y distorsionada sobre todo por la gravedad de la materia oscura y las galaxias más masivas que merodean dentro de la A2218. Esta curvatura produce los largos y finos arcos de luz visible de esta imagen obtenida por el Telescopio Espacial Hubble. Andrew Fruchter y otros, NASA*



*Lámina 4. Otro cúmulo gigante de galaxias, A1689, situado a unos dos mil millones de años luz, también curva luz de galaxias aún más lejanas que se hallan detrás del cúmulo, lo que genera arcos de luz cortos y brillantes. Tras medir los detalles de estos arcos, obtenidos por el Telescopio Espacial Hubble, los astrónomos han determinado que la mayor parte de la masa del cúmulo no reside en las galaxias propiamente dichas, sino que se encuentra en forma de materia oscura. N. Benitez, T. Broadhurst, H. Ford, M. Clampin, G. Hartig y G. Illingworth, ESA, NASA*



*Lámina 5 y 6. El cuásar catalogado como PKS 1127-145 está a unos 10 000 millones de años luz de la Vía Láctea. En el panel superior, una imagen del Telescopio Espacial Hubble en luz visible, el cuásar aparece como el objeto brillante de la parte inferior derecha. El cuásar real, que ocupa sólo la porción más interna de este objeto,*

*debe su enorme producción de energía a materia super calentada que cae en un enorme agujero negro. En el panel inferior se aprecia la misma región del cielo en una imagen de rayos X obtenida por el Observatorio Chandra. Del cuásar, a más de un millón de años luz, surge un chorro de material emisor de rayos X. A. Siemiginowska, J. Bechtold, y otros, NASA*



*Lámina 7. En esta imagen del cúmulo de galaxias Coma, casi cada objeto apenas perceptible es, de hecho, una galaxia compuesta de más de cien mil millones de estrellas. Situado a unos 325 millones de años luz de la Vía Láctea, este cúmulo abarca un diámetro de varios millones de años y contiene muchos miles de galaxias individuales*

*que giran unas alrededor de otras en una especie de ballet coreografiado por las fuerzas de la gravedad.*

*O. López-Cruz y otros, AURA, NOAO, NSF*



*Lámina 8. La región central del cúmulo galáctico de Virgo, apenas a 60 millones de años luz de la Vía Láctea, muestra montones de galaxias de diferentes tipos, incluyendo galaxias elípticas gigantes en la parte superior izquierda y la parte superior derecha. Aparecen galaxias elípticas en toda la imagen, tomada con el Telescopio Canadá-Francia-Hawái del Observatorio Mauna Kea. La inmensa fuerza gravitatoria del cúmulo de Virgo y su proximidad a la Vía Láctea afectan considerablemente al movimiento de esta por el espacio. De hecho, la Vía Láctea y el cúmulo de Virgo forman parte de un sistema de*



*galaxias aún mayor denominado «supercúmulo» de Virgo. Jean-Charles  
Cuillandre, CFHT*



*Lámina 9. De este par de galaxias interactuantes, denominado Arp 295 desde su incorporación al Atlas of Peculiar Galaxies, de Halton Arp, han surgido largos filamentos de sus propias estrellas y gas, que se extienden a través de un cuarto de millón de años luz. Las dos galaxias se hallan a unos 270 millones de años luz de la Vía Láctea. Arne Henden, USNO*



*Lámina 10. Una galaxia espiral gigante similar a la nuestra domina esta fotografía tomada por el Very Large Telescope de Chile. La visión frontal de esta galaxia —a unos cien millones de años luz de la Vía Láctea y denominada NGC 1232— nos permite observar la luz amarillenta de estrellas relativamente viejas cercanas al centro, así como las enormes estrellas azuladas, jóvenes y calientes que dominan la girándula circundante de brazos espirales. Los astrofísicos detectan en estos brazos también un gran número de granos de polvo interestelar. A la izquierda de la espiral gigante aparece una compañera más pequeña de NGC 1232, conocida como «galaxia espiral barrada» porque la forma de sus regiones centrales*

*se parece a una barra.* European Southern Observatory



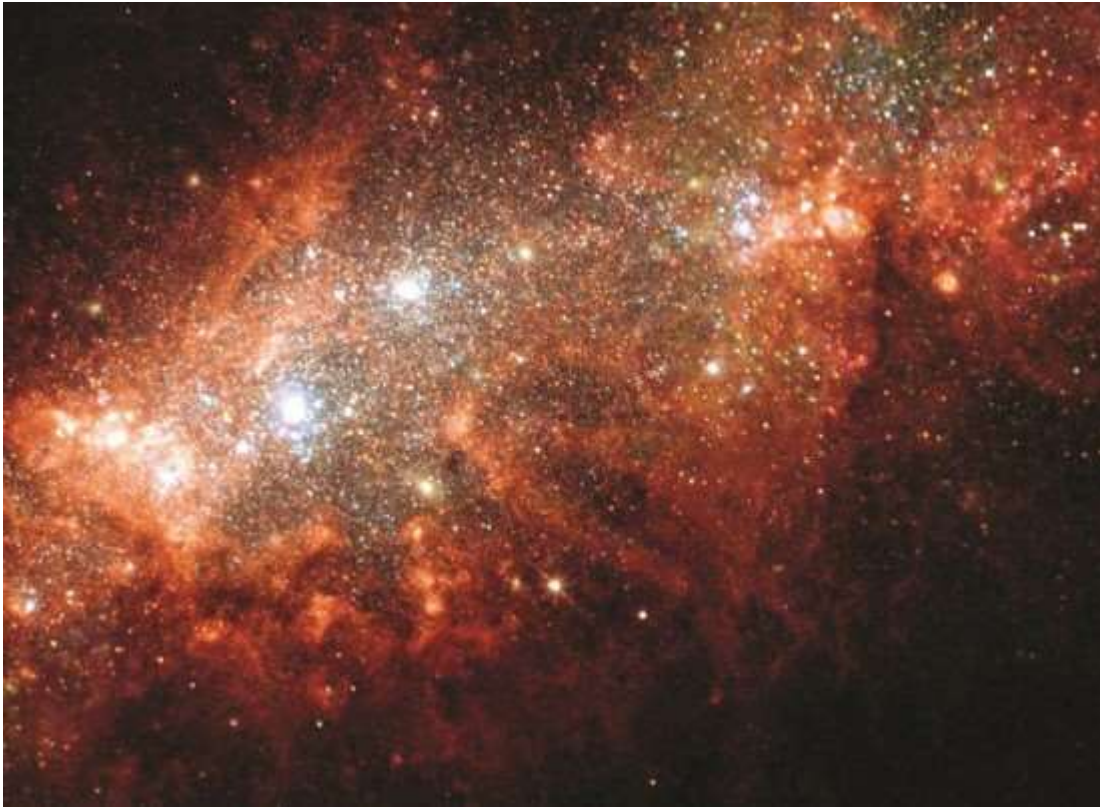
*Lámina 11. Esta galaxia espiral, denominada NGC 3370 y situada a unos 100 millones de años luz, es muy parecida a nuestra Vía Láctea en tamaño, forma y masa. Esta imagen del Telescopio Espacial Hubble deja ver la compleja espiral trazada por las jóvenes, calientes y muy luminosas estrellas que perfilan los brazos espirales. De un borde a otro, la galaxia abarca unos cien mil años luz. Hubble Heritage Team, A. Riess, NASA*



*Lámina 12. En marzo de 1994, los astrónomos descubrieron la Supernova 1994D en la galaxia espiral NGC 4526, una de las numerosísimas galaxias del cúmulo de Virgo, a unos sesenta millones de años luz de la Vía Láctea. En esta imagen obtenida por el Telescopio Espacial Hubble, la supernova es el objeto brillante de la parte inferior izquierda, bajo el cinturón de polvo absorbente de luz en el plano central de la galaxia. Aparte de enriquecer su entorno con los ingredientes químicos de la vida, la Supernova 1994D es un ejemplo de las supernovas Tipo Ia utilizadas para descubrir la aceleración de la expansión cósmica. High-Z Supernova Search Team, NASA*



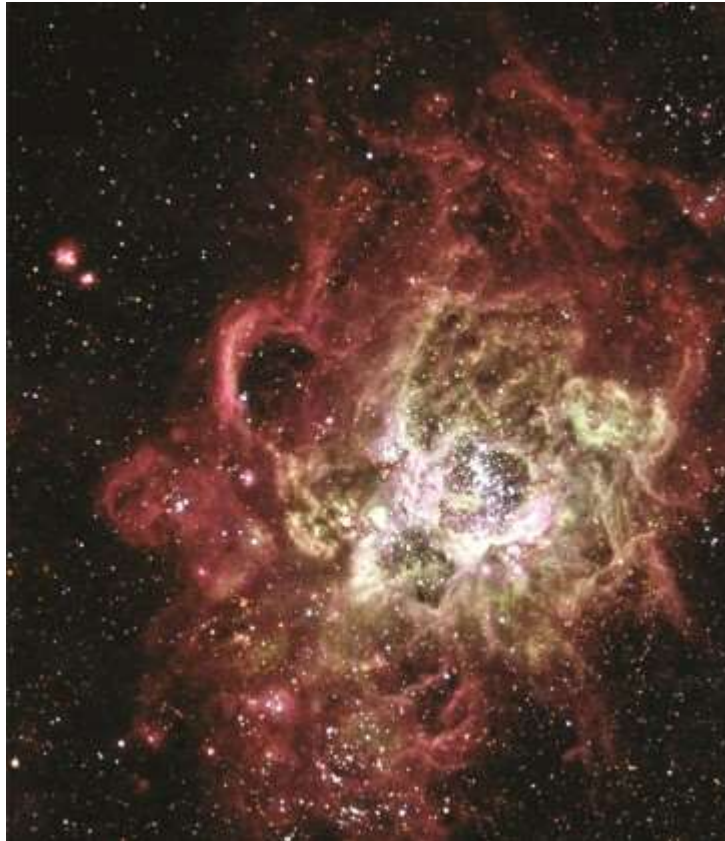
*Lámina 13. Cuando miramos esta galaxia espiral, la NGC 4631, a unos veinticinco millones de años luz, nuestra línea de visión es lateral con respecto al disco de la galaxia, por lo que no alcanzamos a ver la estructura de brazos espirales. El polvo que hay dentro del disco oscurece buena parte de la luz procedente de las estrellas galácticas. La zona roja hacia la izquierda del centro señala un semillero estelar. Encima de la NGC 4631 hay una galaxia elíptica más pequeña, una compañera que gira alrededor de la espiral gigante. Diane Zeiders y Adam Block, NOAO, AURA, NSF*



*Lámina 14. En esta pequeña galaxia irregular, denominada NGC 1569 y situada sólo a siete millones de años luz, hace unos veinticinco millones de años se produjo un estallido de formación de estrellas que aún puede verse, lo que explica la mayor parte de la luz de la galaxia. A la izquierda del centro de esta imagen del Telescopio Espacial Hubble son visibles dos grandes cúmulos estelares. P. Anders y otros, ESA, NASA*



*Lámina 15. La galaxia de Andrómeda, la galaxia grande más cercana a la Vía Láctea, se halla a unos 2,4 millones de años luz de nosotros y abarca una región celeste varias veces mayor que la Luna llena. En esta imagen, tomada por el astrónomo aficionado Robert Gendler, uno de los dos satélites elípticos de la galaxia aparece debajo y a la izquierda de su centro, mientras que otro apenas visible aparece encima y a la derecha de dicho centro. Los demás objetos pequeños brillantes de la imagen son estrellas individuales del interior de la Vía Láctea, ubicados prácticamente delante de nuestras narices, a menos de 1/100 de la distancia con respecto a la galaxia de Andrómeda. Robert Gendler; ([www.robertgendlerastropics.com](http://www.robertgendlerastropics.com))*



*Lámina 16. Relativamente cerca de la Vía Láctea, más o menos a la misma distancia que la galaxia de Andrómeda (2,4 millones de años luz), está la galaxia espiral más pequeña M33, cuya mayor región de formación de estrellas aparece en esta imagen del Telescopio Espacial Hubble. Las estrellas más grandes de esta región ya han explotado como supernovas, enriqueciendo su entorno con elementos pesados, mientras que otras estrellas grandes están produciendo radiación ultravioleta intensa que hace saltar electrones de los átomos circundantes. Hubble Heritage Team, NASA*



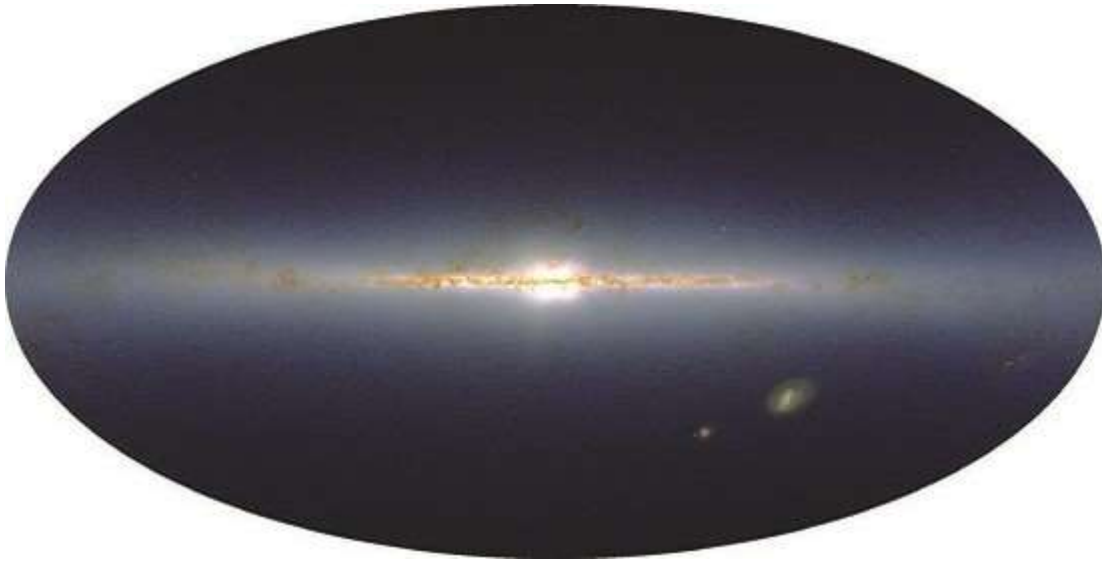


*Lámina 17. La Vía Láctea tiene dos grandes galaxias satélite irregulares, llamadas Nubes Grande y Pequeña de Magallanes. En esta imagen de la Nube Grande de Magallanes se aprecia una gran barra de estrellas en la izquierda, y muchas estrellas adicionales y regiones de formación estelar a la derecha. La brillante nebulosa de la Tarántula, llamada así por su forma y situada en la parte central superior de la fotografía, es la mayor región de formación de estrellas de esta galaxia.*

*AURA/NOAO/NSF*



*Lámina 18. Esta región de formación de estrellas, llamada nebulosa de Papillon por su parecido con una mariposa, pertenece a la Nube Grande de Magallanes, la mayor galaxia satélite de la Vía Láctea. Estrellas jóvenes iluminan la nebulosa desde dentro y actúan sobre átomos de hidrógeno para que emitan una característica tonalidad de rojo, captada en esta imagen por el Telescopio Espacial Hubble. M.Heydari-Malayeri (Paris Observatory) y otros, ESA, NASA*



*Lámina 19. Una visión general del cielo entero en radiación infrarroja revela que vivimos dentro del disco aplanado de una galaxia espiral, que en esta imagen se extiende a la derecha y la izquierda de la región central de la Vía Láctea. Partículas de polvo absorben parte de la luz de esta región, lo mismo que en las galaxias espirales lejanas. Debajo del plano de nuestra galaxia vemos las dos galaxias satélite irregulares de la Vía Láctea, las Nubes Grande y Pequeña de Magallanes. Atlas Image obtained as part of the Two Micron All Sky Survey, a joint project of the UMass y the IPAC/Caltech, funded by the NASA y the NSF.*



*Lámina 20. Cuando miramos hacia el centro de nuestra galaxia de la Vía Láctea, a unos 30.000 años luz del sistema solar, enormes nubes llenas de polvo bloquean nuestra visión en la luz visible. La luz infrarroja consigue atravesar el polvo, por lo que esta imagen infrarroja obtenida del proyecto Two Micron All Sky Survey [Reconocimiento en dos micrómetros de todo el cielo] revela radiación que surge cerca del centro galáctico, la región particularmente brillante de esta imagen, donde un agujero negro supermasivo quizás esté tragando materia sin cesar. Atlas Image obtained as part of the Two Micron All Sky Survey, a joint project of the UMass y the IPAC/Caltech, funded by the NASA y the NSF.*



*Lámina 21. La nebulosa del Cangrejo, que se halla a unos 7000 años luz del sistema solar, fue generada por la explosión de una estrella cuya luz llegó a la Tierra el 4 de julio de 1054. En esta imagen, tomada por el Telescopio Canadá-Francia-Hawái del Observatorio Mauna Kea, los filamentos rojizos consisten sobre todo en gas hidrógeno, que se expande desde la región de la explosión, en el centro. El resplandor blancuzco deriva de electrones que se mueven casi a la velocidad de la luz a través de intensos campos magnéticos. Restos de supernovas como esta añaden su material evolucionado a nubes interestelares de gas y polvo. Estas nubes dan origen a estrellas nuevas que contienen más elementos «pesados», como el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el hierro, que las estrellas más viejas. Jean-Charles Cuillyre, CFHT*



*Lámina 22. Esta región expansiva de gas, conocida como IC 443 por los astrónomos, es el resto de una supernova, a unos cinco mil años luz del sistema solar. La estrella explotó unos cincuenta mil años antes de que el resto de la supernova produjera la luz registrada en esta imagen, obtenida por el Telescopio Canadá-Francia-Hawái del Observatorio Mauna Kea. Jean-Charles Cuillyre, CFHT*



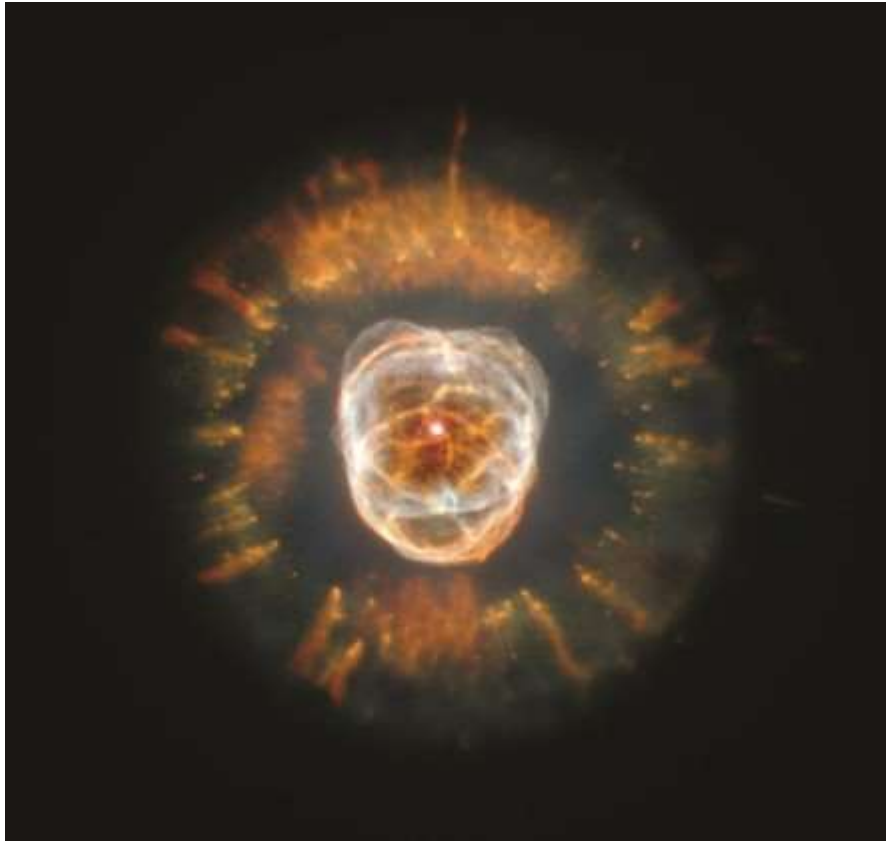
*Lámina 23. Estas volutas de gas de la nebulosa Trífida, a unos cinco mil años luz, fueron convertidas en imagen por la óptica de alta resolución del Telescopio Espacial Hubble. El gas de estas columnas debe de ser más denso que sus alrededores, vaciados parcialmente por radiación procedente de estrellas cercanas, jóvenes y calientes.*

*J. Hester (Universidad Estatal de Arizona) y otros, NASA*



*Lámina 24. Esta nebulosa, denominada NGC 2440, rodea el núcleo ya sin combustible, pero todavía caliente, de lo que en otro tiempo fue una estrella. Esta «enana blanca» aparece como un punto brillante de luz cerca del centro de la nebulosa en la imagen del Telescopio Espacial Hubble. Muy pronto, el gas que rodea este objeto, a unos cinco mil años luz del sistema solar, se evaporará en el espacio, con lo que la enana blanca quedará aislada mientras poco a poco se enfría y se vuelve más oscura. H. Bond y R. Ciardullo, NASA*





*Lámina 25. Este espectacular objeto, descubierto por el famoso astrónomo William Herschel en 1787, lleva el nombre de nebulosa Esquimal por su parecido con una cara rodeada por la peluda capucha de una parka. La nebulosa, situada a unos tres mil años luz, consiste en gas expulsado de una estrella envejecida e iluminado por radiación ultravioleta de dicha estrella, cuya superficie se ha vuelto tan caliente que emite más luz ultravioleta que luz visible. Igual que Herschel, los astrónomos llaman a estos objetos «nebulosas planetarias» porque un telescopio pequeño los muestra sólo como discos sin características especiales, semejantes a las imágenes de los planetas. Esta imagen del Telescopio Espacial Hubble elimina la confusión al revelar una gran cantidad de detalles en los gases que*

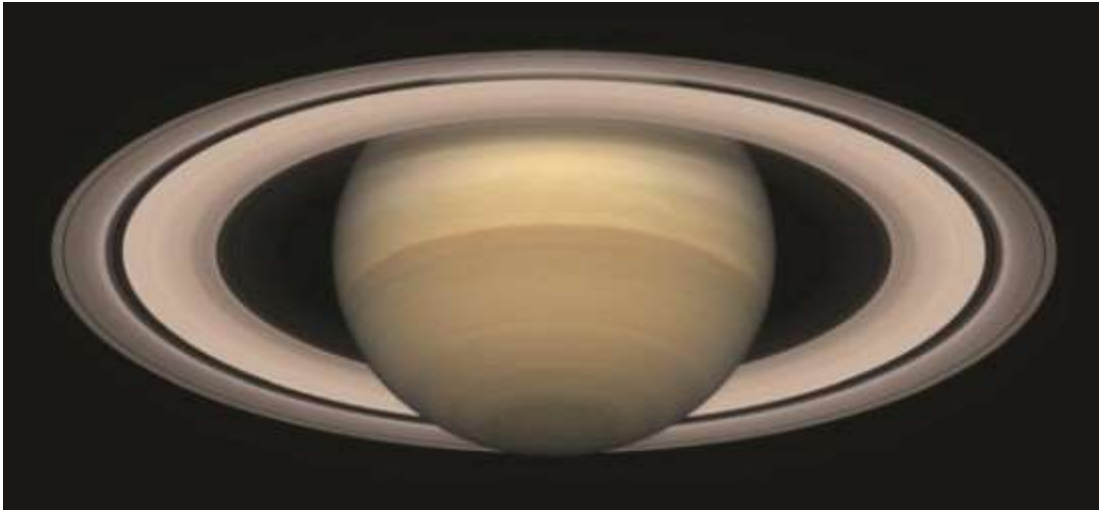
*se expanden desde la estrella central. Yrew Fruchter (Space Telescope Science Institute) y otros, NASA*



*Lámina 26. En medio de una región de formación de estrellas de nuestra galaxia, una nube de gas y polvo relativamente fría y densa absorbe luz estelar, lo que crea la nebulosa acertadamente denominada Cabeza de Caballo, fotografiada mediante el Telescopio Canadá-Francia-Hawái del Observatorio Mauna Kea. Esta nube de polvo, situada a unos mil quinientos años luz del sistema solar, pertenece a una nube interestelar fría y oscura mucho mayor, parte de la cual crea el área oscura que hay debajo de la cabeza del caballo. Jean-Charles Cuillyre, CFHT*

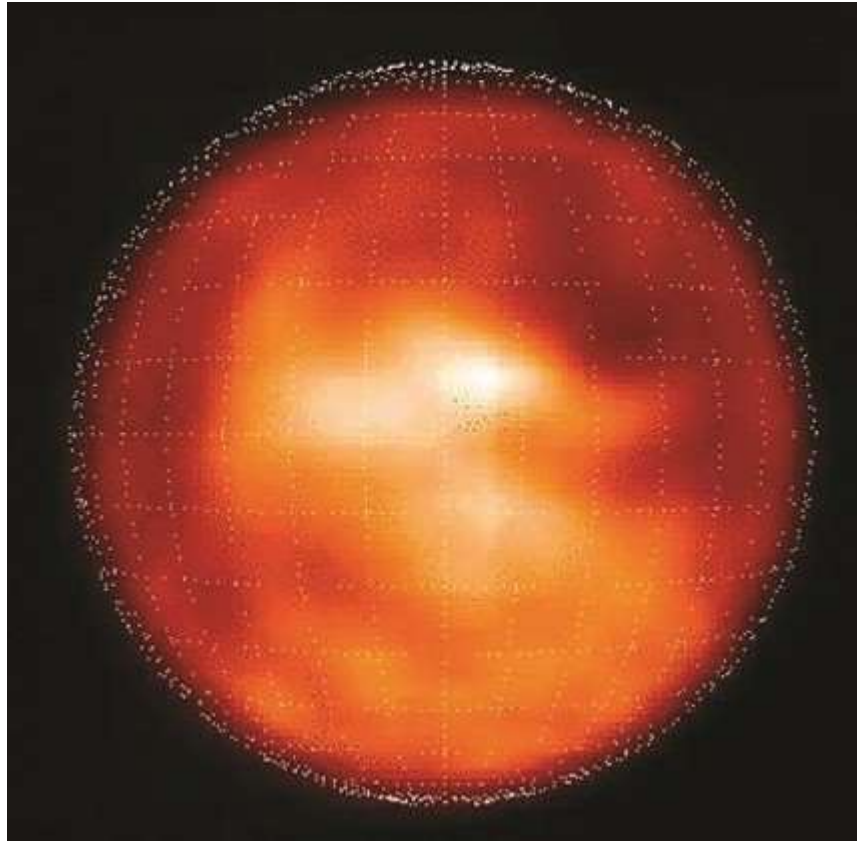


*Lámina 27. En esta fotografía de gran angular, tomada por el astrónomo aficionado Rick Scott en 2003, se aprecia el reflejo brillante producido por uno de los meteoros observados durante la lluvia anual de las Perseidas a mediados de agosto, época en que la Tierra se encuentra con más escombros espaciales de lo habitual. Moviéndose a muchos kilómetros por segundo, cada trozo de basura surca la atmósfera de la Tierra hasta que el meteoróide se vaporiza, sea parcial o totalmente. En esta fotografía podemos ver la galaxia de Andrómeda (a la izquierda) a una distancia de aproximadamente un trillón de veces superior a la altitud del meteoro, unos sesenta kilómetros por encima de la superficie de la Tierra. Rick Scott;*  
[members.cox.net/rmscott](http://members.cox.net/rmscott)



*Lámina 28. Saturno, el segundo planeta más grande del Sol, tiene un hermoso sistema de anillos, fotografiados en todo su esplendor por el Telescopio Espacial Hubble. Al igual que los más modestos sistemas de anillos de Júpiter, Urano y Neptuno, los anillos de Saturno se componen de muchos millones de pequeñas partículas que describen órbitas alrededor del planeta. R. G. French, J. Cuzzi, L. Dones y J. Lissauer, Hubble Heritage Team, NASA*

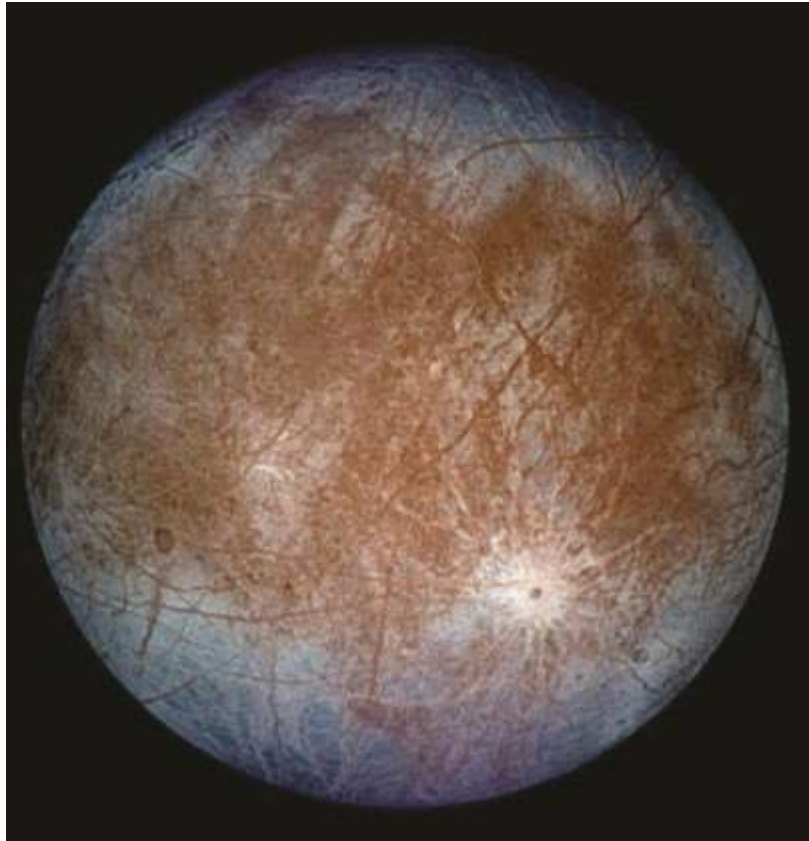




*Lámina 29 30. a & b. Titán, la luna más grande de Saturno, tiene una gruesa atmósfera compuesta principalmente de moléculas de nitrógeno, pero también rica en partículas como de niebla que impiden permanentemente la visión de su superficie en la luz visible (imagen superior, tomada en 1981 por la nave espacial Voyager 2). Observada en su radiación infrarroja, sin embargo (imagen inferior, tomada por el Telescopio Canadá-Francia-Hawái del Observatorio Mauna Kea), Titán deja ver los perfiles de rasgos superficiales que muy bien podrían ser charcos líquidos, zonas de roca e incluso glaciares de hidrocarburos congelados. Voyager 2, NASA; (b) Athena Coustenis y otros, CFHT.*



*Lámina 31. En diciembre de 2000, mientras pasaba junto a Júpiter camino de su encuentro en Saturno en 2004, la nave espacial Cassini fotografió las capas exteriores del mayor planeta del Sol. Júpiter consta de un núcleo sólido rodeado de capas gaseosas cuyo grosor es de decenas de miles de kilómetros. Estos gases, que son principalmente compuestos de hidrógeno —además de otros que llevan carbono, nitrógeno y oxígeno— se arremolinan según vistosos patrones como consecuencia de la rápida rotación de Júpiter. Los rasgos más pequeños visibles en esta fotografía tienen unos sesenta kilómetros de un extremo a otro. Cassini Imaging Team, NASA*







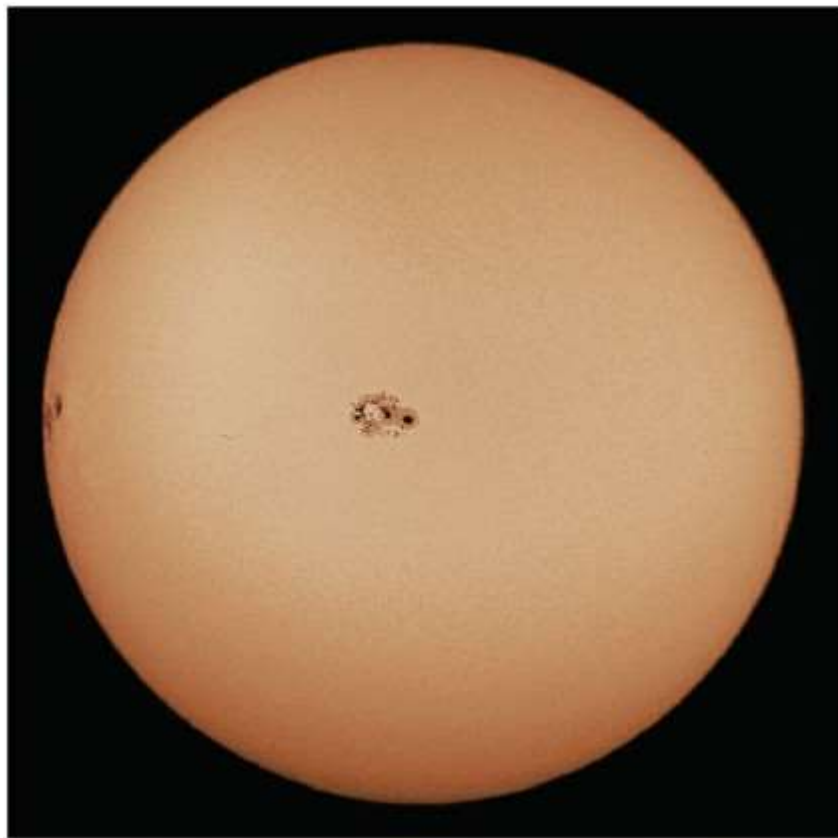
*Lámina 32 y 33. a & b. Europa, una de las cuatro lunas grandes de Júpiter, tiene aproximadamente el mismo diámetro que nuestra Luna, pero en su superficie se observan líneas largas y rectas que acaso representen grietas en la superficie helada (imagen superior). Tras obtener esta imagen global de Europa, la nave espacial Galileo pasó a efectuar una inspección más minuciosa (imagen inferior) desde una distancia de sólo 560 kilómetros. Este primer plano de la superficie de Europa muestra montañas de hielo y riachuelos rectos, y entre ellos lo que quizá sean cráteres más oscuros debidos a impactos. Hay serias conjeturas de que la capa de hielo de la superficie de Europa, tal vez de hasta un kilómetro de grosor, pueda cubrir un mar global capaz de sustentar formas de vida primitivas. y (b) Proyecto Galileo, NASA*



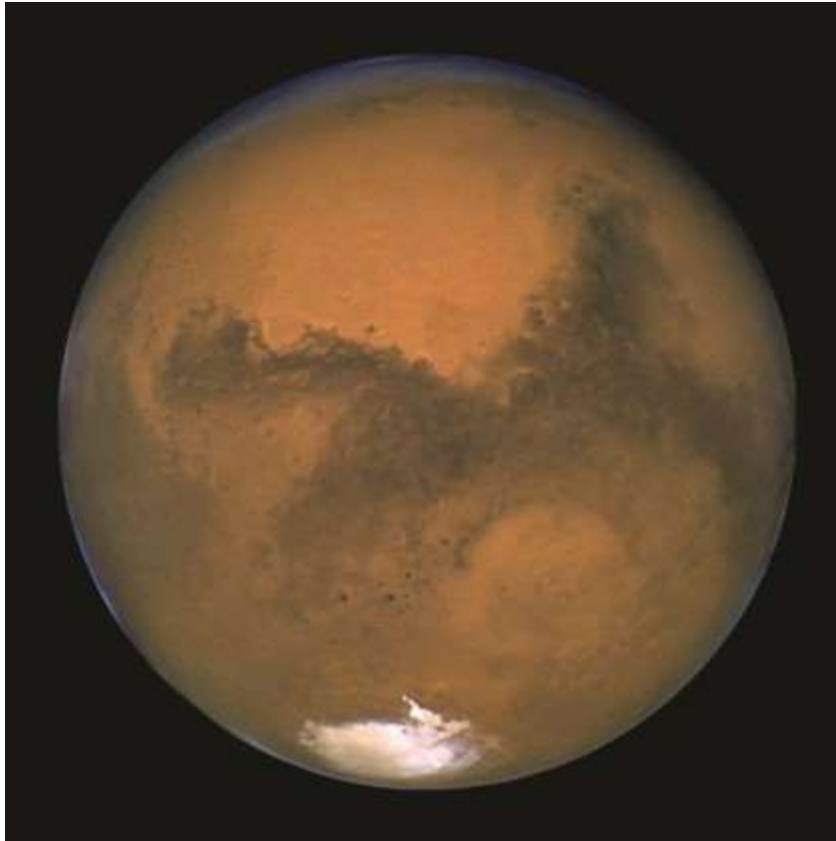
*Lámina 34. A principios de la década de 1990, ondas de radio de la nave espacial Magallanes que giraba alrededor de Venus —las cuales pueden atravesar la atmósfera ópticamente opaca del planeta— permitieron a los astrónomos generar esta imagen de radar de la superficie de Venus. En la imagen aparecen numerosos cráteres grandes, mientras que la amplia área de vistosos colores es la mayor del planeta con tierras altas. Proyecto Magallanes, Jet Propulsion Laboratory, Nasa*



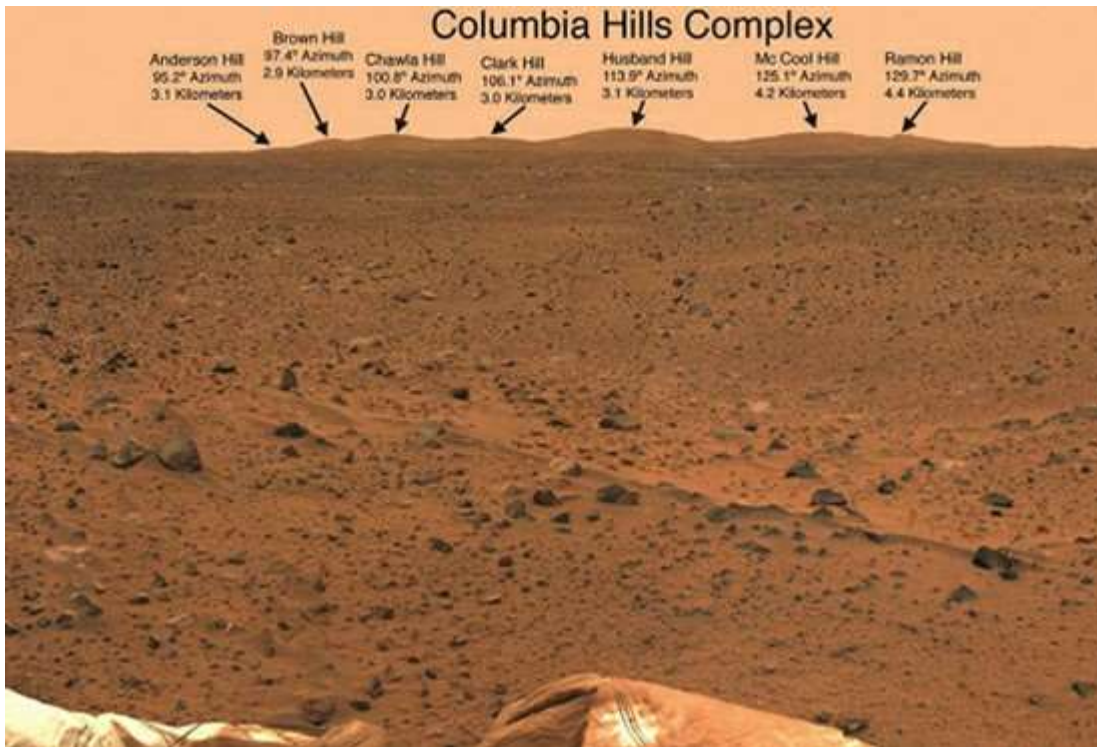
*Lámina 35. En 1971, los astronautas del Apolo 15 utilizaron el primer vehículo en otro mundo para explorar las tierras altas lunares, en busca de pistas sobre el origen de la luna. Buzz Aldrin, NASA*



*Lámina 36. En octubre de 2003, aparecieron en la cara del Sol dos grandes conjuntos de manchas solares, cada uno varias veces más grande que la Tierra, captados aquí por el astrónomo aficionado Juan Carlos Casado. Girando con nuestra estrella, estas manchas solares tardan casi un mes en cruzar la superficie del Sol y volver al mismo lugar de nuevo, generalmente desvaneciéndose más o menos en este período. Las manchas solares deben su relativa oscuridad a sus temperaturas más frías (unos 8000 grados Fahrenheit en comparación con la temperatura superficial promedio del Sol de 10.000 grados Fahrenheit). Las temperaturas inferiores surgen de la influencia de campos magnéticos también relacionados con erupciones solares violentas, capaces de emitir chorros de partículas cargadas que afectan a las comunicaciones por radio en la Tierra y a la salud de los astronautas. Juan Carlos Casado; ([www.skylook.net](http://www.skylook.net))*



*Lámina 37. En la parte inferior de esta imagen de Marte, tomada por el Telescopio Espacial Hubble durante la gran aproximación del planeta a la Tierra en 2003, observamos el casquete polar sur (principalmente dióxido de carbono congelado). En el lado inferior derecho, el gran rasgo circular se denomina «cuenca de impacto Hellas». Numerosos cráteres salpican las tierras altas marcianas de tonos más claros, mientras las áreas más oscuras son las tierras bajas. J. Bell, M. Wolff, y otros, NASA*



*Lámina 38. En esta fotografía de la superficie marciana, tomada por el robot Spirit en enero de 2004, se ven colinas en el horizonte, a unos kilómetros. La NASA ha puesto nombre a siete de estas colinas en honor de los astronautas que murieron en el desastre del transbordador Columbia el 1 de febrero de 2003. Como los dos lugares donde aterrizó la nave espacial Viking en 1976, en los emplazamientos donde actuaron los robots Spirit y Opportunity en 2004 se aprecian llanuras con rocas desperdigadas y sin signos visibles de vida. Spirit rover, NASA/Jet Propulsion Laboratory/Cornell*



*Lámina 39. Una imagen en primer plano del entorno inmediato del robot Spirit muestra lo que quizá sea un antiguo lecho de roca, así como rocas más jóvenes ricas en compuestos que en la Tierra suelen formarse debajo del agua. La tonalidad rojiza predominante deriva de óxidos de hierro (herrumbre) del suelo y las piedras de la superficie. Spirit rover, NASA/Jet Propulsion Laboratory/Cornell*



*Lámina 40. El profesor de biología de la UCLA Ken Nealson con uno de los autores (NDT) en el valle de la Muerte, durante el rodaje del especial Origins para PBS NOVA. Como experto en microorganismos geológicamente estresados, Nealson sabe que este entorno caliente, árido y por lo demás hostil funciona como un próspero ecosistema para bacterias que viven la mar de bien en las grietas de las rocas o en la parte inferior, protegidas de la insostenible luz del Sol. El color rojizo de las rocas del valle de la Muerte se parece mucho al de la superficie de Marte. Syra Haller, Unicorn Projects, Inc.*





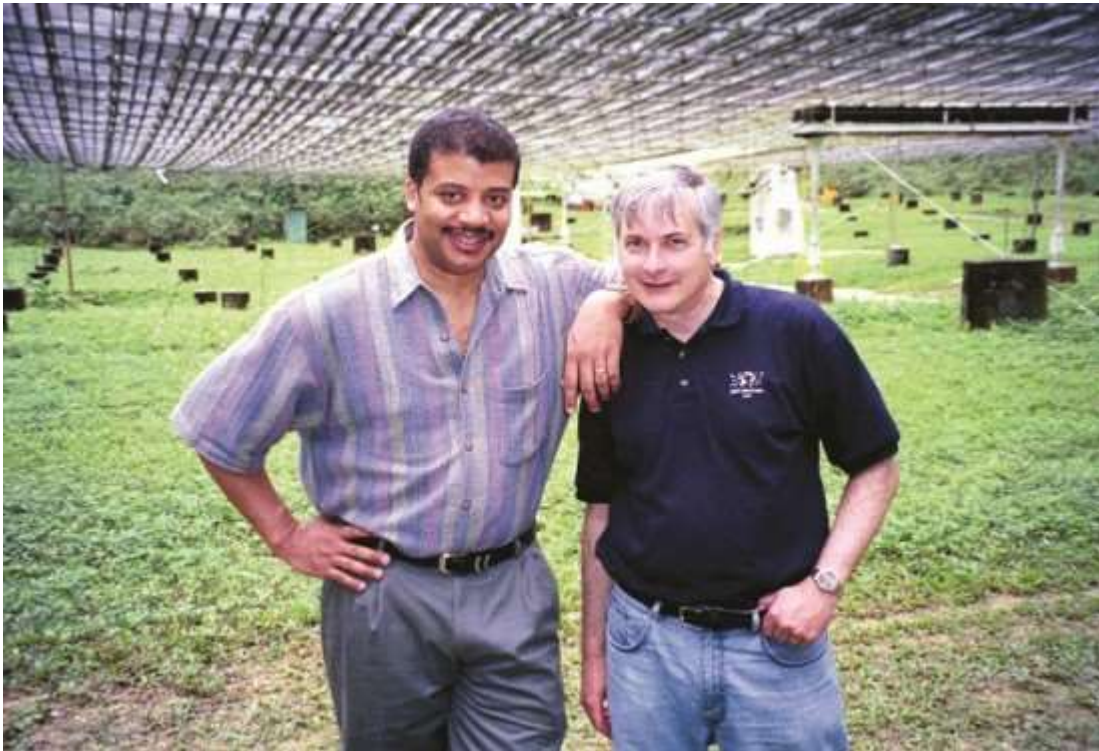
*Lámina 41. Mal Día en la Tierra. Visión del artista espacial Don Davis de la colisión entre un asteroide y la Tierra hace sesenta y cinco millones de años, que precipitó la extinción de los dinosaurios no aves así como el 70% de las especies terrestres, incluidos todos los animales mayores que una panera. Los nichos ecológicos que habían quedado vacíos debido a la desaparición de los dinosaurios permitieron a los mamíferos evolucionar desde las musarañas arborícolas —que no eran otra cosa que mini dinosaurios— hasta las muchas y variadas formas de mamíferos que vemos en la actualidad.*

*Don Davis, NASA*



*Lámina 42. Esta formación rocosa de «fumarola hidrotermal», mostrada en sección transversal vertical, fue extraída del arrecife Juan de Fuca del océano Pacífico, y en la actualidad se exhibe en la Sala del Planeta Tierra del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. A lo largo de los arrecifes del mar, el agua puede filtrarse por la corteza y calentarse muchísimo disolviendo minerales a su paso. Cuando el agua sale a borbotones por el fondo marino, encontramos estructuras parecidas a chimeneas, formadas por la precipitación de minerales debido al contacto con el agua fría. La porosidad de estas estructuras, y los gradientes químicos y de temperatura que sustentan, permiten a un ecosistema entero prosperar gracias a fuentes energéticas geoquímicas y geotérmicas, al margen del Sol como fuente de energía vital. La recién descubierta*

*resistencia de algunas bacterias y otras formas de vida en la Tierra ha ampliado la lista de entornos del universo donde cabe esperar que se descubra vida. Neil deGrasse Tyson, American Museum of Natural History*



*Lámina 43. El doctor Seth Shostak, del Instituto SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence), y uno de los autores (NDT) se toman un descanso para posar entre tomas en el rodaje de Origins, en el Radiotelescopio de Arecibo de Puerto Rico. Shostak utilizó este telescopio, el más grande del mundo, para «escuchar» posibles señales inteligentes producidas por civilizaciones lejanas. El telescopio de Arecibo está situado en un cráter natural de piedra caliza. Shostak y Tyson fueron filmados mientras caminaban y*

*hablaban bajo una estructura de malla metálica, que era, en sí misma, un entorno de otro mundo.* Syra Haller, Unicorn Projects, Inc

## **Autores**

NEIL deGRASSE TYSON (Bronx, Nueva York, EE. UU. - 5 de octubre de 1958) es un astrofísico, escritor y divulgador científico estadounidense. Actualmente es director del Planetario Hayden en el Centro Rose para la Tierra y el Espacio, investigador asociado en el Departamento de Astrofísica del Museo Estadounidense de Historia Natural. Desde el año 2006 es el presentador del programa de televisión de corte educativo científico *NOVA Science NOW*, del canal público de Boston WGBH, miembro de PBS, y que ha sido un invitado frecuente en *The Daily Show*, *The Colbert Report*, *Real Time with Bill Maher* y *Jeopardy!*

Tyson fue escogido para ser el anfitrión de la secuela del programa de televisión *Cosmos: Un viaje personal*, escrita y presentada originalmente por Carl Sagan. El programa, titulado *Cosmos: A Space-Time Odyssey*, fue



estrenado el 9 de marzo de 2014. Además, tuvo una aparición en un episodio de la popular serie *The Big Bang Theory*, y también prestó su voz para un episodio de la serie animada *Gravity Falls: Un verano de misterio* de Disney Channel y *Martha Speaks*, producida por WGBH para PBS Kids en su episodio *Ojos en los cielos*.

DONALD GOLDSMITH (1943) es un astrónomo y consultor. Junto con Owen Gingerich e Ivan King en representación del Comité de

Astronomía de la AAAS, ayudó a organizar la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia, que se celebró el 25 de febrero de 1974, «Velikovsky's Challenge to Science». También escribió la Introducción a los procedimientos que aparecen en el libro *Scientists Confront Velikovsky*.