

JOHN GRIBBIN

SOLOS EN EL UNIVERSO

EL MILAGRO DE LA VIDA EN LA TIERRA



Reseña

«Existen varios centenares de miles de millones de estrellas en la Vía Láctea. Realizando una estimación conservadora, varios miles de millones de ellas tienen en su órbita a planetas capaces de albergar vida. Puede que haya más planetas habitables en la galaxia que gente en el planeta Tierra. Pero “habitable” no significa “habitado”. La tesis de este libro es que solo en la Tierra existe una civilización inteligente.

En ese sentido, nuestra civilización está sola y es especial. Este libro les cuenta por qué».

Índice

[Agradecimiento](#)

[Prefacio](#)

[Introducción](#)

1. [Dos paradojas y una ecuación](#)
2. [¿Por qué es tan especial nuestro lugar en la Vía Láctea?](#)
3. [¿Por qué es tan especial el Sol?](#)
4. [¿Por qué es tan especial el sistema solar?](#)
5. [¿Por qué es tan especial la Tierra?](#)
6. [¿Por qué es tan especial la explosión del Cámbrico?](#)
7. [¿Por qué es tan especial la explosión del Cámbrico?](#)
8. [¿Por qué somos tan especiales?](#)

[Otras lecturas](#)

[Índice alfabético](#)

[Autor](#)

¡Para Simon Goodwin, que fue lo bastante generoso como para no escribirlo él primero!

Agradecimiento

Gracias a Simon Goodwin, Douglas Lin, Charley Lineweaver, Jim Lovelock, Mac Low, Josep M. Trigo-Rodríguez y los astrónomos de la Universidad de Sussex por las conversaciones y consejos sobre diversos aspectos de esta historia. Compartir oficina con Bernard Pagel en los últimos años me ha brindado la oportunidad de aprender mucho más de lo que pensaba en aquel momento sobre la composición química de las estrellas y cómo varía con el paso del tiempo. Como siempre, Mary Gribbin ha sido crucial para saber que mis palabras son inteligibles, y la Alfred C. Munger Foundation costó parte de nuestro viaje y otros gastos.

Prefacio

El único planeta inteligente

¿Debemos nuestra existencia al impacto de un «supercometa» en Venus hace 600 millones de años? Hace una década, la idea podía antojarse risible, pero ahora sabemos que existen objetos helados del tamaño de Plutón en órbitas situadas en los márgenes del Sistema Solar, sabemos que la Luna terráquea se formó gracias al impacto de un objeto del tamaño de Marte en la Tierra, sabemos por la teoría del caos que ninguna órbita alrededor del Sol es estable y, lo que es más importante, sabemos que a Venus y la Tierra les sobrevino una catástrofe en el mismo momento, justo antes de la explosión de vida en el planeta que condujo a nuestra existencia. ¿Casualidad? Tal vez. Pero, de ser así, es la más importante en una cadena de coincidencias que propiciaron el nacimiento de vida inteligente en la Tierra. Y esa cadena posee tantos eslabones débiles que ello puede significar que, pese a la proliferación de estrellas y planetas en el universo, como especie inteligente podríamos ser únicos.

Existen varios centenares de miles de millones de estrellas en la Vía Láctea. Realizando una estimación conservadora, varios miles de millones de ellas tienen en su órbita a planetas capaces de albergar vida. Puede que haya más planetas habitables en la galaxia que gente en el planeta Tierra. Pero «habitable» no significa «habitado». La tesis de este libro es que solo en la Tierra existe una civilización inteligente. El motivo guarda relación con la serie de

acontecimientos cósmicos que afectaron a Venus y la Tierra hace unos 600 millones de años. Pero esta es solo parte de la historia, tan solo una de las razones astronómicas y geofísicas por las cuales la Tierra es especial y, probablemente, única.

Desde los tiempos de Copérnico, el progreso de la ciencia ha provocado un constante desplazamiento del lugar que supuestamente ocupan los seres humanos en el centro del universo. A finales del siglo XX, la creencia popular decía que somos un tipo de animal corriente que vive en un planeta corriente que orbita una estrella corriente en lo más remoto de una galaxia del montón. Pero esta imagen de la Tierra y la humanidad como una unidad insignificante dentro del universo podría ser errónea. Este libro cuestiona dicha idea y propone que los seres humanos, después de todo, son especiales, productos únicos de una extraordinaria serie de circunstancias que hasta la fecha no se han dado en ningún otro lugar de la galaxia, y posiblemente en todo el universo. Una idea conocida como «Zona de Habitabilidad» afirma que hay algo raro en nuestro universo; pero tales especulaciones no tienen cabida en mi argumento. Pero sea o no inusual el universo, sí hay algo extraño en el lugar que ocupa la Tierra viviente dentro de él. La idea de la Tierra como «planeta viviente», expresada con particular claridad por el concepto de Gea, ha cautivado la imaginación de un numeroso público y se ha convertido en una ciencia respetable. Todos estamos acostumbrados a la idea de que nuestro hogar en el espacio es un sistema de vida engranado, y nos han alertado de la posibilidad muy real de que las actividades humanas pueden constituir la

muerte de Gea. Tales hipótesis son comentadas en los últimos libros de Jim Lovelock. La panorámica que esboza es bastante lúgubre desde la perspectiva provinciana de la vida en la Tierra. Pero ¿tiene alguna importancia el planeta en medio de la inmensidad del cosmos?

El reciente hallazgo de un planeta con un peso solo ligeramente superior al de la Tierra que orbita alrededor de una estrella cercana¹, junto con el descubrimiento a lo largo de los últimos años de más de 200 planetas gigantes similares a Júpiter que giran en torno a otras estrellas, ha despertado el interés por la posibilidad de encontrar vida inteligente en otros lugares del universo. Mucha gente cree que el hecho de que haya otros «sistemas solares» ahí fuera debe de significar que existen otras Tierras, y que si existen otras Tierras, sin duda debe de haber otra gente. Este argumento es falso. En primer lugar, parece probable que los planetas similares a la Tierra sean algo infrecuente. Pero, incluso si otras Tierras fuesen algo habitual, mi opinión es que, aunque la vida en sí misma pueda ser común, el tipo de civilización inteligente y tecnológica que ha surgido en la Tierra podría ser única, al menos en nuestra Vía Láctea.

Coincido con Lovelock en que otras Geas podrían ser relativamente comunes en el cosmos. Pero he llegado a la conclusión de que nuestro tipo de vida inteligente es tan poco habitual que solo podría darse en nuestro planeta. En este momento del tiempo cósmico solo

¹ ¡Y varias «Tierras» más mientras este libro estaba en imprenta!

existe vida inteligente en la Tierra. En el lenguaje de Gea, la Tierra es el único planeta inteligente, por lo menos en nuestra galaxia.

Veamos o no la mano de Dios en todo esto, significaría que somos la civilización tecnológicamente más avanzada del universo, y el único testigo que comprende el origen y la naturaleza del universo en sí. Si la humanidad y Gea logran sobrevivir a las crisis actuales, toda la Vía Láctea podría llegar a convertirse en nuestro hogar. De lo contrario, la muerte de Gea puede ser, literalmente, un acontecimiento de importancia universal.

Limito el debate a la Vía Láctea no solo porque es nuestro patio trasero astronómico, una isla en un espacio más allá del cual no podremos explorar físicamente en un periodo de tiempo razonable, sino también porque es posible que el universo sea infinito una vez rebasada la Vía Láctea. En un universo interminable, cualquier cosa es posible, pero puede que solo esté sucediendo algo interesante a una distancia infinita de nosotros. La Vía Láctea contiene varios centenares de miles de millones de estrellas, pero, con toda seguridad, solo alberga una civilización inteligente. En ese sentido, nuestra civilización está sola y es especial. Este libro les cuenta por qué.

Introducción

Contenido:

§. *Una entre un billón*

§. *A través de la Vía Láctea*

§. *Júpiteres calientes*

§. *Planetas en profusión*

§. *Comienzos polvorientos*

§. *Química cósmica*

§. *La vida de Gea*

§. *Buscar otras Geas*

§. Una entre un billón

El universo es grande. Vivimos en una burbuja expansiva de espacio que estalló a partir de un estado supercaliente y superdenso, el Big Bang, hace 13.700 millones de años. Puesto que esta burbuja solo ha existido durante ese periodo de tiempo, lo más lejos que podemos ver en cualquier dirección, en principio, es la distancia que la luz ha recorrido en 13.700 millones de años. Lógicamente, se trata de 13.700 millones de años luz, donde un año luz es la distancia que esta última puede recorrer en doce meses: unos 9.500 millones de km o 5.900 millones de millas. Así pues, el universo observable es una burbuja centrada en la Tierra con un

diámetro de 2. 400 millones de años luz, una burbuja cuyo tamaño crece a razón de dos años luz (uno por cara) cada año².

Eso no significa que nos encontremos en el centro del universo más de lo que un marinero que no avista tierra está en el centro del océano; el marinero se halla justo en el centro del círculo formado por su propio horizonte. Los marineros sitos en otras partes del océano se encuentran en el centro de su «mundo observable», rodeado por un horizonte. Sin duda, el universo se extiende más allá de nuestro horizonte cósmico, al igual que el mar se extiende más allá del horizonte del marinero, y bien podría (a diferencia del océano) ser infinito. Pero el rompecabezas sobre lo que reside más allá del horizonte cósmico no es lo que yo voy a abordar aquí.

Dentro de la burbuja del universo visible, las estrellas, más o menos como nuestro Sol, están agrupadas en islas denominadas galaxias. Basándonos en observaciones realizadas con instrumentos como el Telescopio Espacial Hubble, se calcula que existen cientos de miles de millones y quizá billones de galaxias en el universo observable. Todas las estrellas que vemos con nuestros ojos forman parte de una de esas islas del espacio, nuestra galaxia natal, llamada Vía Láctea. Pero nuestros ojos son sumamente inadecuados para revelar la verdadera naturaleza de la Vía Láctea. En números muy redondos, existen tantas estrellas en nuestra galaxia como en el universo observable. Cuando me inicié en el mundo de la astronomía en los años sesenta, el número redondo citado más a menudo era de 100 000 millones de estrellas en la Vía Láctea; a

² Esta es una leve simplificación que no tiene en cuenta la expansión del universo. Espero que mis colegas cosmólogos sepan perdonarme.

medida que pasaba el tiempo y que las observaciones mejoraban, la estimación se incrementó a unos 200.000 millones, y después a «varios» cientos de miles de millones. Puesto que nuestros telescopios no cesan de mejorar y nuestras observaciones siguen revelando cosas nuevas, no parece inverosímil redondear todo esto y decir, muy aproximadamente, que nuestra galaxia contiene un billón de estrellas. Eso significa que el Sol es una entre un billón, y que nuestra galaxia también. Hasta donde podemos decir, el Sol es una estrella bastante corriente (aunque podría tener significativas peculiaridades menores que comentaré más adelante).

§. A través de la Vía Láctea

Esta isla de un billón de estrellas es el trasfondo para mi historia sobre la aparición de vida inteligente en la Tierra y la incógnita de si existe más vida evolucionada en el universo. En este estadio de la comprensión humana del cosmos, lo único que podemos hacer razonablemente cuando buscamos una explicación a la aparición de la inteligencia es observar la historia y la geografía de nuestra galaxia e intentar entender por qué y cómo ha surgido en la Tierra y qué nos dice eso sobre las posibilidades de hallar civilizaciones en otras «Tierras» de la Vía Láctea. Si hay suficientes estrellas y planetas en todo el universo, tiene que haber otra Tierra en algún lugar; pero, ¿existe alguna que albergue otra civilización en nuestro patio trasero cósmico?

En esos términos, aunque nuestra galaxia contiene numerosos componentes, lo que nos interesan son los planetas más o menos

similares a la Tierra que orbitan estrellas más o menos parecidas al Sol. El Sol y los planetas del Sistema Solar se formaron a partir de una nube de gas y polvo que se desintegró en el espacio hace poco más de 4.500 millones de años, cuando el universo solo tenía dos tercios de su edad actual. El hecho de que el Sistema Solar tardara tanto en gestarse no es una coincidencia. Existen pruebas fehacientes de que los únicos elementos que se produjeron en cantidades significativas durante el Big Bang fueron el hidrógeno y el helio. Desde entonces se han acumulado, en un proceso conocido como nucleosíntesis estelar, elementos más pesados en el interior de las estrellas que se dispersan por el espacio cuando dichas estrellas mueren. Por tanto, tenía que transcurrir cierto tiempo hasta que varias generaciones de estrellas nacieron, vivieron y murieron antes de que existiesen nubes interestelares que contuvieran una amalgama suficientemente rica de elementos como el silicio, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno para crear un planeta como la Tierra.

Parte de ese proceso de nucleosíntesis es lo que hace perdurar la luminosidad de una estrella como el Sol. En el corazón del astro, la temperatura extrema y la presión mantienen unidos los núcleos de hidrógeno para fusionarlos y crear núcleos de helio, un proceso en el cual se libera energía. En otras estrellas, los núcleos de helio se combinan en diferentes fases de su ciclo vital para fabricar carbono, oxígeno, etcétera. Toda esta actividad prosigue en un disco de estrellas, gas y polvo que alcanza un diámetro de unos 100.000 años luz. Calculando la distribución de este material lo mejor que pueden

desde el interior de la galaxia, y cotejándola con observaciones de otras galaxias que alcanzamos a ver desde el exterior, los astrónomos han descubierto que nuestra galaxia presenta una estructura en espiral, con bandas de estrellas brillantes y jóvenes (conocidas como brazos espirales) que se entretajan hacia fuera desde el centro del disco. Antes se pensaba que esto describía un limpio patrón en espiral, con cuatro brazos principales y algunos arcos más pequeños, pero observaciones recientes indican que el patrón es más caótico, con espuelas que asoman de algunos de los brazos principales, fragmentos de otros brazos, e incluso una franja de brazos en el centro de la galaxia.

Nadie sabe exactamente cómo se forma el patrón en espiral, pero es una característica habitual de las galaxias. La hipótesis más verosímil es que se trata de una onda de densidad, en la cual estrellas y nubes de gas que orbitan alrededor del centro de la Vía Láctea se acumulan en ciertos lugares, del mismo modo que el tráfico de una carretera se acumula en un atasco en movimiento cerca de una gran carga que avanza lentamente. Las nubes de gas que se ven atrapadas en el atasco en movimiento son aplastadas, y algunas de ellas se destruyen para crear nuevas estrellas, que es lo que hace que el patrón en espiral destaque. Pero las estrellas individuales son mucho más pequeñas que esas nubes, y pasan por la ola de densidad sin verse afectadas en su ruta más o menos circular alrededor del centro de la galaxia.

En términos generales, la distribución de las estrellas en la galaxia puede describirse en cuatro partes. La mayoría de las estrellas,

incluido el Sol, están concentradas en un delgado disco de unos 1.000 años luz de profundidad, que se ensancha en un bulbo alrededor del centro de la Vía Láctea. El aspecto es el de dos huevos fritos pegados uno a otro. Juntos, el disco delgado y el bulbo central contienen aproximadamente un 90% de las estrellas de nuestra galaxia. El disco delgado está incrustado en otro más grueso pero también menos denso, que a su vez está rodeado de un halo esférico con un diámetro de al menos 300.000 años luz, a través del cual están repartidas unas cuantas docenas de atestados cúmulos estelares. Eso es todo en lo que a las estrellas luminosas se refiere. Sin embargo, existen otros dos componentes, revelados por su influencia gravitacional en el material brillante, que son fascinantes por derecho propio pero carecen de relevancia para la búsqueda de otras Tierras. El primero es un enorme agujero negro situado en el centro mismo de la Vía Láctea, con un diámetro veinte veces mayor que la distancia de la Tierra a la Luna y que contiene varios millones de veces la masa de nuestro Sol. Aunque parezca asombroso, solo constituye unas millonésimas partes de la masa de todas las estrellas luminosas de la galaxia juntas. En el otro extremo, todos los componentes luminosos de la galaxia están incrustados en una nube de material oscuro que mantiene a la Vía Láctea bajo su control gravitacional. Este material llena una esfera con una extensión de varios cientos de miles de años luz, y se cree que está compuesta de una nube de partículas diminutas del tamaño de un átomo. Pero la masa total de esas partículas

diminutas contiene diez veces más materia que todas las estrellas luminosas de la galaxia juntas.

Hasta la fecha, la búsqueda de otros planetas ha recorrido una minúscula distancia desde el Sol a través del disco delgado de la Vía Láctea. A finales del siglo XX, la tecnología solo avanzó lo suficiente como para buscar pruebas de la influencia de los planetas que orbitan estrellas cercanas, y la búsqueda desde entonces se ha ampliado (de un modo en absoluto uniforme) hasta una distancia de varios cientos de años luz, más o menos el 0,1% del diámetro del disco. Pero la buena noticia es que, allá donde miremos, encontramos planetas. A partir de esta evidencia, al menos la mitad de las estrellas que podemos ver probablemente tengan planetas girando a su alrededor.

§. Júpiteres calientes

Por el momento, los indicios de la existencia de planetas más allá del Sistema Solar son indirectos en casi todos los casos. Con la salvedad de algunos ejemplos, todavía no podemos verlos ni fotografiarlos, e incluso en esos casos, las imágenes son manchas borrosas; pero detectamos su influencia en sus estrellas madre. Cuando un planeta orbita alrededor de su estrella, la influencia gravitacional del primero hace que la estrella oscile de un lado a otro de un modo apenas perceptible, y esta oscilación puede detectarse estudiando el espectro de luz de la estrella. Cuando esta avanza hacia nosotros, las características del espectro varían levemente hacia el extremo azul del espectro; cuando se aleja, se

produce un movimiento hacia el extremo rojo del espectro. Este es un ejemplo del efecto Doppler, una de las herramientas más útiles de la astronomía; el alcance de las velocidades calculadas de este modo, a distancias de centenares de años luz, es aproximadamente el mismo que el de un corredor olímpico. Los planetas más fáciles de detectar utilizando este método son los que ejercen la mayor influencia en su estrella madre, es decir, grandes planetas cercanos a su estrella. Por tanto, no es sorprendente que la mayoría de los varios centenares de planetas descubiertos hasta la fecha sean grandes y se hallen próximos a sus estrellas. Sin embargo, con el paso del tiempo se están descubriendo también planetas más pequeños y otros situados más lejos de sus estrellas.

Se da el caso de que los primeros planetas «extrasolares» en ser descubiertos eran algo fuera de lo común. Pero, al ser los primeros, merecen un puesto de honor. La estrella alrededor de la cual orbitan no se asemeja al Sol. Es un objeto llamado estrella de neutrones, con el prosaico nombre PSR B1257+12. PSR significa pulsar, y las cifras son las coordenadas de la posición de los objetos en el cielo, el equivalente celestial a una referencia cartográfica. Un pulsar se forma cuando una estrella mucho mayor que nuestro Sol llega al final de su vida. Las capas externas de la estrella estallan en una explosión denominada supernova, y la región interior forma una bola de neutrones (de ahí su nombre) con un diámetro de unos 10 kilómetros, pero que contiene una masa más o menos equivalente al Sol (330.000 veces la masa de la Tierra). La densidad de una estrella de neutrones es igual a la densidad de un núcleo atómico, y cuando

se forman por primera vez, giran con gran rapidez y poseen intensos campos magnéticos. Esta combinación produce un rayo de ruido radioelétrico, que barre el cielo como el rayo de un faro cósmico; si el rayo está alineado de modo que incide en la Tierra, nuestros radiotelescopios lo detectan como un tictac regular. Son estos «pulsos» de ruido radioelétrico los que dan nombre a los pulsares. Algunos hacen «tic» cada pocos milisegundos, y PSR B1257+12 es uno de esos pulsares. En 1992, Alex Wolszczan y Dale Frail, de la Penn State University, midieron pequeños cambios en la velocidad con que hace tic este pulsar, y explicaron que dichas variaciones obedecían al efecto de dos planetas orbitando alrededor de la estrella moribunda. Dos años después, anunciaron el descubrimiento de un tercer planeta en el sistema. Esos planetas poseen una masa equivalente a 4,3 veces, 3,9 veces y una quinta parte de la masa de la Tierra, y orbitan la estrella una vez cada 67 días, una vez cada 98 días y una vez cada 25 días, respectivamente. En 2005, Wolszczan y su compañero Maciej Konacki anunciaron que habían identificado un cuarto planeta en el mismo sistema, un objeto diminuto cuya masa equivalía aproximadamente a una décima parte de la del planeta enano Plutón (con solo un 0,04% de la masa de la Tierra) que tarda 1250 días en completar una vuelta alrededor del pulsar. Sabemos también que al menos otro pulsar, PSR B1620-26, tiene uno o más compañeros planetarios.

Es imposible que esos planetas sobrevivieran a la explosión de la supernova en la cual se formó el pulsar. Cualquier planeta que orbitara la estrella original debió de ser destruido en la explosión.

Por tanto, debieron de formarse a partir de la nube de detritos que quedó alrededor de la estrella de neutrones tras la explosión. Esta fue la primera prueba directa de que los planetas pueden formarse a partir de nubes de residuos en torno a una estrella, y no mediante un proceso más exótico, como una colisión o un encuentro cercano entre dos estrellas. Puesto que los encuentros cercanos entre estrellas son infrecuentes, pero todas las estrellas se forman a partir de la colisión de nubes de material interestelar, la conclusión fue que los planetas debían de ser compañeros habituales de las estrellas. Y eso fue corroborado pronto por más observaciones.

El primer descubrimiento confirmado de un planeta orbitando una estrella similar al Sol se realizó en 1995. La estrella es 51 Pegasi (conocida por su abreviatura 51 Peg), y dicho descubrimiento fue obra de Michel Mayor y Didier Queloz, dos astrónomos suizos, utilizando la técnica de Doppler. La sorpresa fue que el hallazgo casi resultó demasiado sencillo. Fue más fácil de lo que se esperaba porque el planeta es grande y las órbitas muy cercanas a su estrella madre, una combinación que produce una fuerte «señal» Doppler. En nuestro Sistema Solar existen cuatro pequeños planetas rocosos que orbitan cerca del Sol, y cuatro planetas gaseosos muy grandes más alejados de él. Las distancias se calculan mediante la unidad astronómica, o UA, que es equivalente a la distancia media de la Tierra al Sol. Las masas se calculan con respecto a la de la Tierra. El pequeño planeta Mercurio, que es el más próximo al Sol con una distancia de 0,39 UA, posee una masa equivalente al 5% de la de la Tierra, pero el planeta más grande del Sistema Solar, Júpiter, tiene

una masa más de 300 veces superior a la de la Tierra, o alrededor de un 0,1% de la masa del Sol, que orbita a una distancia de 5,2 UA. El planeta encontrado alrededor de 51 Peg tiene la mitad de masa que Júpiter (tres mil veces la masa de Mercurio), pero gira en torno a su estrella a una distancia de solo 0,05 UA (rebasando por poco una décima parte de la distancia entre Mercurio y el Sol).

Nadie esperaba encontrar esos «Júpiteres calientes», como pronto se dieron a conocer, porque los grandes planetas gaseosos no pueden formarse cerca de su estrella madre. Por tanto, debieron de migrar hacia el interior desde las órbitas en las cuales nacieron. Esto entraña consecuencias significativas para la búsqueda de vida inteligente en el universo; pero lo más relevante de este descubrimiento, y los que llegarían después, era (y es) que los planetas son un fenómeno habitual.

Cuando se descubrieron los primeros planetas extrasolares, la noticia se antojaba tan fascinante que cada nuevo hallazgo merecía un artículo en una prestigiosa revista científica de rápida publicación, como el semanario *Nature*, y a menudo copaba los titulares de los medios de masas. Transcurrida más de una década, en el momento de escribir estas líneas se conocen casi cuatrocientos planetas extrasolares, y se están descubriendo «nuevos» planetas a razón de una docena aproximadamente cada año. Pero la noticia rara vez ocupa los titulares de las revistas científicas, y mucho menos los de la prensa popular, a menos que el último descubrimiento tenga algo de especial, por ejemplo, si el planeta es particularmente similar a la Tierra o si describe una órbita parecida

a la de nuestro planeta alrededor de su estrella madre. La historia completa del número y variedad de planetas extrasolares, o exoplanetas, es mucho mayor que la suma de sus partes.

Parte de esa historia versa sobre la variedad de técnicas utilizadas para descubrir planetas que giran alrededor de otras estrellas. Además del probado método Doppler, algunos planetas han sido detectados por su efecto en la luz de su estrella al pasar delante de ella, en una especie de mini eclipse conocido como tránsito. Otros han sido localizados merced a su influencia gravitacional en los discos de material polvoriento alrededor de las estrellas en los cuales se forman los planetas, en una agradable confirmación de nuestras ideas sobre la creación planetaria. En la actualidad se han fotografiado unos cuantos planetas extrasolares de forma directa, como pequeñas motas aparecidas en las imágenes que se obtienen utilizando telescopios infrarrojos. Existen otras técnicas. Casi todos esos descubrimientos, no obstante, tienen un elemento en común: hasta la fecha, han gozado de éxito utilizando telescopios terrestres. Pero ahora hay observatorios espaciales dedicados a la búsqueda de planetas extrasolares —entre ellos el Kepler, lanzado en 2009—, y el número de descubrimientos está aumentando excepcionalmente, pues realizan observaciones por encima de los estratos oscurecidos de la atmósfera de la Tierra. Por tanto, este es un momento especialmente propicio para hacer inventario de la primera fase de las observaciones exoplanetarias.

§. Planetas en profusión

Dado que esta fase incipiente en la búsqueda de exoplanetas inevitablemente captó muchos planetas grandes en órbitas extremas, desde el punto de vista de la búsqueda de otras Tierras resulta particularmente alentador que más de veinte sistemas extrasolares ahora conocidos contengan más de un planeta; se sabe que casi cien planetas orbitan estrellas normales en múltiples sistemas planetarios. Si bien todavía estamos descubriendo mayoritariamente planetas de gran envergadura («Júpiteres»), esto indica que dichos planetas no se forman de manera aislada, y al menos algunos de esos Júpiteres están acompañados de planetas rocosos más pequeños («Tierras»), como ocurre en nuestro Sistema Solar.

La mayoría de los planetas descubiertos hasta ahora orbitan alrededor de estrellas bastante similares a nuestro Sol (y que, por razones históricas, son conocidas como estrellas F, G o K; el Sol es una estrella enana amarilla G2 en esta clasificación). Esto obedece en parte a que los astrónomos que participan en la búsqueda están interesados sobre todo en dichas estrellas, como es natural. Pero también hay motivos para pensar, como comentaré más adelante, que es improbable que estrellas mucho mayores o mucho más pequeñas que el Sol ofrezcan las condiciones adecuadas para la formación de otras Tierras. Aunque la gran mayoría de los planetas descubiertos hasta la fecha poseen una masa al menos diez veces superior a la de la Tierra, y si bien algunos son mucho más grandes que Júpiter, el hecho de que incluso se hayan descubierto unos cuantos planetas cuya masa es solo unas veces mayor que la de la

Tierra, pese a las dificultades para detectarlos, sugiere que tales planetas rocosos en realidad son bastante comunes.

Lamentablemente, muchos de esos planetas cuyo tamaño es similar al de la Tierra siguen una órbita próxima a sus estrellas madre, como las órbitas de los Júpiteres calientes. La explicación natural es que son los núcleos rocosos sobrantes de Júpiteres calientes que se han evaporado por el calor de sus estrellas. Un ejemplo típico es el planeta COROT-7b, que orbita en torno a su estrella madre a una distancia de solo 2,6 millones de kilómetros, ¡en tan solo 20 horas! La estrella, COROT-7, es una enana amarilla con una antigüedad de tan solo 1500 millones de años, similar al Sol pero ligeramente más pequeña y fría; el diámetro de COROT-7b es menos de la mitad del de la Tierra, con una densidad similar a la de esta. Pero dicho planeta está tan cerca de la estrella que la temperatura superficial probablemente supere los 2.000 °C, suficiente para derretir la roca. En cualquier caso, puesto que su órbita no es demasiado circular y se halla tan próxima a su estrella, las fuerzas gravitacionales están aplastando el planeta, calentando su interior y, casi con total certeza, produciendo una actividad volcánica constante en la superficie. Es improbable que pueda albergar vida. Las simulaciones por ordenador indican que COROT-7b nació como un gigante gaseoso con una masa similar a la de Saturno (unas cien veces la masa de la Tierra) en una órbita un 50% más grande que la que traza actualmente.

Tras el sorprendente (pero sencillo) descubrimiento inicial de los Júpiteres calientes (un término que abarca a todos los grandes

planetas gaseosos, del mismo modo que el término «Tierras» atañe a los pequeños planetas rocosos), ha trascendido que en su mayoría describen órbitas mucho más alejadas de su estrella madre, y que los sistemas con uno o dos de esos planetas en órbitas similares a las de Júpiter y Saturno, pertenecientes a nuestro Sistema Solar, no son infrecuentes. Tal vez estén acompañados de otras Tierras; las simulaciones informáticas sobre la formación de los planetas alrededor de las estrellas indican de manera inequívoca que los gigantes van siempre acompañados de planetas rocosos más pequeños. Algunos astrónomos consideran ahora que todas las estrellas parecidas al Sol poseen al menos un planeta «parecido a la Tierra» —aunque en los términos «parecido a la Tierra» incluyen a planetas como Venus y Marte, y no solo otras auténticas Tierras— en la denominada «zona habitable» alrededor de una estrella, la región en la que puede existir agua líquida. Sin embargo, una gran diferencia es que las órbitas de los exoplanetas parecidos a Júpiter parecen en su mayoría más elípticas (menos circulares) que las de los planetas equivalentes del Sistema Solar.

Otros dos descubrimientos han estimulado la especulación sobre la posibilidad de vida en otros lugares del universo. Uno fue el descubrimiento de un planeta tan solo ligeramente más grande que la Tierra, aunque orbita una estrella mucho más tenue que nuestro Sol. La estrella es una débil enana roja conocida como Gliese 581, con solo un tercio de la masa del Sol y situada a algo más de 20 años luz de nosotros en dirección a la constelación Libra. La masa del planeta es solo 1,9 veces más grande que la de la Tierra y da

una vuelta completa a la enana roja una vez cada 3,15 días, demasiado cerca para que exista agua líquida en su superficie. Pero la masa de otro planeta del mismo sistema solo septuplica a la de la Tierra y orbita más lejos, una vez cada 66,8 días. Se encuentra justo en medio de la zona vital de una enana roja, donde las temperaturas oscilan entre unos 0 y unos 40 °C. Podría estar cubierto de agua. Las enanas rojas son comunes en nuestro vecindario celestial, y al igual que Gliese 581, parecen dar cobijo a «supertierras» en lugar de Júpiteres. Esto las convierte en objetivos primordiales para futuros estudios exoplanetarios, aunque son mucho más pequeñas que el Sol.

El agua es el epicentro de otro descubrimiento reciente. En 2007, un numeroso equipo de astrónomos anunció que había detectado agua en la atmósfera de uno de los Júpiteres calientes. Pudieron hacerlo porque el planeta, que ya había sido visto en un estudio anterior, pasó frente a su estrella madre, HD 189733, que se encuentra a 64 años luz de nosotros en dirección a la constelación conocida como la Zorra. Parte de la luz de la estrella atravesó la atmósfera del planeta gigante antes de ser captada por el Telescopio Espacial Spitzer, que trabaja con longitudes de onda infrarrojas. El efecto del agua en la atmósfera del planeta apareció claramente en la huella infrarroja de la luz.

Como si todo esto no resultase lo bastante interesante, en 2008, científicos de la Universidad de Toronto, utilizando el Observatorio Gemini de Hawai, obtuvieron la primera fotografía de un planeta en órbita alrededor de una estrella parecida al Sol.

En síntesis, sabemos que los planetas son comunes; sabemos que existen planetas rocosos en las zonas vitales que rodean a las estrellas; y sabemos que existe agua en algunos mundos que orbitan otras estrellas. De un billón de estrellas de la Vía Láctea, un cálculo conservador sería que 1000 millones de ellas (solo un 0,1%) están rodeadas por lo que podríamos denominar «tierras húmedas». ¿Cómo podría afianzarse la vida en un posible hogar planetario de esa índole?

§. Comienzos polvorientos

Todo lo que sabemos acerca de la formación de los planetas apunta a que la vida es un producto casi inevitable de la creación de una tierra húmeda. Las estrellas —y los planetas— se forman a partir de la disipación de nubes de gas y polvo en el espacio. En la Vía Láctea abunda este material, si bien necesita un efecto desencadenante —una presión de algún tipo— antes de empezar a desvanecerse. Pero el polvo, que es esencial para la formación de planetas análogos a la Tierra, solo es un pequeño componente del total. Las nubes que existen entre las estrellas son un 98% gas, casi todo el hidrógeno y el helio que ha quedado del Big Bang, lo cual solo deja un 2% a todo lo demás. Podemos ver estrellas jóvenes recién formadas en nubes como la Nebulosa de Orión, cuya envergadura es de unos 25 años luz y se encuentra a 1400 años luz; contiene miles de estrellas muy jóvenes, centenares de las cuales son de tan corta edad que todavía no se hallan en fase de madurez como el Sol. Puesto que la Nebulosa de Orión es la región formadora de estrellas más cercana a

la Tierra, algunos de esos objetos pueden ser estudiados con gran detalle, y en más de 150 casos se han identificado, y en algunos casos incluso fotografiado, discos de material polvoriento alrededor de jóvenes estrellas de la nebulosa. También se han identificado discos similares asociados con estrellas jóvenes en otras zonas de nuestro vecindario.

Esos discos son los lugares en los cuales se forman nuevos planetas. En algunos casos, los planetas se han detectado por sus efectos gravitacionales en los discos, combándolos o despejando el polvo de algunas regiones. Por tanto, sabemos que los planetas están asociados con esos discos, conocidos como discos protoplanetarios, o DPP. Gran cantidad de información sobre los DPP proviene de estudios a longitudes de onda infrarroja, puesto que los discos son mucho más fríos que las estrellas: un objeto frío irradia gran parte de su energía a longitudes de onda más largas que un objeto caliente. Los discos se calientan gracias a la energía de sus estrellas madre, que presentan longitudes de onda más cortas, y emiten de nuevo la energía en el infrarrojo. La naturaleza de la radiación infrarroja revela que las partículas de polvo que intervienen en este proceso son diminutas, con un diámetro de unas 10 micras, o diez millonésimas de un metro. Ese sería el tamaño aproximado de una bacteria. Pero los discos están constituidos prácticamente en su totalidad de polvo, ya que cualquier gas que hubiera en la nube original pero no se disipara en la estrella central ha sido expulsado del sistema por la radiación de la estrella joven.

El sistema Beta Pictoris, situado a unos 53 años luz, se ha estudiado a fondo y presenta una masa cien veces superior a la de la Tierra (aproximadamente igual a la masa de Júpiter) en forma de polvo en el disco. Una combinación de estudios ópticos e infrarrojos demuestra que existen concentraciones más densas en los anillos situados dentro del disco, que pueden ser los lugares donde se forman los planetas. Buena parte del polvo que vemos podría ser el resultado de las colisiones entre los primeros objetos rocosos formados en el sistema, conocidos como planetesimales, que chocan entre sí y a la postre se convierten en planetas más grandes.

En este sentido, Beta Pictoris, aunque tiene una edad estimada de solo unas pocas decenas de millones de años, es un sistema relativamente antiguo. La estrella HL Tauri, todavía más joven, tiene un disco que contiene alrededor de una décima parte de la masa de nuestro Sol —diez veces la masa de todos los planetas de nuestro Sistema Solar juntos— en un diámetro de 2000 UA. Probablemente se trate de polvo cósmico primordial, y no del polvo secundario observado alrededor de Beta Pictoris. Aproximadamente un 60% de las estrellas con una edad inferior a 400 millones de años tienen discos de polvo asociados, a diferencia de las que superan esa edad, con solo un 9%. Todo apunta a que los discos han desaparecido porque el polvo ha sido eliminado en la formación de planetas, y el periodo de tiempo que ello conlleva, esto es, varios cientos de millones de años, coincide con el periodo de formación del Sistema Solar, inferido a partir de varios estudios (abordaremos esto más adelante).

Pero, ¿qué contiene el polvo? Uno de los ingredientes más importantes es agua en forma de hielo. El elemento más habitual del universo es el hidrógeno, con un peso que ronda el 73%. El siguiente es el helio, con un 25% aproximadamente. Ambos fueron producidos en el Big Bang, pero el helio no reacciona químicamente, de modo que no interviene de forma directa en los procesos de vida. El tercer elemento más común es el oxígeno, con un 0,73%, seguido del carbono, con un 0,29%. En cuanto a la masa, el siguiente elemento más abundante es el hierro; pero en relación con el número de átomos circundantes, el quinto puesto lo ocupa el nitrógeno. Con una actitud un tanto displicente hacia las sutilezas químicas, los astrónomos embuten todos los elementos salvo el hidrógeno y el helio bajo el nombre de «metales». Pero, con independencia de su denominación, lo importante es que el oxígeno es el elemento reactivo más habitual después del hidrógeno, y el hidrógeno y el oxígeno reaccionan juntos con avidez para crear agua. Por tanto, las partículas estelares y las de los DPP deben de contener mucho hielo, que forma una capa sobre la superficie de cualquier partícula sólida, como las de carbono (grafito). Esas partículas son tan importantes como las partículas sólidas del humo del tabaco. Debido al proceso de formación de hielo en el espacio, que pasa directamente de vaporoso a sólido sin convertirse en agua en ningún momento, se parece más a los copos de nieve que a los cubitos de hielo, y cuando un «copo de nieve» choca con otro, tiende a pegarse y crea partículas más grandes. La pegajosidad de las partículas se ve propiciada por el hecho de que las moléculas

de agua tienen una carga eléctrica positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, produciendo así fuerzas eléctricas que mantienen unidas las partículas como pequeños imanes. Pronto, de acuerdo con los parámetros astronómicos, las partículas de un DPP son lo bastante grandes para atraerse unas a otras por medio de la gravedad, y de este modo da comienzo el proceso de la formación planetaria. La clase de moléculas que pueden formarse en la superficie de dichas partículas es sorprendentemente compleja. Sabemos de la existencia de moléculas complejas en el espacio gracias a observaciones de las grandes nubes de gas y polvo que existen entre las estrellas, realizadas en longitudes de onda radio. Al igual que los átomos de un elemento individual producen un patrón característico, como una especie de código de barras, en el espectro de la luz visible, distintas clases de moléculas complejas generan su patrón en la parte radio del espectro. Actualmente se han identificado de este modo más de 140 tipos distintos de molécula en el espacio. Estas van desde sustancias simples y poco sorprendentes como el hidrógeno molecular (H_2) y el agua (H_2O) hasta compuestos que contienen diez o más átomos en cada molécula, como el n-propil cianido (C_3H_7CN) y el formiato de etilo (C_2H_5OCHO). Como con esos dos ejemplos, muchas de estas moléculas complejas se han creado a partir de la combinación de átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. En cierto nivel, esto no es sorprendente, puesto que ya he mencionado que esos son los cuatro elementos radiactivos más comunes del universo en cuanto a los números de átomos que los rodean. En otro nivel, es

muy importante porque esos cuatro elementos, denominados colectivamente «CHON», son los más importantes de la química de la vida. Sin duda, eso guarda relación con el hecho de que la vida utiliza los materiales químicos que tiene a su disposición, pero también con las inusuales propiedades químicas del carbono.

§. Química cósmica

Los átomos de carbono poseen la inusual habilidad de combinarse con hasta cuatro átomos más a la vez, incluidos otros átomos de carbono. La manera más sencilla de describir esto es imaginar que un átomo de carbono tiene cuatro ganchos que asoman de su superficie, y que cada uno de estos puede acoplarse a otro átomo para crear una cadena química. En el ejemplo más sencillo, cada molécula de metano compuesto está integrada por un único átomo de carbono rodeado de cuatro átomos de hidrógeno, que están unidos a él por cadenas: CH_4 . Pero los átomos de carbono pueden unirse unos a otros a proa y a popa para formar cadenas, engastando cada átomo de carbono de la cadena con otros dos átomos de carbono, pero dejando dos eslabones libres para enlazar con otros tipos de átomos, y dejando los dos átomos de carbono situados en los extremos de la cadena con tres eslabones libres. O la cadena puede convertirse en un anillo en el cual los átomos de carbono forman un bucle cerrado, todavía con dos eslabones disponibles para cada átomo del anillo para formar otras uniones. Incluso las moléculas complejas con base de carbono, incluidos otros anillos y cadenas, pueden adherirse a otras cadenas de

carbono u otros anillos. Es este rico potencial para la química del carbono lo que hace posible la complejidad de la vida. De hecho, cuando los químicos empezaron a estudiarla y se dieron cuenta de que el carbono interviene de manera tan crucial, el término «química orgánica» se convirtió en sinónimo de «química del carbono».

Existen dos componentes clave en la química de la vida. Para los no biólogos, la molécula vital más conocida es el ADN, o ácido desoxirribonucleico. Esta es la molécula que se halla dentro de las células de los seres vivos, incluidos nosotros, y alberga el código genético. Este contiene las instrucciones, de manera muy similar a una receta, que le dicen a una célula fertilizada cómo desarrollarse y convertirse en adulta. Pero también contiene las instrucciones que permiten a cada célula actuar correctamente para mantener en funcionamiento el organismo adulto: cómo ser una célula hepática, por ejemplo, o cómo absorber oxígeno en los pulmones. El mecanismo de la célula también incluye otra molécula, el ácido ribonucleico, o ARN. Como su nombre indica, las moléculas de ADN son esencialmente las mismas que las del ARN, pero sin átomos de oxígeno.

La parte «ribo» del nombre proviene de «ribosa» (siendo estrictos, los nombres deberían ser ácido ribosonucleico y ácido desoxirribosonucleico). La ribosa ($C_5H_{10}O_5$) es un azúcar sencillo, pero se encuentra en el epicentro del ADN y el ARN. Cada molécula de ribosa está integrada por un núcleo de cuatro átomos de carbono y un átomo de oxígeno que se unen describiendo una forma pentagonal. Cada uno de los cuatro átomos de carbono del

pentágono posee dos eslabones libres con los cuales unirse a otros átomos o moléculas. En la propia ribosa, estos eslabones unen el pentágono con átomos de hidrógeno y oxígeno y otro átomo de carbono, que suman cinco en total, y a su vez se unen con más hidrógeno y oxígeno; pero cualquiera de estas uniones puede ser sustituida por otra, incluidos grupos complejos que a su vez se adhieren a otros anillos o cadenas. En el ADN y el ARN, cada anillo de azúcar está unido a un complejo conocido como grupo fosfato, que a su vez se adosa a otro anillo de azúcar. Por tanto, la estructura básica de las moléculas vitales es una cadena, o espina dorsal, de grupos alternantes de azúcar y fosfato, con elementos interesantes que brotan de dicha espina. Son los elementos interesantes los que encierran el código de la vida, transmitiendo el mensaje en lo que en la práctica es un alfabeto de cuatro letras donde cada una de ellas se corresponde con un grupo químico diferente. Pero no ahondaremos en esa historia aquí; desde el punto de vista de la química interestelar, lo importante son los cimientos básicos del ADN, a saber, las moléculas de ribosa.

Nadie ha detectado todavía ribosa en el espacio. Pero los astrónomos sí han visto la huella espectroscópica de un azúcar más sencillo denominado glicolaldehído. Este está compuesto de dos átomos de carbono, dos átomos de oxígeno y cuatro átomos de hidrógeno (normalmente escrito como H_2COHCHO , que refleja la estructura de la molécula) y es conocido, lógicamente, como un «azúcar con dos moléculas de carbono». El glicolaldehído se combina fácilmente, en condiciones que simulan las de las nubes

interestelares, con un azúcar de cinco moléculas de carbono, creando la ribosa de cinco moléculas de carbono. Todavía no hemos hallado los cimientos del ADN en el espacio, pero sí los cimientos de los cimientos.

El otro tipo de «molécula de la vida» es la proteína. Las proteínas son el material estructural del cuerpo; siempre contienen átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, a menudo azufre y a veces fósforo. Cosas como el cabello y los músculos están hechas de proteínas en forma de largas cadenas, similares a las del azúcar y el fosfato en las moléculas de ADN y ARN; elementos como la hemoglobina, que transporta oxígeno en la sangre, son formas de proteínas en las cuales las cadenas se enroscan formando pequeñas bolas. Otras proteínas globulares actúan como enzimas, que propician ciertas reacciones químicas beneficiosas para la vida o inhiben otras que son perjudiciales. Existe tal variedad de proteínas porque están integradas por una amplia gama de subunidades, conocidas como aminoácidos.

Las moléculas de aminoácidos normalmente tienen un peso que se corresponde aproximadamente con cien unidades en la escala estándar, donde el peso de un átomo de carbono se define como 12, pero el peso de las moléculas de proteínas oscila desde unos pocos miles de unidades hasta unos pocos millones de unidades en la misma escala, lo cual nos da una idea aproximada de cuántas unidades de aminoácidos son necesarias para crear una molécula proteínica. Una manera de interpretar esto es que la mitad de la masa de todo el material biológico de la Tierra adopta la forma de

los aminoácidos. Pero, si bien una molécula proteínica concreta puede contener decenas o cientos de miles de unidades de aminoácidos independientes, todas las proteínas halladas en todas las formas de vida de la Tierra están compuestas de combinaciones de solo veinte aminoácidos distintos. De igual modo, todas las palabras de la lengua inglesa están integradas por diferentes combinaciones de solo 26 subunidades, las letras del alfabeto. Existen muchas otras clases de aminoácido, pero no se utilizan para crear la proteína de la vida tal como la conocemos.

Si un químico desea sintetizar aminoácidos en el laboratorio, es relativamente fácil y rápido empezando por compuestos como formaldehído (HCHO), metanol (CH_3OH) y formamida (HCONH_2), los cuales estarán a mano en cualquier laboratorio químico bien abastecido. Con dichos materiales a disposición, sería una locura empezar por los básicos: agua, nitrógeno y dióxido de carbono. Pero el laboratorio químico no es el único lugar en el que podemos encontrar esos componentes. Uno de los resultados más espectaculares de la investigación de nubes moleculares es el descubrimiento de que todos los componentes utilizados de manera habitual en el laboratorio para sintetizar aminoácidos (incluidos los tres que acabamos de mencionar) se hallan en el espacio, junto con otros como el formiato de etilo ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OCHO}$) y el n-propil cianido ($\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$). En cierto sentido, las nubes moleculares son laboratorios químicos bien abastecidos, donde las moléculas complejas no se forman átomo a átomo, sino uniendo subunidades no tan complejas.

Se dice que también se ha detectado en el espacio el aminoácido más simple, la glicina ($\text{H}_2\text{NH}_2\text{CCOOH}$). Es muy difícil captar la huella espectroscópica de una molécula tan elaborada, por no hablar de los aminoácidos más complejos, y esas afirmaciones no gozan de aceptación universal entre los astrónomos, aunque se han hallado aminoácidos en rocas del espacio surgidas de la formación del Sistema Solar que en ocasiones caen a la Tierra como meteoritos. Las aseveraciones, por tanto, se han visto alentadas por la reciente detección en el espacio de amino acetonitrilo ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$), que está considerado un precursor químico de la glicina. Pero aunque seamos cautelosos y dejemos de lado esas afirmaciones, y haciéndonos eco de la situación con el ADN, mediante la identificación de compuestos como el formaldehído, el metanol y la formamida, aun no descubriendo los cimientos de la proteína en el espacio, hemos encontrado los cimientos de los cimientos.

Las moléculas orgánicas complejas solo pueden crearse en las nubes moleculares, ya que dichas nubes contienen polvo, además de gas. Si todo el material de las nubes tuviese forma de gas o incluso si, por medio de un proceso inimaginable, existiera una molécula compleja del tipo $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$, ¿cómo se desarrollaría? Cabe imaginar que una colisión con una molécula de oxígeno, u O_2 , brindaría la oportunidad de capturar algunos de los átomos necesarios para crear glicina, $\text{H}_2\text{NH}_2\text{CCOOH}$. Pero el impacto de la molécula de oxígeno probablemente disgregaría el amino acetonitrilo, en lugar de propiciar su crecimiento. Sin embargo, las

diminutas partículas sólidas, revestidas de una nivea capa de hielo (no solo hielo de agua, sino también cosas como el metano y el amoníaco helado), son lugares a los que las moléculas pueden adosarse y mantenerse unas junto a otras el tiempo suficiente para que se produzcan las reacciones químicas apropiadas.

Las estrellas viejas se hinchan hacia el final de su vida y expulsan material al espacio. Los estudios estroboscópicos demuestran que este material incluye granos de carbono sólido, silicatos y carburo de silicio (SiC), que es el componente sólido más habitual identificado en el polvo que rodea a las estrellas, aunque existen numerosas características espectrales todavía no identificadas. Los experimentos de laboratorio que simulan las condiciones de las superficies de dichas partículas en el espacio han constatado que ofrecen un lugar en el que pueden darse las reacciones químicas necesarias para crear las moléculas orgánicas complejas que detectamos en el espacio. Algunos de esos estudios indican que las partículas no solo pueden ofrecer una superficie en la que puedan producirse las reacciones, sino que podrían existir vínculos químicos entre las moléculas y la propia superficie. Eso explicaría cómo perduran las moléculas el tiempo suficiente para que tengan lugar las reacciones incluso en zonas relativamente tibias de una nube molecular. Mientras se aferren a ella, hay mucho tiempo para que se produzcan las reacciones, porque las nubes moleculares pueden deambular por la galaxia durante millones —e incluso miles de millones— de años antes de que parte de la nube se disgregue para formar un grupo de nuevas estrellas. Cuando las partículas se

calientan a causa de la elevada temperatura de una estrella en periodo de formación, las moléculas complejas pueden ser liberadas y propagarse a través de la nube molecular, donde pueden ser detectadas por nuestros radiotelescopios.

En este contexto, es casi un anticlímax, pero aun así significativo, que en 2008 se detectara metano, una molécula orgánica simple, en la atmósfera de uno de los júpiteres calientes. No fue una sorpresa: el metano es un componente importante de la atmósfera del propio Júpiter. Pero, con todo, se consideró un hito. A título informativo, el planeta es el mismo en el que se identificó agua anteriormente y que orbita la estrella HD 189733. Los astrónomos que trabajan con el Telescopio Espacial Spitzer también han hallado grandes cantidades de ácido cianhídrico, acetileno, dióxido de carbono y vapor de agua en los discos que rodean a las estrellas jóvenes en las que se forman los planetas. Y un equipo de la Carnegie Institution utilizó el Telescopio Espacial Hubble para analizar la luz de una estrella conocida como HR 4796A, situada a 270 años luz en dirección a la constelación de Centauro, para determinar que el color rojo del disco polvoriento que rodea la estrella está causado por la presencia de compuestos orgánicos fabricados por la acción de la luz ultravioleta en compuestos más simples como el metano, el amoníaco y el vapor de agua. Estos pueden ser sintetizados en el laboratorio, pero no aparecen de manera natural en la Tierra porque serían destruidos en cuanto se formaran al reaccionar con el oxígeno de la atmósfera. Pero su presencia explica el tono marrón rojizo de Titán, la luna de Saturno, están presentes en cometas y

asteroides y bien podrían haber estado presentes en la Tierra cuando era joven. Las tolinas se consideran precursoras de la vida en la Tierra, lo cual convirtió su descubrimiento en el disco que rodea a HR 4796A en una noticia candente.

Sin embargo, esto no es lo mismo que encontrar esos componentes en un planeta. Cuando planetas como la Tierra se forman por la adición de fragmentos de roca cada vez mayores, se calientan debido a la energía cinética liberada por todas esas rocas chocando unas con otras. Un planeta rocoso inicia su andadura en un estado estéril y líquido, sin duda lo bastante caluroso como para destruir cualquier molécula orgánica presente en el material a partir del cual se formó. La importancia de todas las observaciones de material orgánico en el espacio es que nos dicen que existe una gran reserva de ese material disponible para caer sobre los planetas una vez esté lo bastante frío como para que las moléculas complejas sobrevivan. La vida no tiene que «inventarse» de cero en cada nuevo planeta a partir de elementos básicos como el agua, el dióxido de carbono y el nitrógeno, al igual que un químico orgánico no tiene que sintetizar los aminoácidos partiendo de esos elementos básicos.

§. La vida de Gea

En palabras de James Lovelock, el fundador de la teoría de Gea y una persona que ha reflexionado más que la mayoría de la gente sobre la naturaleza y el significado de la vida: «Nuestra galaxia parece un gigantesco almacén que contiene los recambios necesarios para la vida». Antes de comentar lo rápido que puede

afianzarse la vida en un planeta como la Tierra, merece la pena examinar brevemente Gea, la Gran Idea de Lovelock, puesto que la búsqueda de «otras Tierras» es, en muchos sentidos, la búsqueda de «otras Geas», y los planes de la NASA para la detección de otros planetas similares a la Tierra dependen en gran medida de la comprensión de la relación entre la vida y el universo desarrollada por Lovelock en el contexto de la teoría de Gea.

Irónicamente, cuando Lovelock ideó el concepto clave fue desestimado por la NASA, para la cual trabajaba como asesor. En 1965, su papel en la NASA consistía en ayudar con el diseño de experimentos para buscar indicios de vida en Marte. Supuestamente se iban a enviar detectores al Planeta Rojo en una sonda no tripulada, aunque este proyecto en particular fue cancelado antes de su lanzamiento. Mientras sus colegas se concentraban en ideas experimentales para demostrar la presencia de formas de vida análogas a las de la Tierra, Lovelock se interesó por la idea de crear una prueba general sobre la presencia de vida a una escala planetaria. Llegó a la conclusión de que una de las características fundamentales de la vida es que se mantiene a sí misma y su entorno en un estado que dista mucho del equilibrio químico. En una escala personal, nuestro cuerpo, por ejemplo, está más caliente que su entorno. En una escala global, el ejemplo obvio es la presencia de una gran cantidad de oxígeno en la atmósfera de la Tierra. El oxígeno es muy reactivo, y si no hubiese vida en la Tierra, pronto se vería atrapado en componentes como el agua, el dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Es la vida, utilizando la

energía del Sol para impulsar los procesos químicos vitales, la que devuelve el oxígeno al aire en cuanto lo consume.

Por aquel entonces, en la primavera de 1965, nadie sabía de qué estaba compuesta la atmósfera de Marte. Lovelock propuso que la mejor manera de buscar vida allí, en lugar de molestarse en enviar una sonda, sería fabricar un telescopio que pudiera escanear el espectro de Marte en el infrarrojo y averiguar qué gases estaban presentes en su atmósfera. Si eran gases inactivos como el dióxido de carbono, eso demostraría que Marte ahora es un planeta muerto, con independencia de lo que le hubiera sucedido en el pasado.

En septiembre de 1965, sin conocer la propuesta de Lovelock, un equipo de astrónomos franceses estudió el espectro infrarrojo de la atmósfera de Marte y descubrió que está integrado casi en su totalidad por dióxido de carbono en equilibrio químico. Las conclusiones estaban claras, al menos para Lovelock. No había vida en Marte, y no tenía sentido enviar instrumentos para buscarla. Aunque podía haber otras cosas interesantes que estudiar en el planeta, incluir experimentos de detección de vida en las sondas era un derroche de recursos valiosos. Esta conclusión no sentó demasiado bien a los científicos que habían dedicado su carrera a diseñar tales detectores, e incluso a día de hoy, transcurridos más de cuarenta años, la NASA sigue enviando sondas para buscar vida en Marte.

Cuando trascendió que la atmósfera de Venus también estaba dominada por dióxido de carbono, Lovelock empezó a pensar qué tenía de especial la Tierra. Según afirmaba, «el aire que respiramos

solo puede ser un artefacto, mantenido en un estado constante muy alejado del equilibrio químico mediante procesos biológicos». Los seres vivos, concluía, deben de regular la composición de la atmósfera, no solo hoy, sino a lo largo de toda la historia de la vida en la Tierra, literalmente, durante miles de millones de años.

Esto resolvía una incógnita conocida entre los astrónomos de la época como la «paradoja del joven Sol tenue». En los años sesenta, los astrónomos ya sabían, gracias a sus cálculos sobre el funcionamiento de las estrellas y sus estudios de otros astros, que en su juventud, el Sol era en torno a un 25% más frío que hoy. Si otras cosas hubieran sido iguales, la Tierra se habría congelado. La resolución del rompecabezas es que cuando la Tierra era joven, su atmósfera era rica en dióxido de carbono, y un fuerte efecto invernadero habría calentado la superficie del planeta. Pero entonces, la pregunta es la siguiente: ¿Por qué no se impuso un efecto invernadero galopante cuando el Sol se calentó, quemando la superficie del planeta, como al parecer sucedió en Venus? La respuesta, a juicio de Lovelock, es que la vida ha regulado la composición de la atmósfera, eliminando el dióxido de carbono de forma paulatina a medida que el Sol se calentaba y haciendo que las temperaturas de la Tierra fuesen cómodas para la vida.

Durante muchos años, esta reflexión llevó a Lovelock a desarrollar una teoría completa sobre cómo los componentes vivos e inertes de la Tierra interactúan a través de una serie de procesos de retroalimentación para mantener unas condiciones de vida adecuadas. Los científicos que no se sienten cómodos con el nombre

de «Gea» lo denominan «Ciencia del Sistema Terráqueo». Pero en ello no interviene la conciencia, al igual que tampoco somos conscientes de los numerosos procesos de interacción que mantienen la temperatura de nuestro cuerpo más o menos constante.

Hablaremos más adelante de la teoría de Gea o, si lo prefieren, de la Ciencia del Sistema Terráqueo. El argumento relevante en este caso es que la reflexión de Lovelock nos brinda los medios para buscar vida más allá del Sistema Solar exactamente del mismo modo en que aquellos astrónomos franceses demostraron sin proponérselo que no hay vida en Marte. Y la deliciosa ironía es que los científicos de la NASA ahora respaldan totalmente a Lovelock, ya que en esta ocasión, sus carreras dependen de la aplicación de la teoría de Gea para buscar vida en otros lugares.

§. Buscar otras Geas

Utilizar la técnica para buscar indicios de vida en planetas extrasolares conlleva una enorme operación de ampliación a escala. Parte del problema es la necesidad de realizar observaciones en la parte infrarroja del espectro, donde las huellas de moléculas interesantes como el dióxido de carbono, el vapor de agua y el ozono (la forma triatómica del oxígeno) son fuertes. Por desgracia, las longitudes de onda infrarrojas de la radiación son absorbidas por la atmósfera de la Tierra y por el polvo de la zona interior del Sistema Solar, lo cual dificulta captar rasgos débiles. Para estudiar la atmósfera de Marte en el infrarrojo, lo único que se necesita es un telescopio decente en una montaña de Francia, por encima de la

mayoría de las capas oscurecedoras de la atmósfera terrestre. Pero para estudiar las atmósferas de los planetas extrasolares del tamaño de la Tierra en el infrarrojo es preciso un sofisticado telescopio espacial en la órbita de Júpiter, alejado de todas las interferencias asociadas con el Sistema Solar interno. Transcurrido casi medio siglo desde el legendario trabajo de los franceses, al menos contamos con la tecnología necesaria para realizar el trabajo; lo único que necesitamos es el dinero para hacer uso de la tecnología.

Estimuladas por el descubrimiento de planetas extrasolares en los años noventa, las agencias espaciales europea y estadounidense (ESA, por sus siglas en inglés, y NASA) idearon planes detallados para fabricar un telescopio de esa índole. La versión europea se denominó Darwin, y la estadounidense Terrestrial Planet Finder, o TPF. Sus planes eran muy similares, y si algún día sale algo de la pizarra, probablemente será una misión conjunta con otro nombre, pero aplicando los mismos principios. El telescopio funcionará en el infrarrojo porque es ahí donde los planetas terrestres (similares a la Tierra) brillan más: la energía que absorben de sus estrellas madre es irradiada de nuevo en longitudes de onda más largas, ya que los planetas son más fríos que las estrellas. Para que la detección de planetas terrestres sea factible, necesitamos un telescopio lo más grande posible, pero, por suerte, existe una técnica llamada interferometría, que hace posible utilizar varios telescopios pequeños unidos entre sí para imitar algunas de las propiedades de un único telescopio mucho mayor. Esto supone sumar la luz de

todos los telescopios pequeños de la manera adecuada; pero también puede emplearse para substraer la luz de un telescopio de la de otro. Haciendo de la necesidad virtud al utilizar la interferometría, los astrónomos han obrado un excelente truco en el que toda la luz del objeto situado en el centro del campo de visión queda anulada, de modo que en la práctica, la estrella desaparece, dejando una panorámica nítida de los planetas mucho más tenues que orbitan a su alrededor.

Los primeros diseños del proyecto incluían un grupo de seis telescopios infrarrojos, cada uno de ellos con un espejo de unos 1,5 metros de diámetro, volando en formación en los vértices de un hexágono. Se unirían unos a otros o a otra nave no tripulada en el centro de la formación mediante rayos láser, lo cual les permitiría mantener una disposición cerrada mientras la nave central enviaba los datos a la Tierra. La distancia con respecto a la nave adyacente sería de unos 100 metros, pero tendrían que mantener su posición con una precisión de menos de un milímetro, mientras giraban alrededor del Sol a una distancia de más de 600 millones de kilómetros de la Tierra. Versiones posteriores del plan han reducido el número de telescopios a cuatro, pero han incrementado el diámetro de cada espejo hasta alcanzar unos seis metros. Se decida lo que se decida a la postre, los principios siguen siendo los mismos.

Asombrosamente, los expertos nos aseguran que esa misión podría lanzarse tras unos pocos años —desde luego menos de una década— de iniciar el proyecto. Pero entonces llevaría años de

concienzudas observaciones en un proceso en múltiples fases el localizar otras Tierras en nuestras cercanías galácticas.

El primer paso consistirá en encontrar planetas terrestres. Eso significa planetas con un tamaño similar al de la Tierra, Venus y Marte que describan órbitas también parecidas a los de estos. Planetas como Mercurio son demasiado pequeños y están demasiado cerca de sus estrellas madre como para ser detectados mediante esta tecnología. Los astrónomos han confeccionado una lista de objetivos de 200 estrellas cercanas que consideran buenas candidatas para contar con sistemas planetarios y que estarían situadas a unos 50 años luz de nosotros. Para detectar cualquier planeta terrestre que orbite alrededor de esas estrellas, el telescopio debería observar cada sistema durante varias decenas de horas, así que se tardarían unos dos años en examinar todo este catálogo y desechar las estrellas sin planetas. Entonces, las cosas se pondrán interesantes.

La siguiente fase consistirá en buscar planetas con atmósferas, y la mejor huella de esto último probablemente surgirá del dióxido de carbono, que es un absorbente de gran consistencia y un fuerte emisor de radiación infrarroja; por eso es un gas invernadero tan potente. Identificar la huella del dióxido de carbono en el espectro de un planeta llevaría unas 200 horas de observación, así que los mejores ochenta candidatos se estudiarán de este modo durante los próximos dos años. Con suerte, esta fase del programa revelará asimismo la presencia de vapor de agua en las atmósferas de algunos planetas.

Solo entonces será posible aplicar al fin la prueba de Lovelock. La presencia de grandes cantidades de un gas reactivo como el oxígeno en la atmósfera de un planeta constituiría una prueba de que se hallaba en un estado de no equilibrio y, por ende, albergaría vida. Al igual que la propia Tierra, si hay oxígeno en la atmósfera de cualquier planeta terrestre que orbite una estrella parecida al Sol, las interacciones con la radiación ultravioleta de la estrella convertirán parte del oxígeno (O_2) en ozono, su forma triatómica (O_3), que posee una característica huella infrarroja, pero mucho más débil que el rastro que deja el dióxido de carbono. Se necesitarán dos años más para que el telescopio invierta 800 horas observando a cada uno de los veinte mejores candidatos identificados en la fase anterior de la búsqueda para detectar la presencia de ozono.

Sumando todo esto, los astrónomos están convencidos de que, si se dispone mañana de alguna financiación mágica para semejante misión, en veinte años sabremos a ciencia cierta si existen otros planetas que alberguen vida —otras Geas— a 50 años luz de la Tierra. Eso puede antojarse un plazo amedrentador para un proyecto de esa índole, pero estoy escribiendo este párrafo en el cuarenta aniversario del primer alunizaje. El tiempo que media entre hoy y el descubrimiento de otra Tierra podría ser menos de la mitad del tiempo transcurrido entre el Apolo 11 y nuestros días, así que yo podría llegar a ver ambas cosas. Habida cuenta de todo lo que sabemos acerca de las estrellas y los planetas, será una sorpresa que la búsqueda, cuando se ponga en marcha, resulte infructuosa. Estoy plenamente convencido, aun sin contar con

datos del proyecto Darwin/TPF, de que, en efecto, existen otras Geas.

Pero encontrar vida solo es parte de la búsqueda. ¿Existe vida inteligente ahí fuera? Esa es la pregunta que este libro pretende responder. Hasta el momento, la única civilización inteligente que conocemos es la nuestra, y algo que sí sabemos es que la inteligencia tardó mucho tiempo en aparecer en el planeta Tierra. Si (y este es un gran «si») eso es típico, tal vez sea importante que la vida se afiance en los anales de la historia de un planeta. Por tanto, ¿cómo nació la vida en la Tierra y qué puede decirnos eso sobre la posibilidad de encontrar vida inteligente en otros lugares? ¿Realmente es nuestro Sistema Solar uno entre un billón? ¿O están ahí fuera, esperando tener noticias nuestras?

Capítulo 1

Dos paradojas y una ecuación

Contenido:

§. *La lotería cósmica y la ecuación de Drake*

§. *La paradoja de la inspección y el principio copernicano*

§. *Panespermia y la Paradoja de Fermi*

§. *Buscar una respuesta*

La vida se afianzó en la Tierra con una premura casi indecente. Cuando nuestro planeta era joven, fue bombardeado por detritos que quedaron de la formación del Sistema Solar, creando un entorno hostil en el que la vida no podía sentar sus bases. Este bombardeo también afectó a la Luna. Estudios de los cráteres lunares y otras pruebas nos indican que el bombardeo finalizó hace unos 3.900 millones de años, unos 600 millones de años después de la formación del Sistema Solar. Pero existen indicios de que en cuanto terminó el bombardeo, dio comienzo la vida.

La prueba más antigua no es de la vida en sí, sino de una huella característica de ella. Hay diversas variedades de átomos, llamados isótopos, que poseen las mismas propiedades químicas pero pesos diferentes. La forma más estable se conoce como carbono-12, pero existe otra algo más pesada denominada carbono-13. Los seres vivos prefieren absorber carbono-12, de modo que producen un exceso del isótopo más ligero en comparación con su entorno. Rocas antiguas de Groenlandia, con algo más de 3.800 millones de años,

contienen exactamente esta huella isotópica de la vida. Esto indica que los procesos biológicos se pusieron en marcha en la Tierra no bien terminado el bombardeo; la explicación más plausible de esto es que el bombardeo llevaba consigo las semillas de la vida, gestadas a partir del cóctel químico que sabemos que existe en las nubes de gas y polvo de las cuales nacen las estrellas.

Aparte de los precursores de la vida detectados en esas nubes mediante espectroscopia, se han hallado tanto aminoácidos como azúcares en meteoritos y en los rastros de polvo de estos últimos que arden en la atmósfera terrestre en la actualidad. La confirmación del origen de esas moléculas orgánicas complejas proviene de experimentos de la NASA en los cuales se sintetizaron aminoácidos en condiciones que imitaban las que se dan en densas nubes interestelares. Esas moléculas orgánicas incluyen la glicina, la alanina y la serina, que son elementos básicos de la proteína. Y en 2009, un equipo de científicos de la NASA anunció que había descubierto glicina en un material devuelto a la Tierra por la sonda espacial Stardust desde el cometa Wild 2. Esta fue la primera detección confirmada de un aminoácido en el espacio. Ese material debió de caer abundantemente sobre la Tierra en sus años de juventud al final de los primeros estadios del bombardeo; como señalaba un portavoz del equipo de la Stardust: «Nuestro descubrimiento respalda la teoría de que algunos ingredientes de la vida se formaron en el espacio y llegaron a la Tierra hace mucho tiempo por medio de impactos de meteoritos y cometas».

Aun así, cuando hablamos de la vida, la mayoría de la gente quiere pruebas directas de criaturas vivas, a saber, fósiles. Los fósiles más antiguos que conocemos son los restos de colonias bacterianas conocidas como estromatolitos. Estos se encuentran en rocas con una antigüedad de hasta 3.600 millones de años, depositadas menos de 1000 millones de años después de la formación del Sistema Solar, y menos de 300 millones de años después del final de las primeras fases del bombardeo. Los estromatolitos no solo constituyen una prueba directa de los comienzos de la vida, sino que también demuestran que por aquel entonces existía ya un complejo ecosistema con muchas clases de microbios diferentes que vivían unos junto a otros e interactuaban entre sí. Sin duda, la vida debió de empezar hace más de 3.600 millones de años, como indica la prueba del isótopo.

Pero los estromatolitos también ponen de manifiesto una de las características más importantes de la vida en la Tierra. La química de la vida siempre tiene lugar en un entorno especial, protegido del mundo exterior. Ese lugar especial es la célula, una diminuta bolsa de líquido acuoso que contiene todos los requisitos de la vida. Dentro de la célula, el ADN y el ARN pueden dedicarse a sus quehaceres, es decir, a realizar copias de sí mismos (reproducción) y dictar las instrucciones para la fabricación de moléculas proteínicas. Esta es la química esencial de la vida, pero debe estar enmarcada en un entorno seguro.

La mejor manera de apreciar la importancia de la célula es observar el papel de las enzimas, las proteínas que propician las reacciones

químicas esenciales de la vida. Las enzimas no son moléculas particularmente resistentes. Si se calientan o enfrían demasiado, se desmoronan. Si su entorno es demasiado ácido o alcalino, también. Si esto sucede, ya no pueden desempeñar su labor y la vida se detiene. Por tanto, deben actuar dentro de un muro protector, una pared especial que permite la entrada de ciertas moléculas pero impide el paso a otras y viceversa. Ese muro se conoce como membrana semipermeable, y es el que rodea la burbuja de una célula. Uno de los rasgos definitorios de la vida —tal vez *el* rasgo definitorio— es que la región donde los procesos vitales penetran en la célula no presenta un equilibrio químico con su entorno. El equilibrio es sinónimo de muerte. La vida se mantiene en un estado de no equilibrio. La bióloga estadounidense Lynn Margulis lo resume diciendo que «la vida es un sistema que se limita a sí mismo».

Esto tiene profundas consecuencias para nuestra comprensión sobre el origen de la vida en la Tierra. Ahora se acepta de manera generalizada que una lluvia de meteoritos y cometas trajo la vida a la Tierra al final de la primera fase del bombardeo. La mayoría de las afirmaciones sobre cómo se produjo la transición de la no vida a la vida implican la fabricación de las moléculas esenciales en primer lugar (ADN, ARN y proteínas, aunque no necesariamente en ese orden), seguida de la «invención» de la célula. Una idea popular es que los compuestos complejos se concentraban en un tercer estrato de material, ya fuera atrapados en una capa de arcilla o esparcidos por una superficie, y que la química hizo el resto. Otra es que los

procesos químicos cruciales tuvieron lugar en un entorno cálido y químicamente rico como los que hayamos hoy en día en las fisuras del fondo del mar, donde la actividad volcánica produce agua supercaliente. Existen otras variaciones sobre el tema, que en su totalidad se remontan a la especulación de Charles Darwin en una carta que escribió a Joseph Hooker en 1871:

Podríamos imaginar que en una pequeña charca caliente, con toda clase de amoníaco y sales fosfóricas, luz, calor, electricidad, etc., se formara químicamente un compuesto proteínico preparado para sufrir todavía más cambios complejos.

Pero, ¿qué le ocurriría a ese componente? Las probabilidades de que fuese arrastrado o destruido son más numerosas que la posibilidad de que se combinara con otras moléculas complejas e hiciera algo interesante. Los elementos interesantes que podrían desembocar en la vida solo tendrían lugar en un entorno protegido. ¿Dónde mejor que en el interior de una célula? A mi juicio, es mucho más probable que las células llegaran primero en forma de burbujas constituidas por membranas semipermeables y fuesen absorbidas por la vida. Y existen pruebas fehacientes que respaldan esta idea.

A finales del siglo XX, investigadores del Ames Center de la NASA efectuaron experimentos en los que unas cámaras de vacío del tamaño de una caja de zapatos se enfriaban hasta alcanzar 10 grados por encima de la temperatura cero absoluta, equivalente a $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entonces se permitía que una mezcla de agua, metano, amoníaco y dióxido de carbono introducida en la cámara se congelara para formar fragmentos de aluminio o dióxido de cesio,

simulando el proceso mediante el cual se forman hielos en las partículas de polvo de las nubes interestelares. Después, la mezcla de moléculas se inundaba en radiación ultravioleta, imitando la radiación de las estrellas jóvenes. No les sorprenderá saber que el resultado fue la producción de gran cantidad de moléculas orgánicas, entre ellas alcoholes, cetonas, aldehídos y grandes moléculas con hasta cuarenta eslabones de carbono que unían sus átomos. La noticia no tardó en concitar la atención de otro investigador, David Deamer, de la Universidad de California en Santa Cruz. En los años ochenta, Deamer había causado sensación entre los astrobiólogos con sus estudios de un fragmento de roca espacial conocido como el meteorito Murchison, que tomó tierra en Australia en 1969. Al buscar restos de material orgánico, Deamer había pulverizado parte de la roca del meteorito y la había lavado con agua para eliminar cualquier molécula orgánica. Para su asombro, encontró cientos de glóbulos microscópicos flotando en el agua, cada uno de ellos integrado por una «doble piel», como si de pequeños globos se tratase. Y cuando cogió parte del material del experimento de Ames y lo sumergió en agua tibia, Deamer descubrió exactamente el mismo tipo de globos, o burbujas, denominados vesículas. Estas miden entre 10 y 40 micrómetros, tienen más o menos el mismo tamaño que los glóbulos rojos y son prácticamente indistinguibles de las vesículas obtenidas del meteorito Murchison. Eran como células, pero sin la química de la vida. Otros estudios revelaron lo que ocurría durante la formación de las vesículas. Algunas de las moléculas más complejas producidas por

la acción de luz ultravioleta en las partículas de hielo, tanto en el laboratorio (sin duda alguna) como en el espacio (supuestamente), son miembros de una familia conocida como lípidos, que presentan una estructura característica con «cabeza» y «cola», como si fuesen renacuajos diminutos. La cabeza de la molécula se siente atraída por el agua, pero la cola la rechaza. Cuando se sumergen esas moléculas en agua, forman de manera natural una doble capa, con la cabeza hacia fuera y la cola hacia dentro. Y estas «paredes» en dos estratos pronto se enroscan formando pequeñas bolas. Esto debió de suceder en las aguas cálidas durante la juventud de la Tierra, atrapando cosas como aminoácidos y azúcares dentro de las vesículas, en un entorno contenido en el que era posible que tuviese lugar el proceso que conducía a la vida. Sin esas barreras, las moléculas importantes de la vida habrían estado tan diluidas en el océano que no se habría fraguado ningún proceso químico interesante. La guinda del pastel es que, existiendo las materias primas, pequeñas bolas como estas crecen al insertar más lípidos en la piel de la burbuja, y si se desarrollan lo suficiente se dividen espontáneamente en dos esferas.

Incluso es posible —si bien no es esencial para la explicación de cómo empezó la vida en la Tierra— que existan vesículas en el interior de los cometas, de modo que la propia vida, y no solo el precursor de la química vital, llegara a la Tierra al final del primer estadio del bombardeo. Un equipo de investigadores del laboratorio Ames de la NASA (Max Bernstein, Scott Sandford y Louis

Allamandola) comentan algo similar en un artículo publicado por *Scientific American* en julio de 1999.

Una posibilidad interesante es la producción, dentro del propio cometa, de [material orgánico] que participaría en el proceso de la vida... se dan episodios reiterados de calentamiento en cometas periódicos como el Halley cuando se acercan al Sol [y] tiempo suficiente para que se desarrolle una mezcla muy rica de elementos orgánicos complejos... Es incluso concebible que pudiera existir agua líquida durante breves periodos dentro de los cometas más grandes... es bastante plausible que los cometas desempeñaran un papel activo más importante en el origen de la vida.

La versión más extrema de esta idea fue desarrollada en los años setenta y ochenta por Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe, que estaban convencidos de que la Tierra recibió las semillas de la vida del espacio. Sean correctas o no esas especulaciones, el argumento importante a destacar es que la visión conservadora actual dice que la Tierra fue sembrada de moléculas orgánicas complejas, a un paso de estar vivas, en momentos muy primarios de su historia. La vida en la Tierra no empezó de cero con una mezcla de moléculas sencillas como el dióxido de carbono, el agua y el metano.

Aun así, tal vez no parezca verosímil que el paso de la no vida a la vida pudiera producirse, ni siquiera dentro de la envoltura protectora de una vesícula. Pero debían de existir muchos cientos de miles de millones de vesículas en la juventud terrestre, ¡y solo tuvo que ocurrir una vez! Como dice Darwin hacia el final de *El origen de las especies*:

Probablemente, todos los seres orgánicos que han vivido en la Tierra descienden de alguna forma primordial, en la cual se insufló por primera vez la vida.

Esta reflexión ha sido ampliamente corroborada desde entonces por estudios sobre el material genético —el ADN— de muchos tipos distintos de seres vivos y sobre el funcionamiento de la propia célula, que utiliza exactamente la misma química básica (por ejemplo para procesar energía) en todos los seres vivos. Curiosamente, esta prueba indica también que la «célula primordial» era una bacteria amante del calor que pudo nacer cerca de una fisura volcánica submarina. Puesto que la Tierra joven estaba cubierta de agua y era muy activa geológicamente, esto no es sorprendente y coincide plenamente con la idea de que la química de la vida se desarrolló dentro de una vesícula del espacio. Solo nos dice dónde se encontraba dicha vesícula cuando empezó la vida.

§. La lotería cósmica y la ecuación de Drake

¿Puede contarnos todo esto algo acerca de la posibilidad de vida en otros lugares del Universo? Puesto que solo podemos recurrir al ejemplo de la Tierra, cabría pensar que es imposible sacar conclusiones cósmicas sobre la existencia de vida en otros lugares. Quizá sea muy sencillo que la vida comience, y que todos los planetas análogos a la Tierra alberguen vida; o tal vez sea difícil y el nuestro sea el único planeta habitado. Ambas posibilidades, y todas las intermedias a estos extremos, concuerdan con los indicios de

que existe vida en un planeta. Como dicen los estadísticos, no se puede generalizar a partir de las muestras de uno. O quizá sí. Algunos astrónomos, en especial Charles Lineweaver, de la Australian National University, aducen que la velocidad con la que la vida empezó en la Tierra es otra prueba importante que debemos sumar al hecho mismo de que exista vida. La mayoría de los astrónomos coinciden en que la Luna se formó tras un enorme impacto entre un objeto del tamaño de Marte y la Tierra, unos 100 millones de años después de la formación del Sistema Solar. La energía de este impacto debió de fundir la corteza de la Tierra y esterilizar el planeta, proporcionando una «pizarra en blanco» para el comienzo de la vida. Tras ese acontecimiento, durante unos 600 millones de años la Tierra estuvo sometida a un intenso pero decreciente bombardeo desde el espacio, y es posible que se produjera una catástrofe final denominada el «Último Bombardeo Intenso» antes de que terminara este proceso, pero Lineweaver no halla prueba alguna que respalde esta idea, y se produjera o no el Último Bombardeo Intenso, el argumento posterior no se ve afectado. Sea como fuere, cuando terminó el prolongado bombardeo empezó la vida. Lineweaver defiende el coherente argumento científico de que si la vida fuese un fenómeno infrecuente en el universo, sería improbable «que la biogénesis se produjera con tanta rapidez como parece haber ocurrido en la Tierra».

Lineweaver utiliza el ejemplo de una lotería para indicar cómo funciona la estadística. Si un jugador compra un billete de lotería cada día durante tres días y pierde los primeros dos pero gana el

tercero, un estadístico concluiría que las posibilidades de ganar seguramente no se acercarán a 1 y que probablemente rondarán más 1 de cada tres que 1 de cada 100. Si gran cantidad de jugadores compran lotería durante 12 días consecutivos y elegimos a uno de ellos y descubrimos que ganó al menos en una ocasión durante los primeros tres días, concluimos que es probable que las posibilidades de ganar sean bastante elevadas. Los estadísticos pueden especificar en qué medida son altas las probabilidades en términos del «nivel de confianza». Un nivel de confianza del 95%, por ejemplo, normalmente se considera una marca positiva. En este ejemplo en particular, la conclusión estadística apropiada es que la posibilidad de ganar la lotería con cualquier billete es de al menos 0,12, con un nivel de confianza del 95%. Por tanto, si el premio valiera al menos diez veces el precio del billete, merecería la pena participar en esta lotería en concreto.

En lo que a biogénesis se refiere, todos los planetas similares a la Tierra que encontramos en la Vía Láctea son nuestra muestra de jugadores, y la Tierra es nuestro individuo seleccionado que ganó la lotería de buen principio. Sin duda alguna, la vida nació (se ganó la lotería) transcurridos 600 millones de años desde el final del bombardeo, y quizá mucho antes. Por tanto, el cálculo estadístico lleva a la conclusión, con un nivel de confianza del 95%, de que existe vida al menos en un 13% de todos los planetas similares a la Tierra con una antigüedad mínima de 1000 millones de años, y que la proporción de dichos planetas es «con toda probabilidad cercana

a la unidad». O, en un lenguaje cotidiano, que la vida es algo común en el universo.

Podemos aplicar el mismo argumento al hecho de si la vida se originó en la Tierra, si nació en el espacio y fue traída a la Tierra por los cometas, si nació en otro planeta y se ha propagado por la galaxia a lomos de fragmentos de detritos cósmicos (panespermia) o incluso si fue dispersada deliberadamente por alienígenas inteligentes (panespermia dirigida). Con independencia de cómo empezó la vida, lo hizo tan rápido que es muy probable que también exista en otros planetas. Algunos consideran que esta es una información importante para incluirla en una ecuación ideada por el astrónomo Frank Drake a fin de cuantificar las posibilidades de encontrar vida en otros lugares del universo. Tengo mis dudas sobre la utilidad de esta «ecuación de Drake», pero al menos ofrece un sistema claro para sintetizar nuestra ignorancia sobre el tema.

La ecuación de Drake fue un producto del entusiasmo por el espacio generado por el lanzamiento de los primeros satélites artificiales de la Tierra a finales de los años cincuenta. Por aquel entonces, Frank Drake trabajaba en el radio observatorio Green Bank, sito en Virginia Occidental, y no solo estaba interesado en la posibilidad de que existieran otras civilizaciones inteligentes, sino también en la de comunicarnos con ellas utilizando radiotelescopios. Al principio, los pocos astrónomos que se tomaron en serio la idea acuñaron el término Comunicación con Inteligencia Extraterrestre, o CETI, por sus siglas en inglés, para describir el potencial resultado de su trabajo, y en 1974 se lanzaron señales al espacio desde el

gigantesco radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, con la esperanza de que algún día un ser las detectara «allí fuera» y respondiera. «Algún día» será mucho tiempo. Por motivos que no alcanzo a comprender, la señal se lanzó hacia un grupo de estrellas conocido como M13, en dirección a la constelación Hércules. Dicho grupo se encuentra a 25.000 años luz de distancia, y las ondas viajan a la velocidad de la luz (c), así que, aunque algún alienígena capte el mensaje y conteste de inmediato, ¡su respuesta llegará dentro de 50.000 años! Incluso ese periodo sería demasiado breve para algunos. La posibilidad de comunicarse con extraterrestres causó tal alarma en ciertos sectores que la percepción de los políticos y la ciudadanía, sobre todo en EE. UU., de que esos seres podrían no ser amigables motivó un ligero cambio de nombre, que acabó siendo Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre, o SETI, por sus siglas en inglés. A día de hoy, algunos radioastrónomos todavía buscan señales alienígenas, pero no retransmiten mensajes a las estrellas. ¡Es una lástima que todas las civilizaciones sean igual de paranoicas y todo el mundo esté escuchando y nadie hable!

Sin embargo, ese cambio de nombre todavía era cosa del futuro cuando, en 1961, Drake organizó el primer congreso científico dedicado a la posibilidad de la CETI (o la SETI) en Green Bank. El propósito del congreso era concienciar a la gente sobre las posibilidades y hacer propaganda a fin de recaudar fondos para la búsqueda, y Drake triunfó brillantemente en este objetivo al idear, como base del debate para la reunión, la ecuación que ahora lleva su nombre.

Esto se basa en el hecho de que la probabilidad de que sucedan dos cosas es igual a la probabilidad de que suceda una —un acontecimiento—, multiplicado por la probabilidad de que el otro acontecimiento se produzca. La posibilidad de sacar un tres en un dado, por ejemplo, es de $1/6$, ya que el dado solo ofrece seis posibilidades. La posibilidad de sacar un tres en un segundo dado también es de $1/6$. Por tanto, la probabilidad de lanzar dos dados y obtener dos treses es $(1/6) \times (1/6)$, o $1/36$. Sencillo. Y la misma regla básica es aplicable si tenemos una serie de acontecimientos y deseamos conocer la probabilidad de que todos se produzcan al unísono.

Drake intentó pensar en todos los factores que afectarían a la aparición en nuestra galaxia de una civilización tecnológica capaz de comunicarse en el espacio interestelar. Empezó por el número de estrellas de la Vía Láctea, que denominó N^* . Luego vino la fracción de estrellas que son como el Sol, f . Entonces, tenemos que calcular la fracción de estrellas que tienen planetas, f_p . La fracción de los planetas que se encuentran en la zona vital en torno a su estrella madre se designa como n_e . Los cálculos de Lineweaver entran en el siguiente número, la fracción de planetas en los cuales existe vida, f_i . La intuición interviene en cualquier cálculo de la fracción de los planetas análogos al nuestro en los cuales existe vida inteligente, f_c . Como si de un chiste se tratara, Drake añadió un número para dar cabida al cálculo del porcentaje del tiempo de vida de un planeta durante el cual está ocupado por una civilización capaz y dispuesta a comunicarse con otras inteligencias; a esto lo denominó f_l .

Sumándolo todo, si N es el número de civilizaciones situadas más allá de la Tierra con las que podríamos comunicarnos en la Vía Láctea actualmente,

$$N = N^* \times f_s \times f_p \times n_e \times f_i \times f_c \times f_l$$

Esta es la ecuación de Drake.

La buena noticia es que empezamos con un gran número de estrellas. N^* es al menos varios cientos de miles de millones, y podría llegar a un billón. Y lo que es aún mejor, aunque no se conocía ningún planeta extrasolar en 1961, ahora sabemos que los sistemas planetarios son comunes, si bien todavía no se ha dirimido si los planetas similares a la Tierra son algo habitual. Y si nos tomamos en serio el argumento estadístico de Lineweaver, f_i probablemente se acerque a 1 y desde luego es mayor que 0,13. La mala noticia es que aunque solo uno de los números de la ecuación sea cero, entonces $N = 0$, por elevadas que sean las demás cifras.

También es bastante negativo que no se sabe cómo podemos cuantificar esos otros números, aunque es más o menos lo que yo intentaré hacer en el resto de este libro. Sin embargo, lo peor de todo es que Drake realizó una flagrante simplificación (totalmente justificada en el contexto de lo que se proponía y lo que se sabía en 1961, pero que ya no es válida) utilizando solo un número para representar un cálculo de la fracción de los planetas en los cuales existe vida como en el nuestro, esto es, f_c . Esta cifra se entiende mejor como el producto de una larga serie de números que

representan la probabilidad de los varios acontecimientos de la historia de la vida en la Tierra que condujeron al nacimiento de nuestra civilización y, como expondré, cualquiera de esos números podría ser cercano a cero, convirtiendo a la propia f_c y, por tanto, a N , en algo absolutamente ínfimo.

La experiencia humana indica que el último número de la ecuación, f_i , también es pequeño. El estadounidense Michael Shermer realiza una interpretación de lo que es la civilización bastante distinta de la mayoría. Bajo cierto punto de vista, la civilización humana es un todo continuo; pero Shermer señala que muchas civilizaciones independientes han ascendido y caído desde que comenzaron las crónicas, y solo una de ellas produjo la tecnología que permite, por ejemplo, la construcción de radiotransmisores. Shermer ha estudiado la duración de sesenta civilizaciones terrestres, que van desde Sumeria hasta Babilonia, pasando por Egipto, Grecia y Roma y llegando hasta la época moderna, incluyendo once en China, cuatro en África, tres en India, dos en Japón, seis en Centroamérica y Sudamérica, y seis estados modernos de Europa y Estados Unidos. El tiempo total que abarcan las sesenta civilizaciones es de 25 234 años, lo cual da una vida media, f_i de 420,6 años. Y lo que es peor, para las veintiocho civilizaciones aparecidas desde la caída de Roma, el tiempo de vida medio es de solo 304,5 años, y la habilidad para enviar y recibir radioseñales solo ha surgido en una ocasión. Basándose en eso, Shermer calcula que incluso con unas estimaciones optimistas para los otros números de la ecuación de

Drake, ahora mismo existen a lo sumo otras tres civilizaciones radiotransmisoras en la galaxia.

Nada de esto ha impedido que la gente intente utilizar la ecuación de Drake o alguna variación para calcular N , empleando sus intuiciones predilectas para los números situados a la derecha de la ecuación. Un indicativo de la futilidad de este planteamiento es que las «respuestas» que obtienen van desde cero hasta varios centenares de miles de millones. La ecuación de Drake no debe considerarse un problema que puede resolverse y ofrecer un cálculo realista del número de civilizaciones tecnológicas de nuestra galaxia, sino como una especie de regla mnemotécnica que nos recuerda qué debemos tener en cuenta cuando consideremos la posibilidad de encontrar vida inteligente en otros lugares. Tal vez no sea sorprendente que, ante las complejidades que ello entraña, algunos prefieran volver a argumentos basados en estadísticas y teorías de la probabilidad, con algunas conclusiones bastante asombrosas.

§. La paradoja de la inspección y el principio copernicano

Una de las cifras más cruciales en la ecuación de Drake es f_i , que corresponde a la vida de una civilización tecnológica. Nuestra mejor conjetura sobre el valor de este número probablemente dependa de lo optimistas que seamos respecto del destino de nuestra civilización. Una autoridad como *sir* Martin Rees, a la sazón presidente de la Royal Society, fue lo bastante pesimista como para proponer que podrían quedarnos menos de cien años; pero es posible encontrar optimistas (muchos de ellos autores de ciencia-

ficción) que creen que la humanidad puede superar todos los problemas que afronta y desarrollar los recursos de nuestro Sistema Solar durante millones, e incluso decenas de millones de años. La teoría de la probabilidad puede mejorar gracias a esas corazonadas y ofrecer una panorámica del tiempo de vida que probablemente le queda a nuestra civilización. También puede darnos una visión de nuestro pasado utilizando las mismas estadísticas aplicables al hecho de coger un autobús.

Todos hemos vivido la experiencia de esperar siglos a que venga el autobús, y luego ver dos (o incluso tres) que llegan uno detrás de otro. Por alguna razón, la mayoría de las veces que acudimos a buscar el autobús parecemos esperar la mitad del intervalo medio de paso de los mismos. ¿Cómo es posible? Sin duda, debería equilibrarse, de modo que el siguiente autobús pasara pronto algunos días y más tarde otros. Pero pensando un poco, queda claro que, por norma general, esperaremos «más que la media» a nuestro autobús.

Esto funciona así. Supongamos que los autobuses de nuestra ruta salen de la terminal a intervalos regulares de 10 minutos. Pueden sufrir retrasos a causa del tráfico, pero el intervalo medio sigue siendo de 10 minutos. Si un autobús se demora 2 minutos, el intervalo entre este autobús y el que va delante ahora es de 12 minutos, pero el intervalo entre ese y el que va detrás es de 8, con lo cual, el intervalo medio sigue siendo de 10 minutos. Si estuviéramos en la parada de autobús todo el día y calculáramos los intervalos entre cada uno, eso es lo que descubriríamos: lapsos diversos, con

un promedio de 10 minutos. Pero eso no es lo que sucede cuando cogemos el autobús. Llegamos a la parada a una hora aleatoria y subimos al primer autobús que aparece. Si los autobuses estuviesen espaciados de manera equitativa, nuestra espera media sería de 5 minutos, la mitad del intervalo entre autobuses. Pero como no lo están, es más probable que lleguemos a la parada durante un lapso prolongado y no uno corto. Si se da un lapso de 20 minutos después de un autobús y luego dos autobuses llegan con un minuto de diferencia, tenemos una probabilidad 20 veces mayor de llegar a la parada durante el lapso prolongado que durante el corto. Así que probablemente tendremos que esperar más de la mitad del intervalo medio entre autobuses. Visto así, es de sentido común; los teóricos de la probabilidad pueden cuantificar todo esto y han dado al fenómeno el nombre de «paradoja de la inspección».

La paradoja de la inspección también puede explicar por qué había muchos ancianos en tiempos de Shakespeare aunque la esperanza de vida por aquel entonces era baja. La esperanza de vida media al nacer era escasa porque muchos niños y bebés morían durante la infancia. Si alguien sobrevivía y llegaba a la edad adulta, tenía muchas posibilidades de alcanzar una longevidad decente. Incluso en una población en la que la esperanza de vida al nacer sea, por ejemplo, de 20 años, habrá gente que viva hasta los 70 o más. Por ancianos que seamos, todavía tendremos alguna esperanza de vida, y a cualquier edad, nuestra esperanza de vida total es mayor que la esperanza de vida al nacer para la población en general. Todo el

mundo tiene una esperanza de vida superior a la media, otro ejemplo de la paradoja de la inspección. Todas las personas que gocen de buena salud y lean esto pueden tranquilizarse al saber que tenemos una esperanza de vida superior a la media. De igual modo, el hecho de que nuestra civilización siga «viva» significa que su esperanza de vida es superior a la media en comparación con la de todas las civilizaciones que han existido en la Vía Láctea, pero esto último se basa en la idea, con la que Michael Shermer discrepa, de que toda la historia humana representa una única «civilización». Como decía el matemático Amir Aczel en referencia a la longevidad de la vida en la Tierra, y no solo de la civilización humana, sino adoptando esta perspectiva, «nuestra capacidad para inspeccionarnos a nosotros mismos es un resultado del hecho de que llevamos mucho tiempo en este planeta [y] la probabilidad condicional de que hayamos estado durante mucho más tiempo que otras civilizaciones... es elevada». Y «suponiendo que existan otras civilizaciones, cabe la posibilidad de que seamos una de las primeras de nuestra galaxia en llegar a este nivel de avance». Curiosamente, ha llegado a la misma conclusión que Shermer —que probablemente estemos solos en la galaxia— partiendo de una suposición totalmente distinta sobre lo que constituye una civilización.

Pero eso nos habla solo del pasado. ¿Qué hay del futuro de la civilización humana? En 1993, Richard Gott, de la Universidad de Princeton, provocó un debate al publicar un artículo en la importante revista científica *Nature* en el que utilizaba este

razonamiento estadístico para calcular la vida total de nuestra especie. Gott descubrió que, en un nivel de confianza del 95%, el *Homo sapiens* probablemente haya vivido un total (incluyendo nuestra historia hasta la fecha) de entre 200.000 años y 8 millones de años; el extremo más bajo de este rango significaría que nuestra extinción llegará más o menos mañana, e incluso el extremo más alto no es en modo alguno impresionante en una escala temporal astronómica.

La única suposición que Gott incluyó en este cálculo es que somos un ejemplo aleatorio de todos los observadores inteligentes que han existido. A esto lo denomina el «principio copernicano», con lo cual dice que no ocupamos un lugar especial en el universo. De hecho, Copérnico solo dijo que no ocupamos un lugar central en el universo, pero la ampliación de esta idea para decir que ocupamos un lugar poco especial es bastante habitual. De un modo un tanto menos grandilocuente, a veces se lo conoce como el «Principio de la Mediocridad Terrestre», la idea de que ocupamos un planeta corriente que orbita alrededor de una estrella corriente en una galaxia corriente.

Antes de exponer las consecuencias de esta suposición, Gott ilustra el poder de este planteamiento con dos ejemplos de su vida. La esencia del argumento es que si observamos algo al azar por primera vez, existe una posibilidad del 95% de que estemos viéndolo en el 95% medio de su vida. Solo un 2,5% del tiempo que podríamos estar viéndolo se encuentra cerca del principio de su vida, y solo un 2,5% hacia el final. Si sabemos la edad que tiene dicha cosa cuando

la vemos por primera vez, podemos utilizar esas cifras para establecer límites de su vida futura; con unos cálculos de probabilidad estándar similares a los que intervienen en la «paradoja», la vida futura de lo que observamos debería estar entre 1/39 veces y 39 veces su vida pasada, a un nivel de confianza del 95%.

En 1969, durante un viaje a Europa, Gott vio Stonehenge y el Muro de Berlín por primera vez. Stonehenge tiene una antigüedad de unos 3.700 años, y en 1969, el Muro de Berlín tenía 8 años. Este tipo de cálculo implicaría una vida futura para Stonehenge de al menos cien años, y para el Muro de Berlín (en 1969) de solo unos doscientos años. El Muro cayó en 1989, pero Stonehenge sigue ahí, en línea con esos cálculos.

Aplicando la misma lógica a la humanidad, Gott parte del cálculo, basado en fósiles, de que el hombre moderno, el *Homo sapiens sapiens*, ha vivido unos 200.000 años. Esto indica que probablemente viviremos al menos otros 5.000 años, pero no más de 8 millones de años. Gott señala que la vida media de una especie de mamífero es de unos 2 millones de años, y que nuestro ancestro inmediato, el *Homo erectus*, vivió algo menos de 1,5 millones de años, así que su cálculo coincide bastante con lo que sabemos por los registros de fósiles. Puede que nuestros descendientes se conviertan en algo distinto a nosotros al igual que ha ocurrido con nosotros y el *erectus*, y que todavía posean una civilización tecnológica; pero otros cálculos de Gott dibujan una panorámica mucho más lóbrega.

El mismo tipo de argumento estadístico es aplicable al número de gente viva en la Tierra a día de hoy en comparación con el número que ya ha nacido y el que todavía no lo ha hecho. En este caso, somos un «observador» aleatorio elegido entre la población de toda la gente que ha sido o será por el simple hecho de nacer. Las ecuaciones de probabilidad nos dicen que un 50% de esos «observadores» nacen en un momento en que la población es al menos la mitad de su valor máximo. La población actual de la Tierra es de casi 7.000 millones de personas, y la capacidad estimada del planeta es de unas 12.000 millones, por tanto, ciñéndonos a esto, no es sorprendente que estemos vivos. Es un ejemplo del hecho de que somos un observador inteligente y aleatorio elegido por casualidad de entre todos los observadores inteligentes del pasado, el presente y el futuro. En 1993, utilizando una versión del cálculo aplicado anteriormente a las escalas de tiempo, Gott estimó que el número de personas que todavía están por nacer era al menos de 1800 millones, y calculó que este total se alcanzaría en la primera década del siglo XX. Aplicando el mismo cálculo hoy, al menos otros 2000 millones de personas han de nacer aún, y esto llevará aproximadamente otros diez años. Si Gott está en lo cierto, tarde o temprano (y probablemente será temprano) habrá un estallido de población y un desmoronamiento de la civilización. Puede que eso no sea aplicable con tanta fiabilidad a otras civilizaciones, pero Gott tiene malas noticias para los partidarios de la SETI.

Los defensores de la SETI todavía depositan gran parte de sus esperanzas en la radiocomunicación. En 2004, uno de sus

partidarios más destacados, Paul Allen, el multimillonario de Microsoft, aportó otros 13 500 millones de dólares, además de donaciones anteriores que ascendían a 11 500 millones, para la construcción del «Allen Array», un radiotelescopio especial para la SETI. Pero puede que haya malgastado su dinero (aunque, por suerte, el Allen Array puede utilizarse también para la astronomía convencional). Nuestra civilización solo ha utilizado la radio durante unos 120 años, y el cálculo de probabilidad dice que nuestra vida futura como una civilización radiotransmisora probablemente oscilará entre cinco años y cinco mil. Esto no implica necesariamente la extinción de la civilización; nuestros descendientes podrían desarrollar algo superior a la radiocomunicación, al igual que nosotros ya no empleamos las señales de humo. Pero sí indica una grave limitación en nuestras posibilidades de establecer contacto con extraterrestres.

Suponiendo que somos un ejemplo típico de civilización radiotransmisora, y aplicando este número a su versión de la ecuación de Drake, Gott calcula que el número de civilizaciones radiotransmisoras en la galaxia no supera las 121. La posibilidad de que una de ellas esté dentro de nuestro alcance es tan pequeña que haría fútil cualquier proyecto de SETI por radio, si los cálculos de Gott son correctos. Puede ser fútil en cualquier caso, ya que el fallo más probable en este argumento es el principio copernicano en sí. Tal vez no seamos observadores típicos, después de todo. Esa es la resolución más probable de la «paradoja» extraterrestre, formulada claramente por el físico Enrico Fermi y que ahora lleva su nombre,

aunque en realidad no fue la primera persona que reflexionó sobre ella.

§. Panespermia y la Paradoja de Fermi

Fermi fue uno de los físicos más importantes del siglo XX. Entre sus numerosos logros, predijo la existencia de la partícula conocida como neutrino, y recibió el Premio Nobel en 1938 por su trabajo con la radioactividad y las reacciones nucleares. Con la guerra acechando en Europa, en lugar de regresar a la Italia fascista, la familia Fermi fue directa de la ceremonia de los Nobel en Estocolmo a Estados Unidos, donde Fermi se convirtió en líder de un grupo de la Universidad de Chicago que construyó el primer reactor nuclear, conocido por aquel entonces como una «pila atómica». La pila entró «en estado crítico» a las 14.20 del 2 de diciembre de 1942.

Fermi tenía una gran habilidad para ver el meollo de un problema y expresar ideas con un lenguaje sencillo. Era un maestro en el arte de realizar cálculos aproximados —denominados cálculos de orden de magnitud— de la solución a problemas complicados, y esto fue lo que lo condujo a la paradoja de Fermi. Se hizo tan famoso a raíz de ella que a menudo se conoce este tipo de rompecabezas como «preguntas de Fermi». Un ejemplo sencillo de una pregunta de Fermi es: ¿Cuántas barras de azúcar de cebada caben en una jarra de un litro? El objetivo no es obtener una respuesta precisa, sino lanzar una hipótesis fundamentada. Una barrita es más o menos cilíndrica, con unos 2 cm de longitud y 1,5 cm de diámetro (0,75 cm de radio). El volumen de ese cilindro es π multiplicado por el

cuadrado del radio multiplicado por la longitud, que son unos $25/7$ cm cúbicos, si utilizamos la aproximación $\pi = 22/7$. Pero las barras no encajan bien en la jarra, así que podemos aventurar que el 20% del volumen es aire. Un litro son 1000 cm cúbicos, de modo que las barras en realidad ocupan 800 cm cúbicos, y el número de barras necesarias es 800 dividido por $25/7$, que da unas 220 (son exactamente 224, pero sería absurdo citar la «respuesta» con tanta precisión). Es esta clase de cálculo lo que los astrónomos utilizan para estimar cosas como el número de estrellas en una galaxia sin contarlas todas, y que Fermi utilizó para idear su famoso rompecabezas.

Aunque Fermi falleció en 1954 cuando tenía solo 53 años, sin dejar una crónica de cómo concibió esta paradoja, los detalles exactos de la historia fueron relatados por el físico Eric Jones, basándose en entrevistas con contemporáneos de Fermi, en la edición de agosto de 1985 de la revista *Physics Today*. Ocurrió en verano de 1950, cuando Fermi se encontraba en el laboratorio de Los Álamos en el que se había desarrollado la primera bomba nuclear unos años antes. En aquellos tiempos, el interés ciudadano en los ovnis estaba en su apogeo, debido a los avistamientos de aviones secretos durante el periodo de posguerra. También se produjeron una serie de robos de cubos de basura en las calles de Nueva York, y *The New Yorker* acababa de publicar una caricatura que afirmaba que podían haber sido sustraídas por extraterrestres. Fermi y sus compañeros se rieron de la tira cómica cuando iban a comer, y esto los llevó a un debate sobre la (im)posibilidad de viajar más rápido que la luz.

Durante el almuerzo, la conversación derivó hacia otras cuestiones. De repente, Fermi preguntó en voz alta: «¿Dónde están todos?». Sus colegas se dieron cuenta de que hacía referencia a inteligencias extraterrestres, y puesto que era Fermi quien formulaba la pregunta, se la tomaron en serio. El físico pronto realizó un cálculo de orden de magnitud que implicaba que aunque estuviesen limitados a viajar por debajo de la velocidad de la luz, los alienígenas deberían haber conquistado la galaxia hacía mucho tiempo y que la Tierra debería haber sido visitada en numerosas ocasiones. El resumen más adecuado de la paradoja de Fermi está contenido en la pregunta: «Si están allí, ¿por qué no están aquí?». En otras palabras, si existen inteligencias extraterrestres, ¿por qué no nos han visitado?

Nadie prestó demasiada atención a la incógnita, excepto como un tema de conversación a la hora del café, hasta 1975. Entonces, como dos autobuses que llegan a la vez, aparecieron dos artículos científicos que estimularon un debate mucho más amplio. David Viewing reformulaba el rompecabezas en *Journal of the British Interplanetary Society*, dando total credibilidad a Fermi. Ese mismo año, Michael Hart publicó un artículo en *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* en el que expresaba el interrogante con ciertas variaciones: ¿Por qué a día de hoy no hay visitantes inteligentes de otros mundos en la Tierra? Sin embargo, a diferencia de Viewing, Hart ofrecía cuatro posibles categorías para explicar el rompecabezas:

1. Puede que sea físicamente imposible llegar desde allí hasta aquí.
2. Están allí, pero no desean contactar con nosotros.
3. Están allí, pero todavía no han tenido tiempo de llegar hasta nosotros.
4. Han estado aquí, pero no han dejado rastro y ahora se han marchado.

Existe otra posibilidad, que en esencia es una variación de la cuarta categoría de Hart: quizá nosotros seamos los alienígenas. Esta es otra manera de ver la idea de la panespermia mencionada antes. Y aunque no afecta al argumento principal de este libro, no solo es fascinante en sí misma, sino que ofrece una potente reflexión sobre lo fácil que es que la vida se propague por la Vía Láctea teniendo en cuenta el enorme lapso de tiempo disponible.

Panespermia significa literalmente «vida en todas partes», y la especulación sobre la posibilidad de una vida omnipresente se remonta a tiempos ancestrales. Pero podríamos argüir que la ciencia de la panespermia empezó con ciertos comentarios vertidos por William Thomson, más tarde lord Kelvin, en su discurso presidencial ofrecido en la reunión de la *British Association for the Advancement of Science* en 1871. Thomson siguió el trabajo realizado en la década de 1860 por Louis Pasteur, que había demostrado por fin que los seres vivos no nacen espontáneamente de seres inertes, que los gusanos, por ejemplo, no son el producto de la carne putrefacta, sino que provienen de huevos que han

puesto las moscas. Thomson aseguró que toda forma de vida proviene de la vida, que todos los seres vivos tienen antepasados. Como señalaba Thomson, «la materia muerta no puede cobrar vida sin verse influida por otra materia antes viva. Esto me parece una enseñanza científica tan cierta como la ley de la gravedad». Ahora diríamos que, al menos en una ocasión y hace mucho tiempo, hubo un momento en que una molécula viva surgió de un ser inerte, pero eso no afecta a la ofensiva posterior del argumento de Thomson.

Thomson estableció una analogía con el modo en que la vida aparece en una isla volcánica formada recientemente. «No dudamos en suponer que la semilla ha llegado hasta ella a través del aire o flotando en una balsa», en lugar de ser generada espontáneamente a partir de rocas muertas. La Tierra, apostillaba, se encuentra en la misma situación:

Puesto que todos creemos firmemente que en este momento, y lo hemos creído desde tiempos inmemoriales, existen muchos mundos de vida aparte del nuestro, debemos considerar probable al máximo que existen innumerables piedras meteóricas portadoras de semillas que se mueven por el espacio. Si en este instante no existiera vida en la Tierra, una de esas piedras que cayera podría, por lo que denominamos ciegamente causas naturales, ocasionar que acabara cubierta de vegetación.

Pocos contemporáneos de Thomson se tomaron en serio la idea. Pero uno de ellos fue el sueco Svante Arrhenius, un químico que

obtuvo el Premio Nobel en 1903 por su trabajo en el ámbito de la electrólisis y que fue uno de los primeros investigadores del «efecto invernadero» de la atmósfera. Su nieto, Gustaf Arrhenius, fue, casualmente, una de las personas que estudiaron los indicios isotópicos de los primeros estadios de la vida en la Tierra.

En lugar de tomar en consideración las semillas que eran transportadas a través del espacio en el interior de los meteoritos, Svante Arrhenius especulaba que microorganismos como las bacterias podrían alcanzar las capas más altas de la atmósfera y escapar, para después salir despedidas por el espacio a causa de la presión de la radiación solar. Dichos microorganismos pueden permanecer inertes durante largos periodos de tiempo antes de revivir, tal vez el tiempo suficiente para cruzar el espacio interestelar y aterrizar en algún planeta parecido a la Tierra. Arrhenius calculaba que la duración de los viajes de esas semillas de la vida, partiendo desde la Tierra, sería de 20 días hasta Marte, 80 días hasta Júpiter y 9000 años hasta Alfa Centauro, la estrella más cercana al Sol. Y si podían viajar en una dirección, ¿por qué no en la otra, de modo que la Tierra hubiera sido sembrada por la vida microbiana del espacio?

La panespermia nunca ha sido una idea popular en astrobiología, pero desde las especulaciones de Thomson y Arrhenius, la gente la ha recuperado de vez en cuando en diferentes contextos, y fortalecido sus credenciales científicas sin plantear nunca un argumento del todo convincente. Una variación sobre el tema se hace eco de la idea original de Arrhenius, y la adapta para tomar en

consideración las condiciones con las que probablemente se encontraría la vida en su viaje por el espacio. Una estrella como el Sol produce una gran cantidad de radiación ultravioleta, que sería letal para los microorganismos que escaparan al espacio. Pero Jeff Secker, de la Washington State University, y sus compañeros Paul Wesson y James Lepock, de la Universidad de Waterloo, en Canadá, calcularon qué ocurriría si los microorganismos se encontraran encerrados en diminutas partículas de hielo o polvo. Esto no sería suficiente para protegerlos de la radiación de una estrella como el Sol. Pero en su vejez, una estrella se hincha para convertirse en un gigante rojo, que sería lo bastante luminoso como para propulsar las partículas en el espacio, pero no produce los rayos ultravioleta perjudiciales. Secker y sus colegas calculan que el viaje para esas partículas que transportan las semillas de la vida por el espacio rondaría los 20 años luz por millón de años. Puesto que existen docenas de estrellas a 20 años luz del Sol, esto indica que la vida podría trasladarse fácilmente de un sistema planetario al siguiente, y podría atravesar toda la galaxia, propagando la vida en otros lugares en unos pocos miles de millones de años.

Por supuesto, cuanto mejor sea la protección, más tiempo podrán sobrevivir los organismos. Jay Melosh, de la Universidad de Arizona, ha demostrado que los microorganismos podrían sobrevivir muchos millones de años en las profundidades de grandes fragmentos de roca. Esto es interesante en el contexto de nuestro Sistema Solar, porque los fuertes impactos del espacio pueden propulsar esos fragmentos de roca desde la superficie de un planeta. De hecho, se

han identificado algunos meteoritos hallados en la Tierra, en parte gracias a pruebas de isótopos, provenientes de Marte. Uno de esos fragmentos de roca marciana, bautizado como ALH 84001, ha sido objeto de una intensa investigación desde que se afirmara que unas estructuras tubulares microscópicas detectadas en la roca parecen bacterias fosilizadas. Hay pocas pruebas que respalden esta afirmación. Pero lo que sí nos dice la presencia de meteoritos como ALH 84001 en la Tierra es que, si existiera vida en Marte, podría ser trasladada a la Tierra de este modo, tras pasar millones de años divagando por la zona interior del Sistema Solar tras el impacto en el que fue arrancada de la superficie de Marte. Es un poco más complicado que una forma de vida terráquea sea transportada de esta manera a Marte u otro lugar, ya que la fuerza gravitacional de nuestro planeta es más fuerte. Y, por desgracia, es prácticamente imposible que grandes fragmentos de roca salgan despedidos del Sistema Solar para llevar las semillas de la vida a otros sistemas planetarios.

Sería mucho más fácil si las semillas de la vida se encaminaran de manera deliberada a otros planetas. Esta idea, conocida como panespermia dirigida, fue desarrollada por Francis Crick, codescubridor de la estructura del ADN, y Leslie Orgel, otro biólogo molecular. Desde luego sería fácil, utilizando una tecnología ligeramente más avanzada que la nuestra, enviar sondas llenas de algas azul verdoso, que han sido tan prósperas como formas de vida en la Tierra, hacia cualquier sistema planetario de aspecto interesante. Y sería una manera rápida de «colonizar» la galaxia, si

consideramos que las algas azul verdoso son representantes adecuados de la vida en la Tierra. Por tanto, ¿somos nosotros los colonizadores? ¿Llegaron a la Tierra nuestras células ancestrales primordiales como un regalo de otra civilización? ¿Están «ellos» aquí porque nosotros somos ellos? Técnicamente, desde luego es posible. Pero la gran pregunta es por qué haría algo así un ser inteligente. Ni siquiera Crick y Orgel han sido capaces de ofrecer una respuesta satisfactoria a ese interrogante, y en su libro *Life Itself* el primero reconoce que «como teoría [la panspermia dirigida] es prematura». Orgel tampoco se muestra dogmático. Según decía: «Mi opinión es que no hay forma de saber nada acerca de la posibilidad de vida en el cosmos. Podría estar por todas partes o podríamos estar solos».

Yo coincido con la conclusión de Crick, pero no he ignorado la idea de la panspermia dirigida, ya que plantea la hipótesis de que, por cualquier motivo, una civilización o civilizaciones alienígenas podrían decidir enviar sondas espaciales a visitar otros sistemas planetarios. Sin embargo, antes de desvelar esa resolución, es justo mencionar las otras «respuestas» que se han propuesto para la incógnita, aunque cabe mencionar que son poco plausibles.

La recopilación más detallada y accesible de «respuestas» propuestas a la paradoja de Fermi ha sido confeccionada por Stephen Webb, un físico de la Open University, en su libro *Where Is Everybody?* Si los pocos ejemplos para los que dispongo de espacio aquí avivan su apetito de tales especulaciones, ese es el lugar donde buscar más, aunque la rareza de algunas de las propuestas no hace sino reforzar mi argumento.

Por supuesto, mucha gente cree que los alienígenas están aquí, y que algunos de ellos incluso tienen la costumbre de abducir a gente en sus platillos volantes. No existen pruebas creíbles de esto y, si bien en algunos ámbitos el término objeto volante no identificado, u ovni, se ha convertido en sinónimo de «platillo volante», los aficionados al fenómeno no comprenden que porque algo sea no identificado no significa automáticamente que sea una nave espacial. Si un coche me adelanta demasiado rápido y no alcanzo a identificar la marca, en cierto sentido es un objeto no identificado en movimiento; pero eso no significa automáticamente que sea un prototipo secreto propulsado por cohetes. La hipótesis lógica es que, inspeccionándolo más de cerca, podría identificarlo como una marca conocida de coche. Por tanto, hay tantos ovnis que son identificados tras una inspección como fenómenos atmosféricos conocidos, globos meteorológicos, aviones, etcétera —o incluso (y no bromeo) como el planeta Venus—, que la explicación más sencilla para el pequeño porcentaje que sigue sin identificar es que también son causados por fenómenos naturales, pero no disponemos de información suficiente para determinar a qué categoría pertenecen, al igual que no poseo datos suficientes para determinar la marca del coche que circula a gran velocidad.

Una idea relacionada con la historia del platillo volante es la afirmación de que vivimos en un zoo cósmico, o en una especie de zona natural en la que se permite a criaturas primitivas como nosotros desarrollarse a su ritmo. Esto a menudo entraña la insinuación, explícita en muchas historias de ciencia-ficción, entre

ellas la franquicia de películas de *Star Trek*, de que una vez que alcancemos cierto nivel de destreza tecnológica (o quizá, una vez que crezcamos lo suficiente para dejar de pelearnos entre nosotros), seremos aceptados en una especie de club galáctico de civilizaciones avanzadas, aunque como un miembro principiante. Entre las numerosas objeciones a esta idea figura la siguiente: ¿Por qué no conquistó el club galáctico la Tierra durante los miles de millones de años en que solo estuvo ocupada por formas de vida unicelulares? ¿Nos descubrieron hace solo unos pocos millones de años, cuando los primates ya estaban en la senda de la inteligencia? ¿Y por qué no existe un solo indicio de su actividad entre las estrellas de la Vía Láctea?

En el otro extremo del club galáctico se encuentra la idea de que todas las civilizaciones alienígenas se han quedado en casa, porque no les interesan los viajes espaciales (una variación sobre el tema, al que aludía irónicamente antes, de que todo el mundo busca señales pero nadie transmite). Este argumento podría sostenerse si pensamos solo en una civilización alienígena. Pero si queremos pensar que lo que denominamos civilización es algo habitual en la galaxia, tendríamos que aceptar que ninguna de ellas desea investigar su entorno, porque resulta que, como explicaré más adelante, es muy sencillo dejar una huella en la Vía Láctea. Pronto lo haremos nosotros, si desmentimos los pesimistas pronósticos de Martin Rees y sobrevivimos al presente siglo.

La objeción más seria a la idea de que «si los alienígenas están allí, tendrían que estar aquí» es que el viaje interestelar es tedioso y

difícil, aunque el propósito de la reflexión de Fermi es que se dio cuenta, a partir de sencillos cálculos de orden de magnitud, que en la escala temporal de la civilización humana (por no hablar de la escala temporal de la vida en la Tierra) es relativamente rápido y, a cierto nivel, sencillo. Existen incluso ejemplos de la historia humana —hablando en términos estrictos, la prehistoria— que subrayan este argumento.

Lo difícil de viajar a las estrellas es hacerlo en el marco de la vida humana, y doblemente complicado hacerlo y regresar a casa. No deberíamos ignorar la posibilidad de que otras formas de vida puedan gozar de una longevidad mucho mayor que la nuestra y que pudieran encontrar un viaje de varios centenares de años igual de tedioso que nos parece a nosotros un vuelo transatlántico, ni la posibilidad de una civilización tan avanzada con respecto a la nuestra que pueda aprovechar los atajos del espacio-tiempo que plantea la teoría general de la relatividad o la energía de los campos cuánticos del espacio vacío para alimentar sus naves. Cualquiera de esas posibilidades hace más factible que los alienígenas colonicen la galaxia. Pero podrían llevarlo a cabo unos seres como nosotros con una tecnología ligeramente más avanzada. Posibles sistemas de propulsión incluyen cohetes que combinen la energía nuclear y eléctrica, cohetes de fusión, el estatorreactor interestelar y (mi favorito), la «navegación estelar» con la ayuda de potentes láseres instalados en el planeta. En su libro *Mirror Matter*, el físico Robert Forward y Joel Davies (el primero es uno de los principales defensores de la navegación estelar) ofrecen una visión clara y un

tanto desfasada de las posibilidades, así que no ahondaré en ellos aquí. Lo que importa es que, sean cuales sean nuestros medios de propulsión, si vamos lo bastante lentos podemos llegar a las estrellas más cercanas sin demasiado esfuerzo. Y si se establecen colonias en planetas que orbiten esas estrellas, pueden llegar a las estrellas próximas a ellas pero más distanciadas de nosotros sin gran empeño.

La clave para colonizar la galaxia es no regresar. El ejemplo arquetípico de la prehistoria humana es cómo los pueblos de la Polinesia se extendieron de una isla a otra por todo el Pacífico y acabaron llegando a Nueva Zelanda e incluso a la remota Isla de Pascua, situada a unos 1800 kilómetros de la tierra más cercana. No visitaron nuevas islas y volvieron; se instalaron en ellas y las utilizaron a su vez como bases desde las cuales enviar a gente que se asentó en otras islas lejanas. Nada de esto estaba planificado. No forma parte de un gran plan para colonizar el Pacífico. Sencillamente ocurrió debido a las presiones demográficas o por el anhelo básico de descubrir qué había más allá del horizonte.

Asimismo, aunque nuestros antepasados se desarrollaron al este de África, sus descendientes se dispersaron a pie por todo el mundo. Incluso cruzaron el puente terrestre que media entre lo que ahora es Siberia y Alaska, y llegaron hasta Sudamérica. Como los viajes polinesios, nada de esto estaba planeado. Sencillamente sucedió que en cada generación (o solo en algunas) ciertas personas se distanciaron un poco de sus vecinos en busca de comida y agua, o solo para ver qué había al otro lado de la siguiente colina o alejarse

de la multitud. El proceso completo llevó unos 30.000 años. El radioastrónomo australiano Ronald Bracewell, de la Universidad de Stanford, lo resumía señalando que los humanos tardaron menos en llegar andando desde África hasta Sudamérica de lo que habría tardado una inteligencia humana en desarrollarse de forma independiente en Sudamérica. La última etapa del viaje, desde el Canadá actual hasta la Patagonia, abarca unos 13.000 kilómetros, una distancia que pudo cubrirse en solo mil años a una velocidad de tan solo 13 km anuales. La conclusión de Bracewell es que es mucho más probable que la vida inteligente se propagara por toda la galaxia desde el primer «planeta inteligente» que una evolución independiente repetida varias o muchas veces en varios o muchos planetas distintos.

La conclusión de Bracewell se inspira en un cálculo realizado por Michael Hart y publicado en su artículo aparecido en *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* en 1975. Hart utilizó el ejemplo de la posible colonización futura de la galaxia desde la Tierra. Realizando suposiciones razonables sobre posibles sistemas de propulsión que permiten las leyes de la física, Hart afirma que «al final enviaremos expediciones a las 100 estrellas más cercanas», que se encuentran a unos 20 años luz del Sol. «Cada una de esas colonias tiene potencial para lanzar sus propias expediciones, y sus colonias a su vez pueden colonizar, y así sucesivamente». Sin pausa entre los viajes, «la frontera de la exploración espacial se encontraría en la superficie de una esfera cuyo radio se incrementaría a una velocidad de 0,10 c. A esa velocidad, gran parte de nuestra galaxia

sería recorrida en 650.000 años». Por supuesto, la suposición de que no haya pausa entre cada viaje es excesivamente optimista, pero aunque el lapso de tiempo entre ellos sea del mismo orden de magnitud que el de un viaje, el tiempo necesario para colonizar la galaxia solo se duplicaría hasta alcanzar los 1,3 millones de años. Esto no supera por mucho una ochomilésima parte de la edad de la galaxia. Cálculos más pesimistas del tiempo necesario, basado en cuánto tardan las colonias en establecerse, oscilan entre unos pocos millones de años y 500 millones, pero incluso eso es muy poco en comparación con la edad de la galaxia. Y, como señalaba Fermi, las cifras exactas no importan, solo el orden de magnitud. Si nosotros pudiéramos hacerlo, ellos también podrían. Entonces, ¿por qué no están aquí?

El argumento cobra todavía más fuerza cuando nos damos cuenta de que ni siquiera es necesario someter a las criaturas vivas al aburrimiento y los peligros del viaje interestelar.

§. Buscar una respuesta

El argumento más poderoso para la no existencia de otras civilizaciones tecnológicas en nuestra galaxia nace del trabajo de dos genios matemáticos que realizaron grandes aportaciones a la ciencia informática y a la victoria aliada en la Segunda Guerra Mundial. Alan Turing es recordado como un criptógrafo que fue el principal miembro del equipo de Bletchley Park, en Buckinghamshire, que desentrañó los códigos alemanes durante esa guerra. Pero ya en 1936 había escrito un artículo científico,

«Sobre los números computables», que estipulaba los principios fundamentales de la computación de las máquinas. Turing demostró que en principio es posible construir una máquina, ahora conocida como una máquina universal de Turing, que podría resolver cualquier problema que pudiera expresarse en el lenguaje maquina apropiado. Para una generación que se ha criado con los ordenadores personales, esto es una obviedad, pero fue la prueba de que podían fabricarse tales máquinas lo que situó a la ciencia y la tecnología en la senda del ordenador moderno. En palabras de Turing, la máquina universal «puede desempeñar el trabajo de cualquier máquina especializada, es decir, llevar a cabo cualquier operación informática» si se instala el programa adecuado. El ordenador construido en Bletchley Park como parte de la campaña para descifrar los códigos fue un ejemplo de una máquina específica, diseñada para realizar un único trabajo. Pero pronto se desarrolló el primer ordenador con fines generales, gracias a la ayuda del húngaro John von Neumann, quien, entre otras muchas cosas, trabajó en el Manhattan Project, que creó la primera bomba nuclear.

El interés de Von Neumann en la idea de un ordenador que pudiera resolver cualquier problema lo llevó a pensar en la naturaleza de la inteligencia y la vida. En cierto sentido, los seres inteligentes son máquinas universales de Turing, puesto que pueden resolver muchas clases de problemas diferentes, pero tienen la capacidad adicional de reproducirse. ¿Era posible, en principio, que existieran máquinas de Turing autorreproductoras en un sentido no biológico?

Von Neumann demostró que, en efecto, lo es. El proceso implica solo unos cuantos pasos sencillos. Primero, el programa informático instalado en la memoria ordena a la máquina que realice una copia del mismo y la almacene en una especie de banco de memoria (hoy en día, podríamos imaginarlo como una especie de disco duro externo). Entonces, el programa indica a la máquina que realice una copia de sí misma, con una memoria en blanco. Por último, le dice que traslade la copia del programa desde el dispositivo de almacenamiento hasta la nueva máquina. Von Neumann demostró, ya en 1948, que las células vivas deben de seguir exactamente los mismos pasos cuando se reproducen, y ahora lo entendemos al hablar de ácidos nucleicos que representan el «programa» y proteínas que representan la «maquinaria» de la célula. En primer lugar se copia el ADN. Entonces, cuando la célula se divide en dos, la copia del ADN se desplaza a la nueva célula.

En la actualidad, un autómatas no biológico y autorreproductor es conocido a menudo como «máquina de Von Neumann». Ni Turing ni Von Neumann vivieron para presenciar el desarrollo de estas ideas. Turing tenía solo 41 años cuando se suicidó en 1954 tras años de acoso por parte de las autoridades a causa de su homosexualidad; Von Neumann falleció de cáncer en 1957 a la edad de 53 años. Fue Ronald Bracewell quien dijo que podían utilizarse sondas para explorar la Vía Láctea, y el estadounidense Frank Tipler quien presentó toda la fuerza de ese argumento, que demuestra lo rápido que podrían visitar las máquinas de Neumann todos los planetas interesantes de la galaxia.

El argumento clave es que una civilización tecnológica solo tiene que construir una o dos sondas para colonizar (por poderes) toda la Vía Láctea. Dicha sonda estaría programada para utilizar las materias primas que encontrara entre los asteroides y demás basura cósmica en un sistema planetario, además de la energía de la estrella madre, para construir copias de sí misma, y enviar dichas copias a explorar otros sistemas planetarios. Una o dos sondas enviadas desde la Tierra al Cinturón de Asteroides situado entre Marte y Júpiter podría explotar las materias primas para crear una flota de sondas idénticas que podrían partir a explorar estrellas cercanas, manteniendo contacto por radio. Cada vez que una de ellas llegara a un nuevo sistema planetario, además de documentar sus hallazgos, se dispondría a construir copias de sí misma y repetir el proceso. Realizando la modesta suposición de que las sondas podrían viajar a una cuadragésima parte de la velocidad de la luz y que estuvieran programadas para buscar estrellas con planetas, transcurrirían menos de 10 millones de años (en una galaxia de 10 000 millones de años de edad) desde la construcción de la primera sonda para visitar todos los planetas interesantes de la galaxia. Y el único coste es la construcción de una sonda inicial (o, a lo sumo, unas cuantas copias de seguridad).

Incluso con nuestra tecnología actual, podríamos llevar una sonda de una envergadura decente a la estrella más cercana. Sería preciso que dicha sonda volara cerca de Júpiter, aprovechando la gravedad del planeta como tirachinas para acelerarla y mandarla más allá del Sol, donde su gravedad le daría otro empujón, expulsándola del

Sistema Solar a un ritmo que rondaría el 0,02% de la velocidad de la luz. Cuando la sonda llegara a la estrella, podría aprovechar su gravedad y sus planetas para ralentizarse. La nave tardaría varios miles de años en llegar a su objetivo, pero si todavía existiera una civilización en su planeta y alguien estuviera interesado, podría ser programada por radio para construir no solo una réplica (o réplicas) de sí misma, sino una versión mejorada y más rápida (suponiendo que la tecnología en nuestro planeta hubiese avanzado en los milenios transcurridos desde su lanzamiento). Cualquier noticia interesante podría tardar miles de años en regresar desde la primera sonda o sondas; pero a medida que se reprodujeran y se propagaran cada vez más rápido a través de la galaxia, las nuevas sobre diferentes sistemas planetarios podrían inundarnos varias veces al año.

Esto está tan al alcance de nuestra capacidad tecnológica actual que queda bastante claro que en cuestión de un par de décadas a lo sumo (a menos que la civilización desaparezca) nosotros podremos iniciar este proceso. Y por «nosotros» no me refiero necesariamente al poder de organismos patrocinados por el Gobierno como la NASA. Individuos como Paul Allen ya pagan para que los radiotelescopios busquen extraterrestres; los Paul Allen de la próxima generación bien podrían ser capaces de costear la exploración (o al menos iniciarla) de todos los planetas de la galaxia. Ese individuo podría esperar recibir noticias de los sistemas planetarios más cercanos a lo largo de su vida, en lugar de preocuparse demasiado por lo que ocurra dentro de millones de años. Pero, dado que literalmente no

cuesta más explorar toda la galaxia que el sistema planetario más próximo, ¿quién podría resistirse a ir a por todas?

Es por este motivo que la posibilidad de construir sondas de Von Neumann es un argumento tan poderoso para explicar que estamos solos en la Vía Láctea. Todos los argumentos que afirman que «ellos» están ahí fuera pero que, por el motivo que sea, evitan contactar con nosotros requieren que todas las civilizaciones tecnológicas estén trabajando juntas para mantener en secreto su presencia. Pero no se trata solo de que únicamente necesitemos que una civilización rompa filas y envíe unas cuantas sondas a la galaxia. Lo único que se necesita es que un individuo envíe una sonda y todos los planetas interesantes serán visitados en unos cuantos millones de años.

Fermi preguntaba: «¿Si están allí, por qué no están aquí?». La solución al interrogante es que no están allí. Pero eso plantea una pregunta todavía más importante. No si estamos solos, sino por qué lo estamos. Si no están allí, ¿por qué estamos nosotros aquí? ¿Qué tiene de especial nuestra ubicación en el universo, tanto en el espacio como en el tiempo, que ha permitido el desarrollo de la única civilización tecnológica de la galaxia? ¿Por qué la Tierra es el único planeta inteligente? Ese es el tema del resto de este libro, el motivo por el que estamos aquí para formular esas preguntas.

Capítulo 2

¿Por qué es tan especial nuestro lugar en la Vía Láctea?

Contenido:

- §. Crear galaxias*
- §. Crear metales*
- §. Mezclar metales en la vía láctea*
- §. Nuestro lugar en la Vía Láctea*
- §. La zona galáctica habitable*
- §. Cometas catastróficos*

¿Por qué existe vida inteligente en la Vía Láctea? Nuestra presencia está íntimamente relacionada con la estructura de la Vía Láctea y con la localización del Sol dentro de la misma. Aunque no me interesa aquí la posible existencia de vida en otras galaxias, comprender aquella en la que vivimos, la Vía Láctea, depende de si entendemos cómo se forman las galaxias en general y cómo cambian (evolucionan) con el paso del tiempo. Los astrónomos comprenden bien al menos los rasgos fundamentales de todo esto, gracias a que los telescopios funcionan como máquinas del tiempo. Si un objeto, pongamos por caso, se encuentra a cien años luz de distancia, eso significa que la luz tarda cien años en viajar desde ese objeto hasta nosotros, de modo que lo vemos hoy como era hace un siglo, cuando la luz emprendió su viaje. Esto se conoce como el «tiempo regresivo». Algunos telescopios astronómicos son tan sensibles que pueden ver galaxias tan lejanas que la luz las

abandonó justo después del Big Bang del universo, cuyo nacimiento tuvo lugar hace unos 13.000 millones de años. Por tanto, podemos ver jóvenes galaxias poco después de su formación. Y, por supuesto, podemos ver galaxias en estados posteriores de su evolución a distancias menores. No podemos apreciar la transformación de cada galaxia con el paso del tiempo, pero sí en todas sus fases de desarrollo, y utilizar esa información, sumada a nuestra comprensión de las leyes de la física y a las simulaciones por ordenador, para averiguar cómo la Vía Láctea llegó a ser como es hoy. De igual modo, los biólogos no tienen que observar el crecimiento de un solo roble a partir de una bellota para entender cómo llegan a ser como son esos árboles; pueden buscar robles en todas sus fases de desarrollo en un bosque y discernir su ciclo vital a partir de esas observaciones.

La materia oscura, revelada hoy por su influencia gravitacional en las estrellas y las galaxias, desempeñó un papel fundamental en la formación de galaxias cuando el universo era joven. Esta es una forma de materia distinta de los átomos y las moléculas de los cuales estamos hechos, y solo es revelada por su influencia gravitacional. Investigar la naturaleza de la materia oscura es una gran preocupación para los astrónomos de hoy en día, pero en el contexto actual, lo único que importa es que está allí, y que sin ella, galaxias como la Vía Láctea no podrían existir. Los grupos de materia oscura ejercían una atracción gravitacional que atraía corrientes de materia atómica, como el agua que fluye en una serie de baches de una carretera sin pavimentar. Estas corrientes de

materia atómica consistían solo de hidrógeno y helio producidos en el Big Bang, sin ninguno de los elementos más pesados tan vitales para nuestra existencia. El resultado fueron enormes nubes de gas, que empezaron a desmoronarse bajo su propio peso, no solo por la influencia de la materia oscura, y a calentarse al hacerlo, igual que el aire de una mancha de bicicleta se calienta al recibir presión. Las nubes tienen que dejar de disiparse cuando la atracción hacia el interior de la gravedad se equilibra con la presión del gas caliente, y en el caso de las nubes compuestas solo de una mezcla de hidrógeno y helio, esto ocurre cuando las nubes todavía son muy grandes, ya que les cuesta irradiar energía al espacio. Cuando las estrellas se forman a día de hoy, lo hacen a partir de nubes mucho más pequeñas, porque la presencia de elementos más pesados, como el carbono, permite que el calor se irradie de manera más eficiente y que las nubes encojan. Pero las simulaciones demuestran que las primeras estrellas que se formaron después del Big Bang tenían una masa cientos de veces más grande que la del Sol y unas temperaturas superficiales de unos 10.000 °K, lo cual producía un brillo de radiación que todavía puede detectarse en la actualidad utilizando telescopios infrarrojos desde el espacio.

Una estrella sigue brillando por las reacciones nucleares que se producen en su núcleo, que convierten los elementos de luz en otros más pesados y liberan energía en el proceso. Cuanto más pesada es la estrella, más furiosamente tiene que quemar su «combustible» nuclear para sustentarse, así que las estrellas pesadas viven poco. Al cabo de unos 250 millones de años del Big Bang, las primeras

estrellas habrían consumido todo su combustible y estallado, dispersando las capas exteriores de su material, incluidos algunos de esos elementos más pesados, a través de las cercanas nubes de gas. Las ondas expansivas de las explosiones habrían desencadenado la destrucción de más nubes, pero ahora las nubes en proceso de disgregación podían menguar más que sus predecesoras debido a la presencia de esos elementos pesados que permitían que escapara más radiación. Al menguar, las nubes se disgregaban en fragmentos más pequeños, y crearon las primeras estrellas similares a las que vemos hoy en la Vía Láctea. De hecho, algunas estrellas que vemos en nuestra galaxia podrían tener su origen en esta primera fase de la formación de la galaxia. Se calcula que las estrellas más antiguas de nuestra galaxia, que contienen solo unos pocos elementos pesados, tienen más de 13.200 millones de años, lo cual significa que se formaron durante los 500 millones de años posteriores al Big Bang. Estrellas como esas, que contienen solo una pequeña proporción de elementos pesados (carentes de «metales», en el sentido astronómico del término), son conocidas, por razones históricas, como Población II.

Pero el entorno en que se formaron las estrellas de Población II ya era muy distinto de aquel en el que nacieron las primeras estrellas, bastante lejano a la presencia de los primeros metales. Cuando muere una estrella cuya masa es más o menos 250 veces mayor que la del Sol, aunque las capas externas queden destruidas en una gran explosión, buena parte del material se desmorona para crear un agujero negro con una masa más de cien veces superior a la del

Sol. Puesto que esas estrellas primordiales debieron de formarse en las concentraciones más densas de materia del universo en aquel momento, muchos de esos agujeros negros debían de estar juntos y se fusionaron para formar objetos todavía más grandes. Existen numerosas pruebas de que todas las galaxias como la nuestra, incluida la Vía Láctea, tienen enormes agujeros negros en el centro. Es imposible decir con certeza de dónde provienen, pero con toda probabilidad se formaron a partir de la fusión de otros agujeros negros tras la muerte de las primeras estrellas varios cientos de miles de años después del Big Bang.

§. Crear galaxias

No es fácil ver ningún objeto astronómico excepto los más brillantes a distancias correspondientes a un tiempo regresivo de unos 13 000 millones de años, pero las observaciones de esos cuerpos brillantes (conocidos como quásares) demuestran que existían agujeros negros con una masa al menos 1000 veces superior a la del Sol y rodeados de nubes de material atómico en las cuales podían formarse las estrellas antes de que el universo cumpliera su primer milenio de vida. Debía de haber numerosos objetos similares pero más pequeños, demasiado tenues para verlos a distancias tan grandes; las simulaciones demuestran que los agujeros negros formaron los núcleos a partir de los cuales crecieron las galaxias cuando las nubes de materia atómica se vieron atrapadas en la fuerza gravitacional de dichos agujeros. Las observaciones realizadas con el Telescopio Espacial Hubble han captado algunas de esas

primeras galaxias, más pequeñas que la Vía Láctea y con un tono muy azulado debido a la presencia de muchas estrellas calientes y jóvenes en ellas. Pero no imaginen que los agujeros negros llegaron primero y que las galaxias se formaron a su alrededor más tarde. El proceso es más concebible como una especie de coevolución, en la que los agujeros negros y las galaxias que los rodeaban crecieron juntos a partir de una única nube de material primordial. Tanto la masa del agujero negro como la de la galaxia que lo rodeaba dependen de cuánto material hubiese en la nube.

Los cálculos ponen de manifiesto que este proceso puede generar un cuerpo tan grande como la Vía Láctea en unos pocos miles de millones de años, siempre que el agujero negro central posea una masa al menos un millón de veces mayor que la del Sol. Las observaciones de la región central de la Vía Láctea demuestran que las estrellas situadas en el centro de nuestra galaxia orbitan muy rápidamente alrededor de algún objeto central no visto. La velocidad con la que se mueven nos indica que la masa de este objeto central que las tiene atrapadas sería más o menos tres millones de veces la del Sol, pero limitada a un radio de unos 7,7 millones de kilómetros, solo unas veinte veces la distancia entre la Tierra y la Luna. Solo puede ser un agujero negro. Todo encaja a la perfección. Pero en lo que respecta a la vida, aunque la presencia del agujero negro central fue esencial para el nacimiento de la galaxia, lo que importaba una vez que se formó dicha galaxia es lo que sucedía en sus regiones exteriores, muy alejadas del agujero negro.

Todo esto explica cómo se formó el bulbo de nuestra galaxia (un poco como la yema de un huevo frito) y cómo se formaron masas similares en otras. También explica el origen de los miembros más pequeños de una familia de una galaxia conocidos como elípticas, que son como el bulbo de una galaxia espiral pero sin el disco (o como la yema de un huevo frito sin la clara). Todas las galaxias primordiales, excepto unas pequeñas e irregulares colecciones de estrellas que llevan el poco imaginativo nombre de irregulares, parecen haberse desarrollado como masas elípticas, pero no todas ellas desarrollaron discos. Supuestamente, esto dependía de si había suficiente material cerca de allí que un disco pudiera capturar alrededor de la masa central.

Esto no sucedió de golpe. Al parecer, las galaxias elípticas como la Vía Láctea se formaron añadiendo diferentes retales a la masa central con el paso del tiempo. Existen pruebas directas de todo esto en el modo en que las estrellas se mueven alrededor del disco de nuestra galaxia. Los astrónomos han descubierto que, si bien la mayoría de las estrellas del disco se mueven juntas de manera regular, como un grupo de corredores en una pista, pueden elegir varios torrentes largos y estrechos de estrellas que son similares entre sí pero presentan una composición ligeramente distinta de las estrellas del fondo, y que se mueven en la misma dirección pero describiendo un ángulo con respecto a la mayoría de las estrellas del disco. Actualmente se conoce aproximadamente una docena de esas corrientes. La cantidad de material de una corriente va desde unos miles de masas solares a cien millones de veces la masa del

Sol, y su envergadura oscila entre 20.000 y un millón de años luz. Son los restos de pequeñas galaxias que se acercaron demasiado a la Vía Láctea y se vieron afectados por su fuerza gravitacional. Cuando se dispersen, esas estrellas se fundirán con el resto de la Vía Láctea y serán indistinguibles de sus vecinas. La conclusión es que la Vía Láctea alcanzó su tamaño actual a través de una especie de canibalismo cósmico, devorando a sus vecinas más pequeñas; los estudios sobre galaxias elípticas demuestran exactamente por qué hay estrellas con más de 13.000 millones de años de edad en una galaxia que nació hace tan solo unos 10.000 años: devoró a esas estrellas más longevas al crecer.

La Vía Láctea y galaxias similares ya existían 3.000 o 4.000 millones de años después del Big Bang, hace cosa de 10.000 millones de años. Aunque todavía estaban en desarrollo a consecuencia de este canibalismo cósmico (¡y siguen estándolo!), la característica forma del bulbo y el disco ya existían, con estrellas cada vez más ricas en metales, conocidas como Población I, formándose en el disco. Con el paso del tiempo, el gas del disco se enriquecía cada vez más con elementos pesados gracias a generaciones sucesivas de estrellas, así que cuando se formó el Sol hace unos 5.000 millones de años y la Vía Láctea tenía la mitad de su edad actual, había suficientes «metales» para crear planetas y, al menos en uno de ellos, personas. Este no es el final de la historia. Las galaxias elípticas gigantes, mucho más grandes que la Vía Láctea, al parecer se han formado a partir de fusiones entre galaxias de disco en las cuales la estructura de los discos ha quedado destruida. Este podría ser el destino de

nuestra galaxia, que sigue un rumbo de colisión con su vecina cercana, una galaxia conocida como M31, en dirección a la constelación Andrómeda. Pero esto no ocurrirá en varios miles de millones de años y no tiene influencia directa en el rompecabezas que constituye el porqué estamos aquí. Lo relevante es la historia de cómo las estrellas convirtieron el hidrógeno y el helio en elementos más pesados y los dispersaron por el espacio para incluirlos en la materia primera de futuras generaciones de estrellas y sistemas planetarios.

§. Crear metales

Incluso en una estrella como el Sol, nacida casi 10 000 millones de años después del Big Bang, solo hay unos pocos elementos pesados. En cuanto a su masa, el Sol está compuesto de un 71% de hidrógeno aproximadamente, algo más de un 27% de helio y menos de un 2% de todo lo demás junto. La estructura interna del Sol puede estudiarse analizando las ondas de su superficie, al igual que la estructura interna de la Tierra puede estudiarse analizando ondas sísmicas. Los astrónomos también pueden calcular cómo serán las condiciones en el núcleo del Sol gracias a las leyes de la física, el tamaño conocido del astro y su brillo. Combinar estos dos planteamientos nos dice que la mitad de la masa del Sol sufre la presión de la gravedad en un núcleo que se extiende solo un cuarto de la distancia entre el centro y la superficie y que ocupa solo un 1,5% del volumen del Sol.

En ese núcleo, los electrones están completamente desprovistos de sus átomos, dejando núcleos desnudos, y la mezcla resultante de núcleos y electrones queda reducida a una densidad 12 veces superior a la del plomo. La temperatura es de unos 15 millones de grados K en el centro del Sol, y desciende a unos 13 millones de grados K en la capa externa del núcleo. En estas condiciones extremas tiene lugar una serie de interacciones nucleares que convierten el hidrógeno en helio. Este proceso en múltiples pasos transforma cuatro núcleos de hidrógeno (también conocidos como protones) en un solo núcleo de helio (también conocido como una partícula alfa), que consiste en dos protones más dos neutrones. El argumento crucial es que, cada vez que esto ocurre, un 0,7% de la masa de los cuatro protones originales se libera como energía, lo cual coincide con la famosa ecuación de Einstein. Eso es lo que permite que el Sol siga brillando y el motivo por el cual se están realizando grandes esfuerzos por desarrollar reactores de fusión para imitar el proceso que tiene lugar en el centro del Sol para producir energía limpia en la Tierra.

Incluso con las condiciones que se dan en el centro del Sol, este proceso es bastante inusual. A la velocidad actual, llevaría unos 100.000 millones de años quemar todo el hidrógeno del núcleo del Sol de esta manera, aunque eso nunca ocurrirá debido a la acumulación de «ceniza» de helio en dicho núcleo. Pero hay tantos protones dentro del Sol que, aunque solo una pequeña proporción se transforma en núcleos de helio cada segundo, todavía se corresponde con 5 millones de toneladas de masa que se convierten

en energía y se irradian. Cada segundo, 700 millones de toneladas de hidrógeno se convierten en 695 millones de toneladas de helio en el núcleo del Sol. Este proceso ha tenido lugar durante unos 4500 millones de años, desde la formación del Sistema Solar, pero hasta la fecha solo ha consumido en torno a un 4% de la reserva de protones.

Se dice que una estrella como el Sol, que quema hidrógeno constantemente para convertirlo en helio, es miembro de la «Secuencia Principal» de estrellas. El tiempo que una estrella pueda permanecer en la Secuencia Principal depende de su masa. Las estrellas más pequeñas son más tenues y queman su combustible con mayor lentitud; las estrellas más grandes son más brillantes y queman su combustible con más rapidez. Esto es claramente relevante para explicar por qué estamos aquí, ya que la inteligencia ha tardado unos 4000 millones de años en desarrollarse en la Tierra, y eso no habría sucedido si el Sol se hubiera extinguido hace unos 2.000 millones de años. Pero el Sol se halla más o menos en medio de la Secuencia Principal y también a la mitad de su vida como estrella de dicha secuencia. Las simulaciones por ordenador y las comparaciones con otras estrellas nos indican que este proceso continuo de convertir hidrógeno en helio dentro del Sol puede prolongarse otros 4.000 o 5.000 millones de años. Después, la acumulación de helio conduce a una reorganización del núcleo de la estrella, que tendrá efectos profundos para el Sol y para la vida en la Tierra que describiré en el próximo capítulo.

Durante la siguiente fase de su vida, una estrella como el Sol «quema» helio para transformarlo en carbono y oxígeno. Para el Sol, este es el final de la historia, y cuando todo el combustible de helio es consumido, forma una bola de material más frío, una ceniza estelar con un tamaño similar al de la Tierra y conocida como enana blanca. Pero las estrellas más grandes pueden llevar más allá el proceso de la fusión nuclear, ya que la densidad y la temperatura del núcleo de una estrella son más grandes en dichos astros. Pueden liberar energía fusionando núcleos para crear elementos cada vez más pesados hasta llegar al hierro y el níquel. Por el camino, en los estadios posteriores de su vida, la estrella se hincha y escupe nubes de material al espacio, formando objetos espectacularmente bellos para la fotografía astronómica, pero, lo que es más importante, propagando por el espacio los elementos fabricados dentro de las estrellas, donde pueden ser reciclados y formar parte del material con el cual se forman nuevas estrellas y sistemas planetarios.

Pero las estrellas más grandes obran algo todavía más espectacular. Explotan, y al hacerlo logran que todos los elementos sean más pesados que el hierro.

Puede liberarse energía combinando núcleos en otros núcleos más pesados que van desde el hidrógeno hasta el hierro, aunque existe una especie de ley de retornos decrecientes, que significa que se libera más energía (por partícula involucrada) en el primer paso del proceso, de hidrógeno a helio, y cada vez menos en los pasos posteriores. El proceso se detiene en el hierro, ya que para crear

elementos más pesados que este fusionando núcleos hay que invertir energía. Para expulsar energía, en lugar de fusionar núcleos hay que escindirlos, es decir, una fisión. Esta es la base de los reactores nucleares de fisión, donde se propicia que núcleos inestables de elementos muy pesados como el uranio y el plutonio se dividan en elementos más ligeros, de modo que se libera energía. Esos elementos solo existen y se libera energía porque esta se ha invertido en su fabricación durante la explosión de una estrella (o estrellas) moribunda que comenzó con una masa al menos ocho o diez veces superior a la del Sol. Las explosiones se conocen como supernovas, y la energía procede de la gravedad.

En realidad existen dos clases de supernova, pero la primera, conocida como Tipo I, no fabrica elementos más pesados que el hierro. Aun así, son interesantes porque ofrecen una panorámica de lo que ocurre cuando muere una estrella gigante. El destino de una estrella como el Sol es convertirse en una enana blanca, un denso e inerte bulto de materia en el que todavía se da una distinción entre distintos tipos de material atómico, como el helio, el oxígeno y el carbono, si bien los vestigios atómicos están muy juntos. Pero un sencillo cálculo realizado originalmente por el astrofísico indio Subrahmanian Chandrasekhar en los años treinta demuestra que si esos vestigios estelares tienen una masa 1,4 veces superior a la del Sol, la gravedad la aplastará y alcanzará un estado todavía más compacto en el cual todos los núcleos atómicos están apiñados en una bola de neutrones con varios kilómetros de longitud.

Para situar esto en perspectiva, gran parte de la masa de un átomo, más del 99%, está contenida en un diminuto corazón central, conocido como núcleo, compuesto de protones y neutrones. La diferencia esencial entre ellos es que los protones tienen una carga eléctrica positiva y los neutrones carecen de carga. Este núcleo está rodeado de una nube de electrones con carga negativa (el número de electrones de la nube es el mismo que el número de protones del núcleo). En términos muy aproximados, el tamaño del núcleo comparado con el del átomo entero es como un grano de arena comparado con el Carnegie Hall. Ese es el motivo por el que los cambios en la estructura de una estrella asociados con las supernovas son tan espectaculares.

La masa crítica de una enana blanca es conocida como límite de Chandrasekhar. Una supernova de Tipo I se produce cuando una enana blanca con una masa cuyo límite está muy cerca pero justo por debajo del límite Chandrasekhar gana más materia del exterior. Este suceso es muy probable, ya que la mayoría de las estrellas son miembros de sistemas binarios (esta es una pista importante sobre el motivo por el que estamos aquí), y una enana blanca en órbita alrededor de otra estrella arrastrará materia de su compañera debido a su gran fuerza gravitacional.

Cuando la masa de la enana blanca llega al límite de Chandrasekhar, colapsa súbitamente, y pasa de tener el tamaño de la Tierra al de una montaña. Al hacerlo, una oleada de reacciones nucleares recorre el material de la estrella, convirtiendo el carbono y el oxígeno en hierro. Este proceso libera gran cantidad de energía, y

en torno a la mitad de la masa de la enana blanca original se convierte en hierro, con rastros de otros elementos como el azufre y el silicio, y es dispersada por el espacio a causa de la explosión. El hierro para fabricar el acero de nuestros cuchillos de cocina se creó de este modo. El material restante se convierte en una bola de neutrones sin ningún protón, ya que los electrones y los protones se agolpan para crear más neutrones: una estrella del tamaño de una montaña con la misma densidad que el núcleo de un átomo. Gran parte de la energía liberada en la explosión de una supernova de Tipo I proviene de la conversión del carbono y el oxígeno en hierro. Pero la mayoría de la energía liberada en la explosión de una supernova de Tipo II procede de la gravedad.

Las estrellas que inician su andadura con más de 8 o 10 masas solares de material no pueden perder suficiente materia durante su vida como para acabar con menos del límite de Chandrasekhar. Queman su material nuclear con mucha más rapidez que el Sol, ya que necesitan sostener un peso muy superior contra la fuerza de la gravedad, y llevan mucho más allá el proceso de consumo nuclear hasta llegar al hierro. Para una estrella con una masa entre 15 y 20 veces superior a la del Sol, la fase final de la quema nuclear será adentrarse en capas que rodean un núcleo interno con tanta masa como el Sol, más o menos del tamaño de la Tierra, y en su mayoría compuestas de hierro. El núcleo es como una enana blanca, pero con más de 10 masas solares de material sobre ella, sostenidas solo por las últimas fases de consumo nuclear. Entonces la estrella se queda sin combustible y la quema nuclear se detiene. El peso

completo de todo lo que está por encima del núcleo ejerce presión sobre el núcleo, que se destruye en un decisegundo y queda reducido al tamaño de una estrella de neutrones (o quizá un agujero negro), dejando un enorme agujero debajo de las 10 masas solares o más que formaban las capas externas de la estrella.

Es la liberación de energía gravitacional causada por la destrucción total del núcleo interno de hierro la que aporta la energía de una supernova. Cuando las capas exteriores empiezan a caer hacia dentro, son golpeadas por una explosión de energía y partículas tan potente que fabrica todos los elementos más pesados que el hierro e impele todo el material hacia el espacio, donde se mezcla con el material interestelar a partir del cual se formarán nuevas generaciones de estrellas y planetas. La energía total liberada por una única supernova de Tipo II es aproximadamente cien veces mayor que la cantidad de energía que liberará el Sol durante toda su vida; durante unas pocas semanas, una supernova de Tipo II brillará tanto como todas las estrellas de su galaxia madre juntas. La influencia de las supernovas es una de las razones más importantes por las que estamos aquí. Y esa influencia es muy distinta en muchas regiones de nuestra galaxia.

§. Mezclar metales en la vía láctea

Sin duda, la proporción de elementos pesados en una estrella —su «metalicidad»— aumenta a medida que las generaciones estelares se suceden. Puesto que los planetas como la Tierra están integrados por esos elementos pesados, la metalicidad de una estrella debería

servir de guía para las posibilidades de encontrar planetas parecidos a la Tierra en órbita alrededor de la estrella. La metalicidad de una estrella puede definirse de distintas maneras, pero la más habitual es calcularla conforme a la cantidad de hierro que contiene en relación con la cantidad de hidrógeno.

Por suerte, calcular la proporción de distintos elementos de una estrella es una de las tareas más sencillas de la astronomía. Cuando se calientan, los átomos de cualquier elemento en particular irradian luz en franjas muy estrechas de luz denominadas líneas espectrales. Estas se corresponden con longitudes de onda precisas de luz. El sodio, por ejemplo, es muy brillante en dos longitudes de onda de luz en la parte amarilla-naranja del espectro, motivo por el cual las farolas de sodio tienen ese color característico. El patrón de líneas de un espectro asociado con cada elemento es tan característico como un código de barras y puede utilizarse para identificar la presencia del elemento de manera inequívoca, comparando los patrones que vemos en la luz de las estrellas con los patrones producidos cuando diferentes sustancias se calientan en el laboratorio. De igual modo, si la luz blanca que contiene todos los colores del espectro se filtra a través de un gas que contiene diferentes tipos de átomo, cada tipología absorbe luz en las mismas longitudes de onda que irradia cuando está caliente, creando líneas oscuras igual de características en el espectro. En cualquier caso, cotejando la fuerza de diferentes líneas del espectro —por ejemplo, el hierro comparado con el hidrógeno—, no solo es posible determinar qué elementos están presentes, sino también averiguar

las proporciones de los diferentes elementos presentes sin acercarse en ningún momento a una estrella o una nube de gas en el espacio. Las metalicidades normalmente se calculan con respecto a la del Sol, comparando la proporción de hierro e hidrógeno en una estrella y en el primero. Esto es conveniente, y cuesta pensar en una alternativa adecuada, pero un tanto engañoso, ya que es fácil caer en la suposición inconsciente de que el Sol es una estrella totalmente corriente o típica. Como comentaré en el siguiente capítulo, esto no es necesariamente así. Pero en ocasiones, las suposiciones sencillas nacen de las observaciones. El sentido común nos dice que las estrellas que contienen más elementos pesados deberían ser más proclives a contar con una familia de planetas, y las observaciones demuestran que las estrellas que son «madres» de planetas gigantes en general presentan una metalicidad más elevada que la estrella media en la región más cercana de la Vía Láctea. En concreto, no se ha encontrado ningún planeta gigante en órbita alrededor de una estrella con una metalicidad inferior al 40% de la del Sol. Hasta que no observemos gran cantidad de planetas del tamaño de la Tierra, no podremos estar seguros de que una metalicidad estelar elevada está asociada con otras Tierras, pero todos los indicios apuntan a esto.

Sin embargo, demasiada metalicidad puede ser negativa. Se han encontrado planetas gigantes, incluso mayores que Júpiter, girando cerca de estrellas con la metalicidad más elevada, en órbitas tan próximas a sus estrellas madre o más que la órbita terráquea alrededor del Sol. Nadie puede decir si estos planetas enormes se

formaron en esas órbitas similares a la de la Tierra, o si se formaron en lugares más alejados de sus estrellas madre y han emigrado hacia el interior con el paso del tiempo. Pero, sea como fuere, la influencia gravitacional de esos planetas gigantes alteraría la órbita de cualquier planeta parecido a la Tierra en la región y los empujaría hacia fuera o hacia dentro, condenándolos a una muerte segura. Una metalicidad insuficiente o excesiva parece ser una mala noticia para la posibilidad de encontrar planetas y órbitas como la Tierra alrededor de otras estrellas.

Debido al modo en que la Vía Láctea mezcla material, el momento en que nace una estrella es tan importante como su ubicación para determinar su metalicidad. Me gusta establecer la analogía de una olla de sopa de verduras que se calienta sobre un hornillo. Todos los que comen sopa añaden algo a la olla para que nunca esté vacía y vaya enriqueciéndose a medida que pasa el tiempo y se incorporan más verduras de distintas clases a la amalgama. La Tierra, junto con el resto de nuestro Sistema Solar, nació hace unos 4.500 millones de años, y entre sus muchas características importantes, nuestro planeta tiene un gran núcleo de hierro, que, como veremos más tarde, ha desempeñado un importante papel a la hora de mantener las condiciones adecuadas para la vida, sobre todo generando un campo magnético que nos protege de la radiación perjudicial del espacio. Los sistemas planetarios que se formaron hace más tiempo habrían tenido proporcionalmente menos hierro, así que no pudieron formarse exactamente como los planetas parecidos a la Tierra. Del mismo modo, los sistemas planetarios que

están formándose ahora, unos 4500 millones de años después de que se creara la Tierra, son proporcionalmente más ricos en hierro. (Todavía) no diré si esto es bueno o malo en lo que respecta a la vida, pero desde luego hace que esos planetas sean distintos de la Tierra. Es probable que algunos planetas también tengan proporcionalmente menos elementos radioactivos en su núcleo, y es el calor de la radioactividad lo que mantiene el núcleo de la Tierra fundido a día de hoy.

Todo esto nos indica que debemos tener en cuenta nuestro lugar en el tiempo en la Vía Láctea, además de nuestro lugar en el espacio, para entender por qué estamos aquí y por qué la galaxia todavía no ha sido conquistada por civilizaciones más avanzadas que la nuestra. Pero nuestro lugar en el espacio es muy importante. La mezcla de metales que es tan relevante para la existencia de planetas como la Tierra y formas de vida como la nuestra solo se da —literalmente— en una parte muy pequeña de la Vía Láctea.

La clasificación tradicional de las estrellas en «poblaciones» solo cuenta con dos categorías: viejas estrellas de Población II, que son pobres en metales, y jóvenes estrellas de Población I, que son ricas en metales. Pero estudios detallados más recientes demuestran que las estrellas de la Vía Láctea y otras galaxias elípticas pueden dividirse en cuatro categorías generales que resultan más útiles. Las estrellas con un rango de edad y composición química característicos aparecen en cuatro zonas diferentes de nuestra galaxia. La región exterior de la galaxia visible está compuesta de un halo apenas poblado de estrellas muy viejas, cuya edad duplica

como mínimo la del Sol. El halo exterior se formó al menos durante el proceso que gestó nuestra galaxia a partir de una nube de gas en fase de descomposición hace unos 10.000 millones de años, aunque la parte interior del halo contiene estrellas ligeramente más jóvenes y podría haberse formado un poco más tarde. Este halo esférico mide unos 300.000 años luz, pero contiene muy pocas estrellas. Si hubiera vida en algún planeta que orbite esas estrellas, habría tenido la oportunidad de 5.000 millones de años de evolución antes de que se formara la Tierra. Podría ser tan avanzado como nosotros cuando nuestros antepasados todavía eran bacterias unicelulares, una demostración aparentemente dramática de la paradoja de Fermi. Pero dado que muy pocas estrellas del halo presentan tan siquiera un 10% de la metalicidad del Sol, por no hablar del 40% que parece necesario para la formación de planetas, es extremadamente improbable que haya planetas parecidos a la Tierra o formas de vida como la nuestra ahí fuera.

En contraste con la escasez de estrellas en el halo, la concentración más densa de estrellas en nuestra galaxia se encuentra en el bulbo central alrededor del cual se ha desarrollado el disco. Es difícil estudiar con detalle las estrellas de dicho bulbo, ya que el polvo del disco de la Vía Láctea oscurece nuestra visión, pero los telescopios infrarrojos pueden penetrar más allá de ese velo. Al igual que las estrellas del halo, muchas estrellas del bulbo son viejas y deficientes en metales. Pero existe una amplia gama de metalicidades entre las estrellas del bulbo, y aunque muy pocas o ninguna son tan jóvenes como el Sol o presentan una metalicidad similar a la de este, a

primera vista esto convierte la región en una localización un poco más prometedora que el halo como un posible lugar donde haya vida. Por otro lado, las estrellas están tan próximas unas a otras en el bulbo y hay tanta actividad allí (incluidos estallidos relacionados con el agujero negro con una masa 3 millones de veces superior a la del Sol en el corazón de la Vía Láctea) que los niveles de radiación cósmica probablemente sean demasiado elevados como para que sobreviva algo. Las observaciones realizadas por un telescopio espacial denominado Integral han descubierto rayos-X energéticos que provienen de una nube de hidrógeno por lo demás inofensiva situada a 350 años luz del agujero negro que se halla en el centro de la Vía Láctea; la explicación más verosímil es que hace 350 años (visto desde la Tierra), el agujero negro produjo una explosión un millón de veces más potente que la que vemos hoy, y la radiación de dicha explosión llegó a la nube 350 años después, haciendo que emitiera una luz fluorescente. Por supuesto, todo esto ocurrió «en realidad» hace unos 27.000 años, ya que los rayos-X han tardado ese tiempo en recorrer la Vía Láctea y llegar a nuestros telescopios. De todos modos, sea como fuere, es una prueba directa de que el bulbo no es un buen lugar para la vida.

Eso nos deja el disco, que está integrado por hasta dos componentes. Hay un disco grueso, con unos 100.000 años luz de longitud y 4000 de grosor, que está compuesto por una población de viejas estrellas pobres en metales. Dentro de este disco grueso se aloja una capa mucho más delgada, un disco fino que también tiene 100 000 años luz de longitud pero no más de 1000 de grosor: este

representa tan solo un 0,5% del diámetro. Si el disco tuviese un metro de longitud, su grosor sería de solo 5 milímetros. Este disco tan delgado contiene polvo, gas, el Sol y estrellas jóvenes; es la única región de la galaxia en la que todavía se forman estrellas a día de hoy, y los metales se mezclan en un caldo cada vez más rico.

Es sencillo explicar las diferencias entre el disco delgado y el grueso. Cuando una nube rotativa de gas se desintegra, no tiene otra elección que formar un disco delgado. Los átomos y las moléculas de gas que caen en una dirección chocan con los átomos y las moléculas de gas que caen desde las otras direcciones, y en colisiones repetidas, los movimientos aleatorios son cancelados y todo acaba formando un disco. Pero las estrellas son diferentes. Es extremadamente improbable que los astros luminosos que atraviesan el disco choquen con otra estrella o tan siquiera que pasen cerca de ella. Por tanto, una estrella puede cruzar el disco antes de que la gravedad de toda la materia de este último la atraiga de nuevo para que vuelva a pasar por el plano central de la galaxia. Las estrellas pueden pasar repetidamente de un lado a otro de este modo, aunque la gravedad les impide alejarse demasiado del plano central. Por tanto, las viejas estrellas pobres en metales del disco grueso son estrellas que fueron capturadas por nuestra galaxia cuando devoró a homólogas más pequeñas. Sin embargo, el gas y el polvo que engulló en el mismo momento tuvo que asentarse en un disco muy delgado. Así pues, como las estrellas del halo, las estrellas del disco grueso son viejas, presentan una metalicidad baja

y es muy improbable que ofrezcan un hogar planetario para la vida. Lo único que queda es el disco delgado.

§. Nuestro lugar en la Vía Láctea

En los brazos espirales del disco de la galaxia se forman nuevas estrellas. En imágenes fotográficas corrientes, y especialmente en aquellas realizadas con luz azul, los brazos aparecen brillantes, y a primera vista parece que la mayoría de las estrellas de la galaxia estén concentradas en los brazos espirales. Pero en imágenes tomadas con luz roja, los brazos son mucho menos prominentes, y está claro que, si bien existe una concentración algo mayor de estrellas en los brazos, están repartidas de una manera más o menos equitativa alrededor del disco de una galaxia. La densidad de las estrellas decrece de manera bastante homogénea desde el centro del disco hasta su extremo. Los brazos espirales son brillantes porque contienen una elevada proporción de estrellas, y eso significa que contienen astros jóvenes.

Las estrellas más brillantes son mucho más grandes que el Sol y de color blanco-azul. Pero al ser tan enormes, su vida es corta y se extinguen en unos 10 millones de años. Las estrellas blancas azuladas que poseen brazos espirales deben de ser jóvenes, ya que nunca envejecen. No tienen tiempo para alejarse de sus lugares de nacimiento antes de morir, algunas de ellas en explosiones de supernova que enriquecen el caldo interestelar.

Las estrellas más pequeñas, que no son tan brillantes, nacen de las mismas nubes de gas y polvo que se descomponen para formar las

estrellas luminosas, pero continúan tranquilamente su recorrido por la galaxia mucho después de que las estrellas blancas-azules se hayan apagado. Nuestro Sol es tan solo un miembro tranquilo de la comunidad de la Vía Láctea. Orbitando a una distancia de unos 27.000 años luz del centro de la galaxia, a una velocidad de unos 250 km por segundo, y con un circuito que le lleva unos 225 millones de años, el Sol y su familia de planetas han completado unos veinte viajes alrededor de la galaxia desde que el Sistema Solar nació hace unos 4.500 millones de años. Una estrella gigante blanca-azul que se formara en el mismo lugar y en el mismo momento que el Sol habría completado solo un 5% del circuito de la Vía Láctea antes de explotar. En este momento nos encontramos cerca del margen interior (la zona interior de la curva) de una espiral conocida como Brazo de Orión, o simplemente como Brazo Local. Pero los brazos espirales no son características permanentes de una galaxia de disco como la Vía Láctea. Son concentraciones de gas y polvo en las que se forman estrellas, producidas por alteraciones dentro de la Vía Láctea o, en ocasiones, por un accidente llegado desde el exterior, como por ejemplo el tirón gravitacional de una galaxia cercana, o cuando la Vía Láctea devora a compañeras más pequeñas. Debido a la rotación de la galaxia, cualquier alteración de su estructura se propagará en un patrón espiral. Esto es como añadir un poco de nata o leche a una taza de café solo que ya ha sido removido. La mancha blanca pronto se extiende en una espiral debido a la rotación. Pero en cuanto se forma dicho patrón en espiral, la rotación constante disgrega la

espiral y la hace desaparecer. Ocurre exactamente lo mismo en una galaxia de disco tras sufrir una alteración. La alteración se propaga en un patrón en espiral, que luego se descompone y desaparece. Este proceso lleva cientos o miles de millones de años en una galaxia, en comparación con los pocos segundos que tardamos en disipar una espiral de nata en una taza de café. Los hermosos patrones de las galaxias en espiral solo nos parecen permanentes porque su vida es muy corta; son como instantáneas de las espirales del café.

Sin embargo, en algunos casos, aunque el patrón en espiral puede cambiar con el paso del tiempo, se renueva constantemente. Esto ocurre cuando se dan repetidos «empujones» que estimulan el proceso. Si el bulbo del centro de una galaxia no es exactamente esférico, puede generar una influencia gravitacional que impide que el disco se asiente por completo. Esto puede producir una onda de gas de mayor densidad —ondas de densidad espirales— que recorre la galaxia desencadenando la formación de estrellas a su paso.

El proceso de la formación de estrellas, una vez da comienzo, puede causar alteraciones reiteradas, aunque menos regulares, que recorren una galaxia. Esto es lo que al parecer ocurre en la Vía Láctea. En regiones en las que se forman muchas estrellas, los astros calientes y jóvenes irradian grandes cantidades de energía ultravioleta en su entorno, además de «vientos» de material que escapan de las superficies de las estrellas jóvenes, y los detritos de las explosiones de las supernovas. Todo esto ejerce presión sobre las nubes cercanas de gas y polvo, destruyéndolas y desencadenando

otro estallido de formación de estrellas. El resultado es una retroalimentación que produce una cadena de regiones de formación estelar que se convierte en un brazo espiral por la rotación de la galaxia. Este proceso autosuficiente de formación de estrellas es muy efectivo para mezclar metales en el disco delgado de la Vía Láctea.

Una onda de densidad espiral será una región de formación de estrellas, pero, por curioso que parezca, la onda en sí no gira a la misma velocidad con la que las estrellas se mueven por la galaxia, aunque vaya en la misma dirección. La onda se mueve más lenta que las estrellas, de modo que al orbitar estas (y las nubes de gas y polvo a partir de las cuales se forman) alrededor de la Vía Láctea, alcanzan repetidamente los brazos espirales y los atraviesan, al igual que nosotros estamos a punto de cruzar el Brazo de Orión. Un ejemplo claro de lo que ocurre en esa situación puede verse si abrimos el grifo del fregadero de la cocina pero quitamos el tapón para que el agua se filtre. En el lugar en que el agua del grifo impacta en la superficie del fregadero se forma una fina capa que se propaga en todas direcciones. Pero a cierta distancia del centro (dependiendo de lo rápido que salga el agua del grifo), la profundidad del agua se incrementa en un paso conocido como salto hidrostático. El paso sigue siendo el mismo, aunque las moléculas de agua están moviéndose constantemente. Cuando las nubes de gas que avanzan por la galaxia alcanzan una onda de densidad espiral, se acumulan al igual que lo hace el agua en un salto hidrostático, y se forman estrellas cuando las nubes son objeto

de presión. Pero las estrellas nacidas en encuentros anteriores de esta índole, como el Sol, atraviesan la onda de densidad sin notar que está allí.

Sin embargo, pueden verse afectadas por la actividad asociada con las ondas de densidad y los brazos espirales. Después de todo, los brazos espirales son los lugares en los que se producen las supernovas. Si una supernova estallara cerca, una intensa radiación recorrería todo el Sistema Solar, adentrándose en la Tierra y matando a muchos seres vivos. También dañaría la atmósfera de nuestro planeta, y posiblemente destruiría la capa de ozono que nos protege de la perjudicial radiación ultravioleta del Sol y, desde luego, cambiaría el clima de un modo que solo podría ser dañino para las formas de vida adaptadas *quo* anterior, con independencia de cómo sobreviniera dicho cambio. Una supernova que se produjera a 30 años luz del Sistema Solar destruiría buena parte de la vida en la superficie de la Tierra.

Otra influencia maligna, pero menos extrema, podría tener su origen en el paso del Sistema Solar a través de una de las nubes de gas polvoriento que se congregan en los brazos espirales. En un caso extremo, el calor y la luz del Sol podrían verse atenuados por el material intermedio, desencadenando una Edad de Hielo. Sin duda, existen otros peligros asociados con esa travesía comparable a un atasco de tráfico cósmico.

La última vez que el Sistema Solar pasó por un brazo espiral fue hace unos 250 millones de años, o hace una órbita de la Vía Láctea, al principio de su circuito actual. Por supuesto, el brazo que

atravesó en aquel momento no era el de Orión, ya que los propios brazos también se han movido y cambiado con el paso del tiempo, pero el Sol se encontraba más o menos en la misma parte de su órbita que ahora. Casualmente, por aquel entonces la era geológica del Paleozoico tocó a su fin a causa de una de las mayores catástrofes que hayan afectado a la vida en la Tierra. Una serie de desastres arrasaron el 95% de la vida marina en el planeta (no solo individuos, sino especies enteras). El Paleozoico empezó hace unos 570 millones de años, y duró casi 350. En aquella época se produjo el desarrollo de peces en el mar, la aparición de vida en la Tierra y la evolución de los reptiles. Pero fue la muerte de tantas especies al final del Paleozoico lo que allanó el camino para que los supervivientes derivaran en nuevas formas de vida, en especial los dinosaurios, y florecieran.

Uno de los motivos por los que la vida en la Tierra tropezó con dificultades al término del Paleozoico es que el movimiento continental había generado una disposición de las masas de tierra en el planeta que contribuyó al desarrollo de una Edad de Hielo. Pero esa extinción extrema exige una explicación extrema, y aunque tratándose de tiempos tan remotos nunca podemos estar seguros, las pruebas circunstanciales apuntan al encuentro con un brazo espiral, si bien no podemos identificar la prueba irrefutable. Asimismo, nuestro Sistema Solar no encuentra brazos espirales con más frecuencia. Pero, ¿por qué?

El motivo por el que el Sistema Solar no se ha tropezado con un brazo espiral durante tanto tiempo obedece en parte a la distancia

que nos separa del centro de la galaxia, que nos sitúa en un intervalo entre brazos, y en parte porque la órbita del Sol alrededor de la Vía Láctea es muy circular, lo cual es un hecho inusual. El Sol ha permanecido en este intervalo entre brazos durante mucho tiempo porque, si bien todo el Sistema Solar orbita la galaxia una vez cada 250 millones de años aproximadamente, el patrón en espiral tarda el doble en hacerlo. Cuando el Sol ha completado una órbita, el patrón solo ha descrito media órbita, dando mucho tiempo para que la evolución haga su trabajo antes de ser interrumpida. Incluso en una órbita circular, un sistema planetario más cercano al centro de la Vía Láctea se encontraría con brazos espirales más a menudo, ya que estos avanzan hacia el centro de la galaxia. Los sistemas planetarios más alejados que nosotros del centro de la galaxia podrían encontrarse con brazos espirales incluso con menos frecuencia; pero hay buenos motivos para creer que existen pocos o ningún sistema planetario ahí fuera.

§. La zona galáctica habitable

Puesto que el diámetro del disco de la Vía Láctea mide unos 100 000 años luz, la distancia desde el centro de la galaxia hasta el borde exterior del disco delgado ronda los 50.000 años luz. El Sol se encuentra a unos 27.000 años luz del centro, algo más de la mitad del camino hasta el borde del disco. Una espectroscopia revela que, en general, las estrellas que se hallan más cerca del centro de la galaxia contienen más metales, y hay muchas estrellas viejas en el bulbo. Esto es típico de las galaxias de disco en general, y respalda

la idea de que se desarrollaron desde el centro hacia fuera. Aunque la formación de estrellas mantiene un ritmo moderado a día de hoy en todo el disco delgado, parece darse una oleada de nacimientos estelares en nuestra galaxia que comenzó en el corazón de la misma y se propagó desde el centro, alcanzando el radio en el que el Sistema Solar se formó hace entre 8.000 y 10.000 millones de años antes de dispersarse en las zonas exteriores del disco. Pero incluso antes de que pasara esta oleada, llevó cierto tiempo y más generaciones de estrellas el generar la metalicidad necesaria a nuestra distancia del centro de la Vía Láctea para que pudiera crearse una estrella como el Sol. Más lejos, incluso hace 5000 millones de años la metalicidad no había llegado a este nivel. Puesto que existe una íntima relación entre la metalicidad de una estrella y la probabilidad de que tenga planetas, esto ha llevado a la idea de la «Zona Galáctica Habitable» (ZGH), la zona alrededor del disco delgado en la que probablemente pueden encontrarse sistemas planetarios como el Sistema Solar y planetas como la Tierra. El argumento crucial, en lo tocante a la posibilidad de que existan otros seres inteligentes en nuestra galaxia, es que esta Zona Galáctica Habitable va creciendo poco a poco con el paso del tiempo. Según algunos cálculos, también avanza hacia el exterior del disco; pero la versión más actualizada de la idea, propuesta por Charles Lineweaver y sus compañeros, indica que siempre ha estado centrada en un anillo situado a unos 26.000 años luz del corazón de la galaxia, que empezó a formarse hace unos 8.000 millones de años y que en este momento tiene una extensión de entre 23.000 y

29.000 años luz. El Sol está cerca del centro de la ZGH, pero no exactamente en el centro. Esta es la región en la que la abundancia de metales hace 5.000 millones de años, cuando se formó el Sistema Solar, era suficiente para permitir la creación de planetas como la Tierra.

A cualquier distancia del centro de la Vía Láctea, la metalicidad del gas a partir del cual pueden formarse nuevas estrellas y sistemas planetarios sigue incrementándose con el paso del tiempo. Pero más lejos del centro hay relativamente menos gas y se da una menor formación de estrellas, así que, incluso a día de hoy, la metalicidad en las regiones exteriores no aumenta con tanta rapidez como en las interiores. Puesto que la metalicidad se calcula en relación con la del Sol, cabría esperar que su metalicidad fuera 1 por definición. Y lo es. Pero debido a la velocidad con que la metalicidad desciende con la distancia respecto del centro galáctico, los astrónomos prefieren utilizar unidades logarítmicas, que son más convenientes para comparar una amplia gama de valores. El logaritmo de 1 es 0, así que en esta escala, la metalicidad del Sol se define como 0, en unidades logarítmicas que los astrónomos denominan «exponente decimal». La nomenclatura no importa, pero lo que sí es de relevancia es que en esta escala, un número negativo significa que una estrella tiene una metalicidad más baja que la del Sol, ¡no que tenga un número de metales por debajo de cero!

A la distancia del Sol desde el centro de la Vía Láctea, la metalicidad actual desciende algo más de un 5% por cada mil años luz adicionales desde el centro. En términos logarítmicos, la reducción

es de 0,02 exponentes decimales por cada mil años. Otras galaxias de disco muestran unos gradientes de metalicidad muy similares. Tengo más cosas que decir sobre el motivo por el que las estrellas con un exceso de riqueza en metales podrían no tener planetas similares a la Tierra, pero la posición de la ZGH también depende del tipo y la frecuencia de los peligros con los que se tope un posible hogar para la vida en su viaje por la Vía Láctea. Ya he mencionado el riesgo de radiación de las supernovas. La cúspide de la actividad de una supernova entre las estrellas de la Vía Láctea parece encontrarse a unos dos tercios de la distancia del Sol desde el centro de la galaxia. Pero el peligro radioactivo no solo proviene de la explosión de estrellas, sino también del centro de la Vía Láctea en sí mismo, donde existe un gran agujero negro que actualmente está tranquilo pero da muestras de haber tenido actividad en un pasado reciente. Este agujero negro contiene una masa unos 3 millones de veces más grande que la del Sol dentro de un volumen que no supera cuarenta veces la distancia desde la Tierra hasta la Luna. Los estudios sobre agujeros negros activos en otras galaxias, sumados a nuestra comprensión de la física de dichos fenómenos, nos indican que cuando el agujero negro engulle materia, cosa que ocurre cuando una estrella o una nube de gas se acerca demasiado a él, el material que entra en este pequeño volumen a gran velocidad se calienta mucho e irradia intensas cantidades de energía electromagnética (por ejemplo, rayos-X), mientras se disparan chorros de partículas con carga eléctrica en el bulbo.

Esto ya sería suficientemente perjudicial para las estrellas que describen órbitas circulares alrededor del centro; pero dichas estrellas tienden a seguir órbitas muy elípticas que las arrastran a ellas y a cualquier planeta asociado muy cerca de toda esta actividad.

De vez en cuando se producen explosiones mucho más potentes pero mucho menos habituales que las supernovas en galaxias como la nuestra, y también son más proclives a darse cerca del centro de una galaxia, donde la densidad de las estrellas es mayor. Esas explosiones se detectan gracias a los intensos pero fugaces estallidos de rayos gamma que emiten, y son conocidas como brotes de rayos gamma. El mecanismo exacto que provoca esos estallidos sigue siendo un misterio, pero un brote de rayos gamma es la explosión más potente que puede producirse en el universo a día de hoy, emitiendo más energía en unos segundos de la que proyectará el Sol en toda su vida. Pueden ser vistos desde puntos muy lejanos del universo, y las estadísticas indican que un estallido como ese se produce en una galaxia como la Vía Láctea más o menos una vez cada cien millones de años. Aunque hubiera una en una región remota de la Vía Láctea, la explosión de radiación esterilizadora podría ser devastadora para la vida en la Tierra (o cualquier otro planeta habitado de la galaxia) y destructiva para la capa de ozono. Es posible que un fuerte brote de rayos gamma pueda esterilizar toda una galaxia. Hipótesis más optimistas señalan que, dado que dichos estallidos duran menos de un minuto, solo se verá afectada la cara del planeta que mire hacia el brote. La otra cara podría estar

lo bastante protegida como para que la vida sobreviviera, aunque sufriese un revés. Es posible que un motivo por el que la vida inteligente ha tardado tanto tiempo en aparecer en la Tierra (y tal vez en otros lugares de la galaxia) sea que los brotes de rayos gamma eran más comunes cuando la galaxia era joven, y esa vida solo ha tenido la posibilidad de evolucionar hasta el punto de producir al menos una civilización tecnológica desde hace unos pocos miles de millones de años.

Juntando todas las pruebas, Lineweaver y sus compañeros concluyen que la ZGH contiene no más de un 10% de todas las estrellas que se han formado hasta la fecha en la Vía Láctea. Pero la ZGH entraña otros peligros.

§. Cometas catastróficos

En comparación con el flujo extremo de un agujero negro, un cometa podría parecer una amenaza menor. Y lo es; para un planeta, no para la vida. El problema es que los impactos cometarios, como el que se produjo en la Tierra hace 65 millones de años, momento en que murieron los dinosaurios, puede aniquilar de un plumazo formas complejas de vida en un planeta. Si tales acontecimientos se producen a intervalos de decenas o cientos de miles de años, la vida puede resistirlo (curiosamente, como veremos, la vida incluso puede salir beneficiada a largo plazo). Pero los impactos cometarios frecuentes impiden que la vida tenga tiempo de desarrollar inteligencia si las especies son aniquiladas con excesiva frecuencia. Los cometas son fragmentos de hielo y roca que han

quedado de la formación del Sistema Solar. Los fotogénicos cometas que todos conocemos, aunque solo sea por instantáneas, con sus largas colas, en realidad son visitantes poco habituales de la zona interior del Sistema Solar, llegados de una gran nube de cometas que rodea a dicho sistema, como una cáscara que envuelve la yema de un huevo, casi a medio camino de las estrellas más cercanas. Esto se conoce como la Nube de Oort, por Jan Oort, un astrónomo que estudió los cometas y calculó las propiedades de la cáscara. Las colas brillantes que desarrollan los cometas al acercarse al Sol se deben a que este vaporiza el material gélido para liberar gas y polvo; y los hielos no solo consisten en agua, sino que también incluyen elementos como metano y amoníaco congelados.

Pero la amenaza para la vida en la Tierra no tiene nada que ver con la composición de los cometas. Si nos golpea en la cabeza un fragmento de hielo de una tonelada, causa tanto daño como que nos alcance un fragmento de roca del mismo peso. Un fragmento de hielo y roca de 10 km de longitud que impacte en la Tierra a una velocidad de 50 km por segundo liberaría la energía equivalente a la explosión de cien millones de megatoneladas de TNT, más de 5.000 millones de veces la energía liberada por la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima al final de la Segunda Guerra Mundial. Esto sería más que suficiente para explicar la alteración medioambiental global que se produjo en el momento de la extinción de los dinosaurios. Contando las marcas de viejos cráteres en la superficie de la Tierra y otros planetas, además de nuestro conocimiento de las órbitas de los cometas y los asteroides, los astrónomos calculan

que un impacto como este se produce en la Tierra más o menos cada cien millones de años. Como demuestra el destino de los dinosaurios, esto plantea graves problemas para la evolución de la vida en la Tierra, aunque —como atestigua nuestra existencia—, esa catástrofe puede abrir nuevas oportunidades para que los supervivientes del desastre se propaguen y diversifiquen. No obstante, si los impactos se produjeran con mucha más frecuencia, parece probable que nunca habría tiempo para que evolucionara inteligencia en el intervalo entre catástrofes. Y los impactos probablemente sean mucho más habituales en los planetas que orbitan estrellas más próximas al centro galáctico que nosotros.

La razón es que los cometas se desprenden de la Nube de Oort debido a la influencia gravitacional de cualquier estrella o nube de gas con la que se encuentre el Sistema Solar en su viaje alrededor de la Vía Láctea, y luego caen a la zona interior del Sistema Solar, donde constituyen una amenaza para la vida en la Tierra. Nuestra comprensión de cómo se formó el Sistema Solar nos dice que las nubes cometarias como la de Oort serán una característica de todos los sistemas planetarios como el nuestro, así que todos estarán expuestos al mismo tipo de riesgo. ¿Cómo de grande puede ser dicho riesgo? Bastante. Se calcula que la Nube de Oort contiene varios billones de cometas, si bien la masa total de todos los cometas de la nube juntos equivaldría solo a varias decenas de veces la masa de la Tierra. Los encuentros violentos que desprenden a los cometas de la nube serán mucho más comunes cuanto más cerca se produzcan del centro de la galaxia, donde la distancia entre

las estrellas es menor; también serán más comunes cuando un sistema planetario esté atravesando uno de los brazos espirales, donde las nubes de gas se acumulan en el equivalente a un salto hidrostático.

Los límites exactos de la ZHG no están claros, pero lo que sí sabemos es que las regiones interiores de la galaxia tienen muchos metales pero son peligrosas para la vida, mientras que las zonas externas del disco delgado son más seguras, pero pobres en metales y poco proclives a contener planetas como la Tierra. En medio existe una región idónea, la ZGH, que es adecuada para la vida. El Sistema Solar se halla cerca del centro de esa zona. Residimos en un lugar de la Vía Láctea particularmente favorable para la vida. También vivimos en una época particularmente favorable para la vida en la Vía Láctea. Hasta hace unos 5000 millones de años, al margen de la escasez de metales, la actividad del nacimiento de estrellas y las supernovas asociadas con la muerte de las mismas habría hecho peligrar la vida. El desarrollo de la inteligencia en la Tierra se ha prolongado durante casi esos 5.000 millones de años, y si (¡qué gran sí!) eso es típico, aparte de cualquier otra consideración, podríamos ser una de las primeras, si no la primera civilización de nuestra galaxia. Hay algo especial en nuestro lugar en la Vía Láctea, tanto en el tiempo como en el espacio.

A propósito, la existencia de la Zona Habitable de la galaxia refuerza el poder de la paradoja de Fermi. Si «ellos» existen en algún lugar de la Vía Láctea, vivirán en la ZHG. Y si quieren explorar la Vía Láctea en busca de otros planetas habitados, solo tendrían que hacerlo en

la ZHG, no en toda la galaxia. Cualquier civilización que se desplace por el espacio sin duda sabría suficiente acerca de las estrellas para darse cuenta de esto último. ¡Ello hace más sencilla y rápida la tarea de enviar sondas robot a visitar todos los lugares que puedan albergar vida!

Aunque el debate de este libro se centra en la Vía Láctea, merece la pena mencionar que las posibilidades de vida en otras galaxias son todavía más inverosímiles en lo que respecta a formas de existencia como la nuestra. En las regiones relativamente próximas del universo que podemos estudiar con detalle por medio de nuestros telescopios, cuatro quintas partes de todas las estrellas se encuentran en galaxias que son intrínsecamente más tenues que la Vía Láctea. Ello es un indicativo de que los procesos del nacimiento y la muerte de las estrellas que enriquecen el caldo cósmico en esas galaxias son más débiles que en la Vía Láctea. Esta puede estar en minoría, y rondaría el 20% del total de las galaxias habitables; y la ZHG contiene una minoría, a lo sumo el 10%, de todas las estrellas de la Vía Láctea. Pero, ¿cuántas de esas estrellas pueden tener planetas en los cuales haya evolucionado la vida? ¿Es especial el Sol en comparación con sus vecinas de la Zona Habitable de la galaxia?

Capítulo 3

¿Por qué es tan especial el sol?

Contenido:

- §. La angosta zona de vida*
- §. El sol no es una estrella tipo*
- §. Compañeros perturbadores*
- §. Explosiones del pasado*
- §. El misterio de la metalicidad solar*
- §. Hasta que el sol muera*
- §. Posponer el día del juicio final*

Al igual que existe una zona habitable en una galaxia como la Vía Láctea, también la hay alrededor de una estrella como el Sol. El requisito esencial de esta Zona Estelar (o Solar) Habitable, abreviada como ZEH, es que abarca la región que rodea a una estrella en la que puede existir agua: no está tan fría como para que el agua se congele, ni tan caliente como para que hierva. A primera vista, esto puede parecer indebidamente restrictivo. Los escritores de ciencia ficción han imaginado que existe vida en planetas con océanos de metano líquido y otros entornos exóticos. Pero el agua tiene unas propiedades únicas que la convierten en un medio ideal en el que la vida puede evolucionar.

El motivo más importante por el cual el agua es (literalmente) esencial para la vida es que esta necesita un disolvente, un medio en el cual se disuelvan los elementos químicos y puedan producirse

reacciones. El agua es, con diferencia, el mejor líquido para este propósito; el amoníaco es el segundo, pero carece de otras propiedades especiales del agua.

La segunda propiedad del agua más importante para la vida es que cada molécula tiene una polaridad magnética. En otras palabras, un extremo de una molécula de agua se comporta como un polo norte magnético muy débil, y el otro como un polo sur magnético también muy débil. Esta es una propiedad casi única en el mundo de las moléculas. Esta polaridad no solo propicia que las moléculas de agua, sino también las moléculas disueltas en ella, se alineen de cierta manera, y este es un factor determinante para la forma de las moléculas de aminoácidos que son cruciales para la vida.

Una tercera propiedad del agua es, si lo pensamos, bastante extraña, aunque puede resumirse en tres palabras. El hielo flota. Dicho de otro modo, el agua sólida es menos densa que el agua líquida. Esto se debe a que cuando el agua se congela, las moléculas se alinean para formar una estructura cristalina muy abierta, donde las moléculas están más separadas que cuando se tocan en agua líquida. En otras sustancias, las moléculas están más cerca en su forma sólida, así que es más densa que la líquida. Las razones físicas y químicas que explican esta extraña propiedad del agua se han determinado, pero no son importantes aquí. Lo relevante es que esto significa que durante una Edad de Hielo, se forma una piel encima del océano a grandes latitudes, manteniendo el agua más caliente debajo de esta capa aislante. Si el hielo se hundiera hasta el fondo del océano, la capa superior de agua quedaría descubierta y

se congelaría, y el proceso se repetiría hasta que los océanos fuesen una bola sólida de hielo.

En general, es razonable suponer que «la vida tal como la conocemos» requiere la presencia de agua líquida. Por tanto, ¿hasta qué punto limita eso la ZEH?

§. La angosta zona de vida

Algunos afirman que incluso limitar la ZEH a la región en la que las temperaturas oscilan entre 0 y 100 °C es demasiado generoso, y que solo deberíamos observar la zona de 0 a 50 °C. Su argumento se basa en el hecho de que las formas complejas de vida como nosotros no pueden sobrevivir a temperaturas superiores a unos 50 °C. Esto sin duda es cierto de la vida animal en la superficie de la Tierra; pero en décadas recientes (a partir de los años setenta), los estudios del fondo oceánico han revelado la existencia de fisuras hidrotermales, como si de géiseres submarinos se tratara, que se unen a varias formas de vida que se alimentan de la energía y los elementos químicos liberados por dichas fisuras. Estas se encuentran a miles de metros por debajo de la superficie del mar, donde no llega nunca la luz del Sol, pero sostienen ecosistemas completos, entre ellos las gambas sin ojos y los denominados «gusanos de Pompeya» (que llevan el nombre de la ciudad del volcán), que viven en tubos donde la temperatura del agua supera los 80 °C. Al parecer, incluso una vida compleja puede soportar temperaturas muy superiores a los 50 °C, siempre que cuente con un suministro de agua líquida. Por tanto, es mejor considerar que la

zona de vida que rodea a una estrella abarca toda la región de los 0 a los 100 °C, que aun así es lo bastante restrictivo como para aportar más pruebas de que ocupamos un lugar especial en el universo.

Cuando observamos el Sistema Solar en la actualidad, vemos que la Tierra se encuentra casi en medio de la ZEH. Venus, el siguiente planeta en dirección al Sol, es demasiado cálido para que exista agua líquida; Marte, el siguiente planeta desde el Sol, es demasiado frío. Pero la zona de vida no siempre ha ocupado el mismo lugar. Nuestra comprensión sobre los procesos que mantienen calientes las estrellas, y las comparaciones con otras estrellas, nos dice que el Sol era más frío cuando se formó y que se ha ido calentando permanentemente a medida que envejece. Hace unos 4000 millones de años, el Sol era entre un 25 y un 30% más frío que hoy. Por tanto, durante los últimos 4.000 millones de años, la zona de vida en torno al Sol se ha distanciado de él constantemente. La región que se hallaba en la franja exterior de la zona (el borde frío) ahora se encuentra en la franja interior (el borde caliente), y las regiones que estaban en la zona más caliente de la zona, incluida la órbita de Venus, ahora son demasiado calurosas para albergar vida.

Eso ha llevado al concepto de la Zona de Habitabilidad Continua, o ZHC, que es la región en torno al Sol donde la temperatura siempre ha oscilado entre 0 y 100 °C. En ocasiones se la conoce como «la Zona de Ricitos de Oro» porque la temperatura allí, como la de las gachas del osito de la historia, es «la adecuada». La ZHC es diminuta. Se extiende desde una distancia solo un 1% más alejada

del Sol que nosotros hasta una distancia solo un 5% más próxima al Sol que nosotros.

Parece que la órbita de la Tierra se encuentra en una zona extraordinariamente afortunada del Sistema Solar en lo tocante a las posibilidades para la evolución de inteligencia. Pero la situación no es tan clara como pueda parecer a primera vista. La presencia de vida en la Tierra interviene en la regulación de la temperatura de nuestro planeta a través del efecto invernadero. Gases como el dióxido de carbono actúan para calentar la superficie de la Tierra atrapando un calor que de lo contrario se escaparía al espacio. Hoy, este efecto invernadero natural mantiene la Tierra unos 33 °C más caliente que la superficie de la Luna, que carece de aire, aunque la Tierra y su satélite están prácticamente a la misma distancia del Sol. Cuando la Tierra se formó, la atmósfera era más rica en esos gases invernaderos, impidiendo que se congelara aunque el Sol estaba más frío. A medida que el Sol se calentaba y se desarrollaba vida en la Tierra, el dióxido de carbono en el aire era consumido por seres vivos y depositado como rocas carbonatadas, reduciendo la fuerza del efecto invernadero. La vida altera la cantidad de dióxido de carbono en el aire mediante procesos de retroalimentación que mantienen caliente el planeta cuando el Sol está frío e impiden que se sobrecaliente cuando la temperatura del astro sube. Esta es la base de la teoría de Gea, desarrollada por James Lovelock, que comentaré más tarde.

Otro ejemplo subraya la importancia de las retroalimentaciones para la localización de la ZHC. La erosión de las rocas conlleva

reacciones químicas que también eliminan dióxido de carbono del aire. Cuando el planeta se calienta, se evapora más agua de los mares que cae en forma de lluvia, y los sistemas climatológicos, impulsados por la convección, son más intensos, de modo que la erosión es mayor. Esto consume dióxido de carbono del aire y debilita el efecto invernadero, además de enfriar el planeta. Pero cuando este se enfría, se produce menos erosión, de modo que el dióxido de carbono (liberado por los volcanes) se acumula en el aire, fortaleciendo así el efecto invernadero y, por tanto, calentando el planeta.

Todo esto amplía los límites de la ZHC alrededor del Sol, pero, con toda sinceridad, no demasiado. Apenas cambia el límite interno de la ZHC, y la sitúa solo un 5% más cerca del Sol que nosotros; sin embargo, aleja el límite exterior hasta un 15% del Sol en relación con nuestra posición. En unidades en las que el radio de la órbita terrestre se define como 1 unidad astronómica (UA), la ZHC pasa de 0,95 UA a 1,15 UA; por tanto, abarca una distancia equivalente al 20% de la envergadura de la órbita terrestre. No importa que la Tierra describa una órbita casi circular alrededor del Sol; de hecho, nuestra órbita se desvía de un círculo perfecto solo por un 1,7%. Si nuestro planeta trazara una órbita elíptica tan extrema como la de Plutón, en algunos momentos del año estaría más cerca del Sol que la franja interior de la ZHC, y en otros más lejos que la franja exterior de la misma. Las órbitas elípticas son una mala noticia para la vida, un tema en el cual incidiré de nuevo más tarde. Pero como indican esos límites, incluso en una bonita órbita circular, los días

de la Tierra como un hogar para la vida están contados. Cuando la ZHC se haya distanciado otro 5%, cosa que sucederá dentro de unos 2.000 millones de años, la Tierra será como Venus, demasiado calurosa para la vida. Por tanto, el tiempo habitable para la Tierra es de unos 6.000 millones de años. ¿Qué diferencia hay con las ZHC de otras estrellas?

§.El sol no es una estrella tipo

Nuestro Sol es descrito a menudo como una estrella tipo. Esto solo es cierto en un sentido muy limitado. Se dice que estrellas que, como el Sol, mantienen su producción de energía convirtiendo hidrógeno en helio en su interior figuran en la «secuencia principal» de una especie de gráfica, conocida como Diagrama de Hertzsprung-Russell, que los astrónomos utilizan para relacionar la temperatura de una estrella con su masa. Puesto que el Sol aparece en la Secuencia Principal de este diagrama, se lo considera una estrella tipo. Pero tipo no significa corriente. Alrededor de un 95% de las estrellas son más pequeñas que el Sol, y puesto que la luminosidad de una estrella guarda relación con su masa, esto significa que son más tenues que el Sol. En ese sentido, este último no es en modo alguno corriente, y las estrellas más grandes y brillantes que el Sol son todavía más inusuales que las estrellas con la misma masa, aunque las estrellas gigantes son algo bastante común. Puede que el Sol no sea «corriente» en otro sentido. Existen algunas pruebas de que la luminosidad del Sol varía menos que la oscilación de otras estrellas con masas y composiciones químicas similares. Esto es

muy difícil de cuantificar, y no podemos decir con seguridad si siempre ha sido así o si es solo una fase por la que está pasando el Sol hoy en día (o durante los últimos millones de años). Pero al menos apunta a que el Sol podría ser una estrella inusualmente inestable, con obvias ventajas para la evolución de la vida en la Tierra.

En una escala mayor, ser más brillante o más tenue que el Sol tiene consecuencias dramáticas para la ZHC en torno a una estrella. La mayoría de las estrellas de la galaxia —el 95%— son más pequeñas y tenues que el Sol. Tres cuartas partes de todas las estrellas de nuestros alrededores son las denominadas enanas rojas, una categoría también conocida como estrellas de tipo M, cuya masa equivale tan solo a una décima parte de la del Sol. Las enanas rojas viven mucho más que estrellas como el Sol (que es una estrella de tipo G amarillo-naranja; las iniciales son un accidente histórico y no tienen significado más allá de ser etiquetas). Esto sería positivo, ya que da tiempo para que evolucione la inteligencia. Por desgracia, las condiciones en cualquier planeta que orbite una enana roja probablemente serán inadecuadas para la aparición de una civilización tecnológica.

El primer problema es que la zona de vida alrededor de una enana roja es muy pequeña y está muy cerca de la estrella madre. Para que haya agua líquida en su superficie, un planeta tendría que orbitar a 5 millones de km de la estrella, a una distancia que constituiría solo una trigésima parte de la que media entre la Tierra y el Sol. Cuando se encuentra más cerca, Mercurio, el planeta más

interior de nuestro Sistema Solar, nunca llega a 46 millones de km del Sol. No está claro que tan siquiera pudieran formarse planetas u ocupar órbitas estables a 5 millones de km de una estrella, pero aunque pudiesen, habría complicaciones. Al igual que las fuerzas de las mareas han atrapado a la Luna en una rotación que mantiene una de sus caras siempre hacia la Tierra, los planetas situados en la zona vital que rodea a una enana roja estarían atrapados en una rotación con una cara mirando siempre hacia la estrella. Por tanto, una cara se hallaría sumida en una oscuridad eterna y la otra en una luz permanente. Con la posible salvedad de una zona de penumbra, las condiciones serían incómodamente calurosas o incómodamente frías. La consecuencia más probable de esto es que la convección llevaría gases de la cara caliente del planeta a la fría, donde se enfriarían y congelarían. La atmósfera que el planeta poseyera originalmente antes de que se completara el encierro de las mareas se congelaría en la cara oscura.

Otro problema —por si eso no fuera suficiente— es que las enanas rojas son mucho más activas que el Sol. Producen frecuentes destellos de actividad que liberan grandes cantidades de radiación ultravioleta, rayos-X y partículas. Esto sería especialmente perjudicial debido a la proximidad del planeta y la estrella. Aparte de las consecuencias directas para la vida, estos estallidos aniquilarían la atmósfera que pudiera haber empezado a formarse alrededor del planeta. En general, parece que podemos descartar los sistemas de enanas rojas como hogares probables para otras civilizaciones. Ya hemos descubierto que la Zona Galáctica

Habitable solo incluye un 10% de las estrellas de la Vía Láctea, y ahora descartamos el 75% de ese 10%. Eso nos deja solo un 2,5% de todas las estrellas, y apenas hemos empezado a identificar todas las razones por las que estamos en la Tierra.

Las estrellas más grandes y luminosas que el Sol solo constituyen un pequeño porcentaje de ese 2,5%, y como zonas habitables, no son mejores que las enanas rojas como posibles lugares para encontrar planetas que alberguen civilizaciones tecnológicas. Una estrella más luminosa posee una zona habitable más grande, pero no vive tanto tiempo como el Sol, y la zona habitable se mueve con más rapidez que la del Sol a medida que envejece. Una estrella con una masa 30 veces más grande que la del Sol tendría que consumir su combustible nuclear tan rápido que la velocidad a la que irradia energía es 10.000 veces la del Sol, y solo vivirá unas decenas de millones de años en la Secuencia Principal estable. Esas estrellas también emiten grandes cantidades de radiación ultravioleta, que son perjudiciales para la vida y para las atmósferas de posibles planetas similares a la Tierra. Sin embargo, las estrellas más luminosas de la Secuencia Principal, conocidas como O y B, constituyen menos de una décima parte del 1% de todas las estrellas, así que eliminarlas de la ecuación no cambia gran cosa.

Las estrellas de tipo A, que son ligeramente más pequeñas y frías, podrían proporcionar a cualquier planeta que habite su zona de vida un entorno estable durante 1.000 millones de años aproximadamente, tiempo más que suficiente para que empiece la vida, a juzgar por el ejemplo de la rápida aparición de vida en la

Tierra, pero tal vez no sea suficiente para que se desarrolle una civilización como la nuestra. Incluso una estrella con una masa solo 1,5 veces más grande que la del Sol abandonaría la Secuencia Principal después de solo unos 2.000 millones de años. Pero hay algunas estrellas, las de tipo F, que son un poco más grandes que el Sol, tienen una vida en la Secuencia Principal que ronda los 4000 millones de años y no parecen producir cantidades excesivas de radiación ultravioleta.

Sumándolo todo, pueden existir zonas de vida razonablemente grandes y duraderas alrededor de estrellas que se hallen en la Zona Galáctica Habitable y que sean como el Sol (tipo G), o estrellas un poco más grandes (tipo F) o un poco más pequeñas (conocidas como tipo K). Una valoración generosa no rebasaría el 2% de las estrellas de la galaxia. En ese sentido, ya podemos ver que el Sol es especial. Pero incluso dentro de ese 2%, el Sol no es una estrella corriente, ya que la mayoría tienen compañeras: viven en sistemas estelares binarios o incluso triples.

§. Compañeros perturbadores

En realidad es muy difícil gestar estrellas. Las grandes nubes de gas y polvo del disco delgado de la Vía Láctea (conocidas como nubes moleculares gigantes, ya que son grandes y contienen moléculas) rotan, y están entreveradas de campos magnéticos que también ayudan a resistir la fuerza de la gravedad. Si una estrella con la misma masa que el Sol se formara a partir de una nube cuya densidad se incrementara hasta igualar la de una nube interestelar

de rotación lenta, cuando esta se hubiera encogido hasta alcanzar el tamaño del Sol giraría tan rápido que su superficie se movería a un 80% de la velocidad de la luz. Esto se debe a que una propiedad conocida como impulso angular se conserva cuando una estrella mengua o, de hecho, también cuando crece. Para tener el mismo impulso angular, siempre que posea la misma masa, un objeto pequeño tiene que girar más rápido que uno grande. Este es el motivo exacto por el que un patinador sobre hielo puede girar más rápido o más lento extendiendo o encogiéndose los brazos. Para menguar, una nube de gas en proceso de desintegración tiene que deshacerse del impulso angular. Si dos o más estrellas se forman a partir de la misma nube en desintegración, gran parte del impulso angular se invierte en el movimiento orbital que las estrellas describen entre sí y no en el giro de los propios astros.

Una nube molecular gigante normal mide unos 65 años luz y contiene alrededor de un tercio de un millón de masas solares de material. Cuando una nube cruza el salto de densidad de un brazo espiral, se ve comprimida, y si una supernova estalla cerca de ella, las ondas de choque de la explosión la atravesarán. En esas condiciones, la turbulencia que agita la nube puede producir regiones de mayor densidad en las que la gravedad puede imponerse y provocar que algunas de esas regiones locales se desmoronen para formar estrellas. Las «guarderías» estelares en las que tiene lugar este proceso han sido fotografiadas en la parte infrarroja del espectro, donde la radiación penetra en el polvo de las estrellas, en observatorios espaciales no tripulados como Herschel,

confirmando las ideas de los astrónomos basadas en su conocimiento de las leyes de la física.

Al parecer, la turbulencia produce «núcleos pre estelares» en los que las estrellas crecen a medida que la gravedad atrae más materia hacia ellas. Un núcleo típico tendría una longitud aproximada de una quinta parte de un año luz, y contendría una masa que rondaría el 70% de la del Sol. Solo el centro de ese núcleo se destruye y se calienta hasta el punto en que empieza a generar energía mediante fusión nuclear, convirtiéndose primero en una diminuta protoestrella cuya masa es inferior a una centésima (o quizá una milésima) parte de la del Sol; las reacciones nucleares empiezan cuando ha alcanzado aproximadamente una quinta parte de la masa del Sol. El tamaño final de la estrella que se desarrolla en este núcleo no depende de la envergadura de este último; todas ellas suelen partir de la misma masa inicial. Lo que importa es la cantidad de materia que se encuentre lo bastante cerca como para ser capturada por la gravedad de la estrella joven, antes de que la radiación de esta y de cualquier compañera que esté formándose cerca de allí disperse el grupo de la nube molecular gigante a partir del cual se han formado. En el caso de una estrella como el Sol, el 99% de su masa se acumula de este modo por adición. Pero este es un proceso muy ineficaz. Aunque más o menos la mitad de la masa de un grupo se convierte en estrellas, solo un pequeño porcentaje del material de toda la nube se transforma en astros luminosos al atravesar un brazo espiral.

Debido al problema del impulso angular, es difícil concebir que una estrella pueda formarse en situación de aislamiento, y las observaciones de nuestras inmediaciones estelares demuestran que al menos un 70% de las estrellas similares al Sol tienen al menos una compañera, si bien los sistemas con más de tres estrellas unidas por la gravedad son extremadamente raros. Las simulaciones por ordenador del proceso por el cual las estrellas de múltiples sistemas interactúan entre sí y con sistemas cercanos explican cómo ha surgido esta proporción y por qué hay al menos algunas estrellas que, al igual que el Sol, no tienen una compañera. Cuando tres estrellas se orbitan unas a otras, realizan una compleja danza en la que es bastante fácil que una de las estrellas atraiga mucha energía y salga despedida del sistema, llevándose un impulso angular con ella, mientras que las otras dos se unen todavía más. Las parejas binarias son más estables, a menos que pasen cerca de otra estrella (o un sistema binario o triple), en cuyo caso, las interacciones gravitacionales pueden disolver la pareja y dejar al menos una estrella aislada, aunque su compañera a veces puede ser capturada por el otro sistema. Las simulaciones informáticas indican que, si de cada 100 nuevos sistemas estelares 40 son triples y 60 son binarios (constituyendo un total de 240 estrellas), entonces, teniendo en cuenta lo cerca que estén estos sistemas en las regiones de formación de estrellas de la Vía Láctea, cuando los sistemas estelares se hayan separado en la galaxia y las cosas se hayan asentado, habrá 25 triples, 65 binarias y solo 35 estrellas solas. Las mismas 240 estrellas son compartidas ahora de

modo que menos del 20% están solas, lo cual coincidiría más o menos con nuestras observaciones de las estrellas de nuestra región.

Los sistemas binarios y triples son una mala noticia para la vida, y desde luego para la posibilidad de que surja una civilización tecnológica en cualquier planeta de un sistema de esa índole. Pueden existir órbitas estables, bien si las dos estrellas de un sistema binario están muy próximas (más o menos a una quinta parte de la distancia entre la Tierra y el Sol) y los planetas orbitan alrededor de ambas estrellas, bien si ambas están alejadas (al menos 50 veces la distancia entre la Tierra y el Sol) y los planetas giran alrededor de una de las estrellas. Pero, aunque las órbitas puedan ser estables, no serán tan hermosamente circulares como la órbita terrestre alrededor del Sol, y los planetas se verán afectados por el calor y la luz emitidos por ambas estrellas, dificultando el establecimiento de una zona habitable duradera. A juzgar por las pruebas de la crónica arqueológica sobre la evolución de la vida en la Tierra, incluso una variación del 10% en la cantidad de calor que llega a un planeta desde su estrella o estrellas podría causar graves problemas. Una regla práctica es que un cambio del 1% en la producción del Sol causa una variación de 1 °C en la temperatura media de la superficie de la Tierra, y actualmente preocupa sobremanera que un calentamiento global de 4 o 5 °C pueda ocasionar la destrucción de la civilización.

Para agravar el problema, en un sistema binario, en lugar de tener una única estrella que cada vez brilla más con una zona habitable

bien definida que se mueve hacia el exterior con el paso del tiempo, tendríamos dos estrellas cada vez más luminosas, a dos velocidades distintas, para complicar el panorama. La zona habitable (o zonas) se movería con más rapidez y describiendo una trayectoria menos recta. Esto quizá no sería tan negativo para las formas de vida unicelulares que han existido en la Tierra casi desde la formación del Sistema Solar, pero no proporcionaría la estabilidad a largo plazo que se precisa para el desarrollo de una civilización tecnológica.

Aparte de la dificultad de encontrar una zona habitable duradera en un sistema estelar múltiple, puede ser complicado que se formen planetas en dichos sistemas, ya que los discos de polvo a partir de los cuales se fraguan estos últimos probablemente se vean alterados por las complejas fuerzas de marea que actúan en esos sistemas.

Por tanto, solo nos queda un 30% del 2% de las estrellas de la Vía Láctea que se encuentran en la ZGH y se asemejan al Sol, es decir, tan solo un 0,6% de todas las estrellas de la galaxia. Si la existencia de planetas requiere una estrella que se forme en una situación de aislamiento absoluto por algún proceso raro que todavía no comprendemos, esa ínfima proporción se reduce más por un factor grande pero desconocido. Y todavía no hemos agotado la lista de propiedades que hacen especial al Sol.

§. Explosiones del pasado

Los astrónomos saben muchas cosas sobre las bruscas condiciones en las que se formó el Sol, ya que los acontecimientos que se

produjeron en aquel momento han dejado huellas en forma de elementos radioactivos hallados en el Sistema Solar. Como todos los elementos excepto el hidrógeno y el helio primordial, esos componentes radioactivos se crearon dentro de las estrellas y conformaron el material a partir del cual se forman nuevas estrellas y planetas cuando mueren sus estrellas madre. Pero los elementos radioactivos no duran para siempre, y solo se forman en grandes explosiones estelares. Así que podemos decir con seguridad cuándo se formaron y que se gestaron durante el estallido de una estrella o estrellas próximas al lugar en el que nació el Sol.

Cada elemento radioactivo se descompone en una sustancia estable, a veces en un proceso en múltiples pasos, durante una escala de tiempo conocida como periodo de semi desintegración. Este periodo es diferente para cada elemento (en términos estrictos, para cada isótopo del elemento; los átomos de diferentes isótopos tienen las mismas propiedades químicas pero diferentes pesos). Los elementos estables generados por este proceso son conocidos como los productos de desintegración: el uranio radioactivo, por ejemplo, se descompone en última instancia para producir plomo. Comparar la proporción de un elemento radioactivo hallado en una muestra de material a día de hoy con la proporción de sus productos de desintegración en la misma muestra revela qué porcentaje de material se ha descompuesto, y esto nos dice cuánto tiempo ha transcurrido desde que se formó el material radioactivo.

Dos de los isótopos radioactivos producidos en los últimos estertores de una estrella son hierro-60 y aluminio-26. El hierro-60

tiene un periodo de desintegración corto, y pronto degenera en su isótopo de descomposición conocido como níquel-60, pero el aluminio-26 se desintegra mucho más lentamente. Si ambos hubiesen sido fabricados al mismo tiempo en una estrella que explotó y roció el Sistema Solar de detritos radioactivos, habría cierta proporción de níquel-60 comparada con el aluminio-26 en los fragmentos más antiguos del Sistema Solar. Pero cuando unos investigadores de la Universidad de Copenhague estudiaron viejas rocas de la Tierra y muestras de meteoritos, rocas del espacio consideradas fragmentos que han quedado de la formación de los planetas, encontraron menos níquel-60 en los meteoritos más longevos y más en los meteoritos ligeramente más jóvenes. Una explicación plausible para esta incógnita es que una estrella muy grande, quizá 30 veces más que el Sol, se desprendió de sus capas exteriores, incluida gran cantidad de aluminio-26, alrededor de un millón de años antes de la explosión final del núcleo restante de la estrella. Este estallido inicial habría sido suficiente para desencadenar la desintegración del nudo de la nube molecular gigante a partir de la cual se formó el Sistema Solar. Entonces, al cabo de más o menos un millón de años, la estrella explotó, salpicando de detritos su entorno, incluido el Sistema Solar, que se estaba formando, en los que habría hierro-60 arrancado de su interior.

Para que esto funcione, la explosión de la supernova tiene que haberse producido a una décima parte de un año luz del Sistema Solar en periodo de formación, cuando el Sol tenía menos de 2

millones de años de antigüedad. Ninguna otra supernova ha estallado jamás tan cerca del Sol. De lo contrario, la vida en la Tierra habría sido exterminada. No puede ser una coincidencia que este acontecimiento aparentemente inverosímil se produjera donde se estaba formando el Sistema Solar, y la explicación natural es que tanto el Sol como la supernova eran miembros de un grupo de estrellas que se formaron en la misma nube de gas y desde entonces han seguido caminos distintos.

Hay buenos ejemplos de grupos como estos. Uno de los más conocidos se llama Ri 36, y se encuentra en la Gran Nube de Magallanes, una pequeña galaxia compañera de la Vía Láctea. El grupo contiene unas 10 000 estrellas, ninguna de ellas con más de unos pocos millones de años de edad. Sin duda, las estrellas se formaron a partir de una gran nube de gas y polvo. Puesto que las estrellas gigantes son infrecuentes (pero infrecuentes de un modo cuantificable en comparación con el número de estrellas como el Sol), podemos establecer límites sobre el tamaño del grupo en el que nació el Sol. En términos aproximados, solo hay una estrella con una masa 30 veces más grande que el Sol por cada 1500 astros más pequeños, así que debe de haber al menos esa cifra en el grupo en el cual se formó el Sistema Solar. Por otro lado, los grupos grandes tardan más en afianzarse en un estado compacto donde las estrellas estén tan cerca como lo estaba el Sol de la supernova que propagó escombros radioactivos por todo el Sistema Solar, y una estrella con una masa 30 veces superior a la del Sol vive solo unos pocos millones de años antes de explotar. El astrónomo holandés Simon

Zwart calcula que, basándonos en esto, el grupo en el que se formó el Sistema Solar no podía contener más de 3.500 estrellas. Esto es poco tratándose de una constelación, y la gravedad de las estrellas del grupo que se atraen unas a otras no sería lo bastante fuerte como para impedir que dicho grupo se disgregara y que sus estrellas se dispersaran debido a las fuerzas de marea y a las interacciones con otros objetos que se encontrara en su avance por la galaxia. El grupo se habría desintegrado por completo en 250 millones de años, cuando hubiese completado un circuito por la Vía Láctea.

Pero, durante un corto espacio de tiempo, mientras el Sistema Solar estaba formándose, las estrellas del grupo debían de estar tan cerca que la distancia entre algunas sería inferior a la que media entre Plutón y el Sol. Esto no sería una buena noticia para cualquier planeta que intentara formarse alrededor de las estrellas. Retomaremos esto en breve; pero primero hay otro rompecabezas, que versa sobre la composición del Sol y que parece convertir nuestro lugar en el universo en algo especial.

§. El misterio de la metalicidad solar

La metalicidad del Sol puede inferirse de dos maneras. La primera es calcular las proporciones de diferentes elementos presentes en la superficie del Sol por medio de una espectroscopia. Como hemos visto, cada elemento produce un patrón de líneas característico en el espectro de luz del Sol, y la fuerza de esas líneas indica la cantidad de cada elemento presente. La otra técnica explora el interior del Sol utilizando la helio sismología. Como su nombre

indica, este proceso es equivalente al que emplean los geofísicos para estudiar el interior de la Tierra mediante la sismología. Las ondas sonoras del interior del Sol hacen vibrar la superficie, y esas vibraciones pueden ser calibradas por instrumentos sensibles. La naturaleza de las vibraciones indica a los astrónomos la densidad del interior del Sol, y también la velocidad del sonido a distintas profundidades del mismo. Esas propiedades dependen de la composición exacta del astro.

Hasta hace poco, ambas técnicas parecían decirnos que la metalicidad del Sol es inusualmente elevada en comparación con la metalicidad media de las estrellas situadas a la misma distancia que nosotros con respecto al centro de la galaxia. Esto resulta particularmente confuso, ya que los cálculos orbitales de Zwart señalan que, en cualquier caso, el grupo de estrellas en el cual nació nuestro Sol se formó en una región un poco más alejada del centro de la que nosotros ocupamos ahora. La explicación obvia es que la supernova que enriqueció el Sistema Solar con hierro-60 también enriqueció el Sol con otros elementos pesados. Eso haría mucho más fácil que el Sol formara una familia de planetas rocosos, a diferencia de las estrellas de nuestra región que no han sido enriquecidas de este modo.

Sin embargo, nuevas observaciones del espectro solar realizadas recientemente se han interpretado como un indicativo de una metalicidad menor de lo que sugerían estudios anteriores. Esas afirmaciones todavía no han sido corroboradas de forma inequívoca, pero aunque sean ciertas, nada ha cambiado las pruebas de la

heliosismología, de modo que la consecuencia sería que el Sol es más rico en metales en su interior que en la superficie. ¿Qué puede estar sucediendo?

La respuesta puede provenir de estudios de estrellas cercanas que son casi idénticas al Sol en tamaño y edad, los denominados «análogos solares». En comparación con la mayoría de esas estrellas, la superficie solar tiene una proporción inferior de elementos que se vaporizan (o condensan) a temperaturas más elevadas, como el calcio y el aluminio. Estos elementos refractarios, sin embargo, están presentes en proporciones mucho mayores en los meteoritos y los planetas rocosos del interior del Sistema Solar. El patrón puede explicarse si los elementos refractarios que pudieron entrar en la atmósfera del Sol en sus años de juventud intervinieron en la formación de los planetas rocosos parecidos a la Tierra, los denominados planetas terrestres. Y las pruebas que favorecen esta idea se originan en estudios de los análogos solares. Aquellos que tienen planetas gigantes orbitando cerca de ellos, donde habrían actuado para inhibir la formación de planetas terrestres, no muestran el patrón de refractarios que sí presenta el Sol. ¡Pero algunos de los análogos solares que no tienen planetas gigantes en órbitas próximas a ellos sí presentan una reducción de refractarios! Es tentador llegar a la conclusión de que esas estrellas, como el Sol, tienen familias de planetas rocosos. La reducción de refractarios parece ser la huella de la presencia de planetas terrestres. La buena noticia es que esto indica que existen otros planetas superficialmente similares a la Tierra.

Pero esta no es una noticia del todo buena. Aproximadamente solo un 10% de los análogos solares encajan en esta categoría. Si solo las estrellas con proporciones similares de refractarios respecto del Sol tienen familias de planetas terrestres, eso supone una mayor reducción en el número de posibles localizaciones de civilizaciones tecnológicas. El número ya se había reducido a un 0,6% de todas las estrellas de la galaxia; ahora ha quedado en un 0,06%. Es decir, solo 6 estrellas de cada 10 000 en la Vía Láctea. No intentaré cuantificar otras reducciones de esta cifra, pero merece la pena tener en cuenta que cada característica adicional que hace especial nuestro lugar en el universo reduce todavía más a las candidatas en esta proporción ya minúscula. Hay muchos de esos rasgos adicionales que hacen especial a nuestro Sistema Solar. Pero antes de considerarlos, habiendo descrito el nacimiento del Sol, es una lástima no completar la historia de su vida y su muerte, aunque eso no sea directamente relevante para las posibilidades de hallar otras inteligencias en la galaxia.

§. Hasta que el sol muera

Muchos relatos populares, e incluso algunos libros de texto, simplemente mencionan que el Sol se hinchará al envejecer y que se convertirá en una estrella roja gigante que engullirá los planetas interiores del Sistema Solar, entre ellos la Tierra. Esto es verdad hasta cierto punto; pero la historia completa es mucho más sutil e interesante de lo que estas simples crónicas dejan entrever.

Estrellas como el Sol mantienen su producción de energía convirtiendo hidrógeno en helio en su núcleo. El helio se acumula como una especie de ceniza estelar, así que, con el paso del tiempo, se desarrolla un núcleo central de helio donde el hidrógeno «se quema» en un corazón cada vez más grande compuesto de hidrógeno y helio. Ese es el motivo por el que la producción de calor solar se ha incrementado poco a poco en los 4.500 millones de años transcurridos desde que se formó, empujando gradualmente la zona habitable hacia fuera. Pero llega un momento en que no hay suficiente hidrógeno disponible en el núcleo para mantener este proceso, y sin el calor de la fusión nuclear, el núcleo se destruye. Al principio, el Sol estaba compuesto de un 30% de helio; hoy, el núcleo del Sol consiste en un 65% de helio y un 35% de hidrógeno. En unos 5.000 millones de años, no quedará hidrógeno en el centro, y el núcleo quedará destruido. Esto calienta más el núcleo a medida que la energía gravitacional se transforma en calor. El núcleo se instaura en una especie de estado «degenerado», que podemos concebir como una suerte de bola sólida de helio. Al mismo tiempo, el hidrógeno de estratos más externos de la estrella cae sobre el núcleo y empieza a «quemar» en un caparazón que lo rodea. El resultado es que fluye más calor desde el corazón de la estrella, y esto hace que lo que queda de las capas exteriores se hinche enormemente, de modo que la estrella se convierte en una gigante roja. Durante esta fase de su vida, una estrella ocupa una región del Diagrama de Hertzsprung-Russell conocida, lógicamente, como la rama de la gigante roja. Pero no se queda allí.

Cuando el caparazón de hidrógeno deposita más «ceniza» de helio en el núcleo, este mengua debido al peso adicional de material. Al encoger, se calienta. Al final, los núcleos de helio están tan comprimidos que empiezan a combinarse para formar carbono. El núcleo degenerado se comporta más como un sólido que como un gas, así que el calor de esta «quema de helio» se propaga rápidamente a través del núcleo, provocando una reacción en cadena conocida como el flash del helio. Al cabo de unos segundos, el núcleo explota. La energía liberada arranca las capas exteriores y lanza parte de la atmósfera de la estrella al espacio, reduciendo la presión, de modo que el núcleo ya no está degenerado. Todo esto estabiliza el núcleo una vez más, pero a una temperatura más alta que cuando era mantenido por la quema de hidrógeno. Entonces, la estrella adopta un estado más compacto de nuevo, con una quema de helio en el núcleo y un caparazón de hidrógeno ardiendo que rodea al núcleo. Pero la quema de helio no proporciona tanta energía como la de hidrógeno, y en el caso de una estrella que nace con la misma masa que nuestro Sol, el combustible de helio se agota en unos 150 millones de años.

En el caso de una estrella con la misma masa que el Sol, la quema de helio es el fin. Una vez que se agota el combustible de helio en el centro de la estrella, el núcleo vuelve a menguar, formando un núcleo de carbono degenerado rodeado de caparazones de helio e hidrógeno ardiendo. Las capas externas de la estrella se hinchan una vez más, pero las condiciones en el corazón de la estrella nunca son lo bastante extremas como para permitir otras fases de quema

nuclear. Cuando el suministro de hidrógeno y helio se agota, la estrella se convierte en una bola de material con una masa más o menos equivalente a la mitad de la del Sol actual, embutida en un bulbo sólido con el tamaño aproximado de la Tierra. Entonces se enfría, y los tenues estratos exteriores que quedan se asientan en lo que se ha convertido en una enana blanca.

En cuanto al destino de la Tierra, los factores clave son cuánto crecerá el Sol durante cada una de sus dos fases de vida como estrella gigante, y cuánta masa perderá por el camino. Si no tenemos en cuenta la pérdida de masa, los cálculos nos indican que la primera vez que se hinche para convertirse en una gigante roja, el Sol devorará a los planetas interiores Mercurio y Venus, mientras que la segunda vez que se expanda engullirá la Tierra y Marte. En otras palabras, el radio máximo de una estrella gigante con la misma cantidad de masa que el Sol actual es más grande que el radio de la órbita de Marte. Por eso, algunos libros nos dicen que la Tierra algún día será engullida por el Sol.

Pero la pérdida de masa complica más la situación, y la hace más interesante. Varios astrónomos de la Universidad de Sussex han indagado en las consecuencias con detalle. Puesto que una estrella como el Sol ya ha perdido alrededor de un 20% de su masa, cuando se convierta en una gigante roja su efecto gravitacional sobre la atmósfera será más débil, y eso significa que se expandirá ligeramente más que si no hubiera perdido masa, alcanzando un radio de 168 millones de km. ¡Sin embargo, para entonces, el efecto del debilitamiento de la fuerza gravitacional del Sol habrá permitido

que la órbita de la Tierra se expanda hasta una distancia de 185 millones de km! Cuando llegue al cénit de su segunda fase de expansión, unos cien millones de años después de su primera experiencia como gigante roja, el Sol habrá perdido tanta masa —aproximadamente un 30% de la masa que presenta a día de hoy— que solo alcanzará un radio máximo de 172 millones de km, mientras que la Tierra habrá llegado a los 220 millones. Esto se acerca mucho a la órbita actual de Marte.

O, mejor dicho, la Tierra se distanciará hasta ese punto, si es que todavía existe. Por desgracia, hay más factores a tener en cuenta: la resistencia y las mareas. A medida que el Sol se expande, las capas externas de su atmósfera se extienden más allá de la Tierra, y aunque esta región, conocida como la cromosfera, es muy tenue, será suficiente para arrastrar a nuestro planeta y forzarlo a avanzar lentamente en espiral hacia el Sol. Al mismo tiempo, cuando la Tierra orbite el Sol, que estará en proceso de expansión, levantará mareas en la superficie del astro que arrebatarán energía del movimiento orbital de la Tierra, manteniendo al planeta en su órbita y haciendo que el radio de esta mengüe. El efecto total es que la Tierra será engullida por el Sol dentro de unos 7.600 millones de años, más o menos medio millón de años antes de que el Sol alcance su tamaño máximo como gigante roja por primera vez y mucho antes de que se desvanezca para convertirse en una enana blanca en fase de enfriamiento.

§. Posponer el día del juicio final

Sin embargo, en lo que a las perspectivas de vida en la Tierra se refiere, esto es en gran medida irrelevante. El Sol ha aumentado gradualmente su luminosidad durante su vida, y sin embargo la temperatura en la superficie de la Tierra ha sido más o menos constante todo ese tiempo en la región donde puede existir agua líquida. La explicación es que la concentración de gases invernadero en la atmósfera, en especial el dióxido de carbono, ha disminuido lentamente, de modo que un efecto invernadero decreciente ha equilibrado un calor solar cada vez más intenso. Investigadores como Jim Lovelock señalan que este proceso ha llegado todo lo lejos que puede: si no se produjeran impactos humanos en la atmósfera, todo el dióxido de carbono desaparecería en un futuro cercano. Lovelock calcula que si la Tierra se calienta de acuerdo con el incremento de calor del Sol, en cien millones de años adquirirá un estado más extremo de lo que haya conocido la vida en nuestro planeta hasta el momento. La estimación más conservadora es que la Tierra será inhabitable dentro de mil millones de años. La verdadera situación es mucho peor, ya que en este momento estamos añadiendo dióxido de carbono y otros gases invernadero a la atmósfera y haciendo que el planeta se caliente más rápido; pero ignoraré eso por ahora.

En una escala de tiempo astronómica, lo primero que ocurrirá cuando la Tierra se caliente es que se evaporará más agua de los océanos. Puesto que el vapor de agua es un gas invernadero, acelerará el calentamiento hasta que los océanos hiervan. Pero eso no sucederá hasta dentro de miles de millones de años. Así que, si

nuestra civilización tecnológica sobrevive, o si una civilización tecnológica de otro planeta de la galaxia afronta un problema similar, hay mucho tiempo para resolverlo. Una posible solución al problema es cautivadoramente sencilla y solo precisa una tecnología un poco más avanzada de la que tenemos. Se trata de propulsar la Tierra en su órbita para alejarla del Sol cuando este se caliente.

El truco consiste en captar energía de un asteroide que pase y dársela a la Tierra, no una vez, sino repetidamente, a intervalos de unos 6.000 años. Por supuesto, el asteroide debería tener el tamaño adecuado y seguir la órbita propicia para que funcionara, y es ahí donde interviene la tecnología. Podría enviarse una sonda espacial al Cinturón de Kuiper, una región del Sistema Solar situada más allá de los planetas gigantes, densamente poblada de fragmentos de hielo y roca. Allí, podría ser utilizada para lanzar un trozo de material de unos cien kilómetros de envergadura a la órbita apropiada alrededor del Sol, de modo que pasara cerca de la Tierra. En ese encuentro cercano, la energía del movimiento orbital del asteroide daría un empujón a la Tierra, expandiendo su órbita mínimamente. El asteroide perdería energía y su órbita menguaría, pero eso no importa.

Lo que sí importa es que habría que hacer lo mismo cada 6.000 años durante cientos de millones de años. Tal vez sería posible situar el asteroide en una ruta en particular para que, una vez que pasara junto a la Tierra y retrocediera con respecto al Sol, girara en torno a alguno de los planetas gigantes, recuperando su energía perdida (a expensas de dicho planeta gigante, cuya órbita

disminuiría en una cantidad mínima) y preparándolo para otra pasada junto a la Tierra. O quizá sería posible enviar una máquina de Von Neumann que aguardara pacientemente en el Cinturón de Kuiper e hiciera lo necesario cada 6.000 años. Eso garantizaría que, aunque desapareciera la civilización, el trabajo de empujar la Tierra hacia fuera continuara. Pero aun así se necesitaría que pasara un fragmento de material con un diámetro cinco veces más grande que el que acabó con los dinosaurios a 15.000 km de la Tierra cada 6.000 años. Eso no deja demasiado margen de error. Desde luego, habría que tener mucha fe en una máquina de Von Neumann para poner en marcha un proyecto tan a largo plazo.

Por tanto, en principio la habitabilidad de la Tierra podría ampliarse a un futuro lejano, tal vez otros 6.000 millones de años, hasta que el Sol muera. Pero los peligros que entraña esta clase de solución tecnológica ponen de manifiesto otra característica inusual de nuestro lugar en el universo. Pese a lo que les ocurrió a los dinosaurios, nuestro Sistema Solar parece un lugar bastante ordenado, con una perfecta disposición de los planetas en órbitas circulares y cualquier fragmento de basura cósmica confinado al Cinturón de Kuiper y otra franja de detritos, el Cinturón de Asteroides, entre Marte y Júpiter. ¿Tenía que ser así? Probablemente no, pero el hecho de que lo hiciera es uno de los motivos por los que estamos aquí para formular tales preguntas.

Capítulo 4

¿Por qué es tan especial el sistema solar?

Contenido:

- §. Un calor insoportable*
- §. La geografía del sistema solar*
- §. Formación de los planetas*
- §. Formación del sistema solar*
- §. Formación de la tierra*
- §. El especial*

Lo primero que tiene de especial el Sistema Solar es que existe; en concreto, que existen los planetas rocosos, como la Tierra. Los planetas, sobre todo los rocosos, son los elementos más complicados —y, por tanto, también los más interesantes— que han estudiado tradicionalmente los astrónomos. Las únicas entidades del universo más complicadas son los seres vivos, y los astrónomos están empezando a considerar la vida en sí objeto de estudio dentro de la disciplina de la astrobiología. Cosas mucho más pequeñas que un ser humano, como los átomos y las moléculas simples de sustancias como el oxígeno y el agua, son capaces únicamente de un limitado abanico de interacciones, debido a su simplicidad. Un animal vivo es una entidad compleja capaz de desarrollar una amplia variedad de interacciones con su entorno, porque está formado de moléculas complejas como el ADN y las proteínas.

Un planeta vivo, como la Tierra, es aún más complejo y ofrece el escenario para que surja una compleja interacción de procesos astronómicos, geológicos, químicos y biológicos que funcionan de forma conjunta para mantener el sistema en su totalidad; en esto se basaba la concepción de James Lovelock según la cual la Tierra es una entidad viva individual, que él denomina Gea (Gaia). Un planeta como Venus o Marte puede carecer de la contribución biológica, pero sigue siendo un emplazamiento de procesos astronómicos, geológicos y químicos. Pero cuando nos hallamos ante un objeto del tamaño de una estrella (o incluso, en cierta medida, ante un planeta gigante como Júpiter) las cosas vuelven a simplificarse. Es así porque la fuerza gravitatoria en el interior de un objeto de estas características es tan grande, y la temperatura, tan elevada, que las moléculas complejas, e incluso los átomos, quedan destruidos; y las únicas interacciones que tienen lugar son las que afectan a los núcleos atómicos y a partículas tales como los protones, neutrones y electrones. Los planetas existen por poco, a medio camino entre dos extremos de simplicidad; y también existen por poco en otro sentido.

Estudios recientes realizados por el telescopio infrarrojo del observatorio espacial Spitzer han demostrado que cúmulos como el que alojó la formación del Sol pueden poner en peligro las perspectivas de supervivencia de los discos circunestelares de polvo en los que se forman los planetas rocosos. No podemos cuantificar completamente estos peligros, pero no por ello dejan de ser reales.

Salvo excepciones contadas y minúsculas, todo el material del Sistema Solar rota en la misma dirección. El propio Sol rota sobre su propio eje una vez cada poco más de veinticinco días; los planetas y asteroides giran alrededor del Sol en la misma dirección en que este rota, la misma dirección que escogen las distintas lunas para orbitar alrededor de sus planetas. Esto nos indica que el Sol, los planetas y las lunas se formaron juntos a partir de una sola nube de material que inició cierto movimiento de rotación general al azar. Cuando la nube menguó, tuvo que girar más deprisa (como el patinador sobre hielo que recoge los brazos) de modo que conservase la propiedad que denominamos *momento angular*. El momento angular depende de la masa de un objeto, de la velocidad a la que gira y de lo desplegado que esté. Para que el Sol se encogiese hasta alcanzar su tamaño actual, tuvo que perder momento angular. Una parte fue arrastrada por corrientes de materia que salía despedida del joven Sistema Solar, como el agua que expulsa un aspersor de jardín; sin embargo, otra parte quedó almacenada en un disco de polvo que rodeaba al joven Sol, pero se extendía a lo lejos en el espacio. Aquí es donde se formaron los planetas. Un planeta como Júpiter, alejado del centro del Sistema Solar, tiene mucho momento angular aunque su masa sea muy inferior a la del Sol. Este se quedó con la mayoría de la masa, pero los planetas acumularon la mayoría del momento angular.

Pero no todos los sistemas planetarios funcionan de un modo tan ordenado. En muchos sistemas que contienen júpiteres calientes, los planetas orbitan en la dirección contraria a la rotación de su

estrella madre. Probablemente, estas órbitas llamadas retrógradas se produjeron como consecuencia de interacciones gravitatorias entre los planetas y una estrella compañera lejana, en una órbita amplia alrededor de la estrella madre. Estas interacciones inclinarían y alargaría las órbitas de los planetas de estilo joviano y los trasladaría a órbitas muy elípticas en las que estos planetas perderían energía cada vez que pasasen cerca de la estrella madre y se viesan obligados a recorrer una órbita circular de «sentido contrario». Así se explica perfectamente la presencia de planetas jovianos orbitando cerca de sus estrellas madre; y esto significa también que, en sistemas de este tipo, cualquier planeta del estilo de la Tierra habría quedado destrozado en el proceso. Por tanto, estos sistemas no interesan a nuestra investigación sobre por qué estamos aquí, salvo para confirmar que solo las estrellas solitarias como el Sol es probable que brinden un hogar a formas de vida como nosotros.

Discos como aquel en el que se formaron los planetas de nuestro Sistema Solar pueden verse alrededor de algunas estrellas jóvenes, lo que confirma que nuestras ideas acerca del modo en que se formó el Sistema Solar son correctas. Se los conoce como discos protoplanetarios (PPD, por sus siglas en inglés) y, en algunos casos, se extienden hasta alejarse de su estrella madre una distancia que multiplica por más de mil la que hay entre la Tierra y el Sol; y por más de treinta, la que hay entre el Sol y Neptuno, el planeta mayor más alejado de nuestro Sol. Estos discos aún están perdiendo materia (y momento angular) que sale volando al espacio. En

muchos casos, las regiones interiores de los discos quedan deformadas por la influencia gravitatoria de planetas que se están formando dentro de ellas. Pero estos discos son bastante frágiles, para los estándares astronómicos, y pueden destruirse fácilmente antes de que los planetas —al menos, planetas como la Tierra— tengan la oportunidad de formarse. El problema surge en caso de que la estrella joven se forme demasiado cerca de una estrella masiva y caliente, que muy probablemente se encuentre en el tipo de cúmulos en los que se forman estrellas como el Sol.

§. Un calor insoportable

Las estrellas más masivas de la Secuencia Principal, las estrellas de tipo O, producen mucha radiación ultravioleta, que calienta cualquier gas y polvo situado en un disco alrededor de la estrella y lo hace salir volando al espacio. Esta es una de las razones, junto con la corta vida de una estrella de tipo O, de que las probabilidades de encontrar vida inteligente en un planeta que orbite alrededor de una de estas estrellas sean despreciables. Pero la radiación de una estrella O es tan potente que puede afectar a los discos que rodean a cualquier estrella menor de las inmediaciones. Hasta hace poco, era difícil cuantificar los límites hasta donde se extendía la zona de peligro en torno de una estrella O. Pero el observatorio Spitzer pudo identificar discos protoplanetarios alrededor de estrellas en la nebulosa Roseta, una región activa de formación de estrellas a unos 5.200 años luz de nosotros, en la dirección de la constelación Monoceros.

En otras regiones de la Vía Láctea, alejadas de cualquier estrella O, un poco menos de la mitad de todas las estrellas jóvenes con masas que oscilan entre una décima parte de la masa del Sol y cinco veces esta tienen discos de polvo a su alrededor. El equipo del Spitzer buscó estos discos alrededor de un millar de estrellas en la nebulosa Roseta, a diversas distancias de las estrellas O. Encontraron la misma proporción de discos protoplanetarios alrededor de estrellas alejadas al menos 1,6 años luz de cualquier estrella O; pero solo la mitad en los casos de estrellas más cercanas que esta de una estrella O; y los casos cada vez eran menos numerosos a medida que se acercaban a las estrellas O. Por comparación, la estrella más cercana al Sol hoy día, Próxima Centauri, está a más de cuatro años luz de nosotros. La consecuencia es, por tanto, que toda estrella joven que pase a menos de un año luz de una estrella O probablemente vea cómo se le evapora el disco de polvo, en un periodo temporal de unos cien mil años. Esto acabaría con cualquier perspectiva de formación de planetas rocosos como la Tierra. Pero si los planetas gigantes como Júpiter, o como los «super júpiteres» que se han visto orbitando alrededor de algunas estrellas, se habían formado ya antes del encuentro a corta distancia, entonces no acabarían destruidos por la radiación ultravioleta. Seguirían allí bastante después de que las estrellas O se hubieran consumido y el peligro hubiera pasado. Valga para recordar que detectar super júpiteres no implica, necesariamente, la existencia de otras Tierras.

El Sol tuvo la suerte de haber nacido en un cúmulo relativamente pequeño y relativamente difuso, en el que este tipo de encuentros cercanos con una estrella O no sucedían. A partir de la notable circularidad de todas las órbitas de los planetas y otros objetos del Sistema Solar, hasta Neptuno (y, de hecho, más allá), podemos inferir hasta qué punto era pequeño y difuso este cúmulo.

Por ahora, demos por sentado que en efecto los planetas del Sistema Solar se formaron en un disco de polvo, en órbitas casi circulares; la explicación de cómo se formaron vendrá enseguida. Durante los primeros estadios de este proceso, las estrellas del joven cúmulo estaban tan cerca unas de otras que habría sido bastante fácil que una de ellas pasase junto a otra en un radio inferior a la distancia que hay hoy entre el Sol y Neptuno. Esto es lo que tuvo que sucederles a algunos de los sistemas del cúmulo en los que se producía una formación de planetas, lo que indudablemente alteró las órbitas de los planetas. De hecho, en nuestro Sistema Solar, las órbitas de muchos de los cometas que se encuentran a una distancia más de 50 veces superior a la que hay entre la Tierra y el Sol (50 UA, unidades astronómicas) son marcadamente elípticas y se inclinan en diversos ángulos con respecto al plano en el que orbitan los planetas. Algo los ha desplazado. Estos objetos están demasiado lejos del Sol como para que les afecte la gravedad de los planetas —incluso la de Júpiter—, así que la alteración tiene que provenir de la gravedad de una estrella que ha pasado muy cerca de ellas, pero no lo bastante para afectar las órbitas de los planetas. Esto supone una distancia de paso de cerca de un millar de UA,

pero la circularidad de las órbitas planetarias descarta la posibilidad de que el Sol haya sufrido un encuentro con una estrella que se acercase a menos de 100 UA desde la formación del Sistema Solar.

Si tenemos en cuenta la frecuencia de los encuentros estelares en el cúmulo en el que se formó el Sol, que depende de la densidad del cúmulo, así como el tiempo que el cúmulo necesita para desvanecerse, estas cifras suponen que el cúmulo estaba a menos de tres años luz, y contaba con una densidad de estrellas relativamente escasa: de tan solo unas 3.500 estrellas en todo el cúmulo, a juzgar por los datos de radiactividad a los que nos referimos en el capítulo anterior. La combinación de vecinos explosivos, estrellas O y encuentros cercanos hace que cualquier cosa mucho más grande o más poblada que esta se convierta en un emplazamiento improbable para que se forme un sistema planetario ordenado como nuestro Sistema Solar. Además, esto subraya la especial naturaleza de nuestro lugar en la Vía Láctea. No obstante, para ver cuán especial es nuestro Sistema Solar, primero tenemos que conocer un poco mejor la distribución de los planetas y otros objetos que orbitan alrededor del Sol.

§. La geografía del sistema solar

Además del Sol, hoy día el Sistema Solar está formado por cuatro componentes: los planetas rocosos como la Tierra, los desechos rocosos menores conocidos como *asteroides*, los planetas gaseosos gigantes y los escombros helados entre los que se incluyen los

planetas enanos como Plutón y los progenitores de los cometas. Mercurio, el planeta más próximo al Sol, orbita a una distancia media de solo 0,39 UA, pero tiene una órbita elíptica que, en el paso más próximo al Sol, lo acerca a 46 millones de kilómetros y, en el más lejano, lo lleva a 70 millones de kilómetros. Tarda 88 días terrestres en dar una vuelta completa al Sol, pero gira sobre su propio eje solo una vez cada 58,6 días terrestres, atrapado por una fuerza de atracción gravitatoria que hace que cada rotación de Mercurio dure exactamente dos tercios de su año. Al estar tan cerca del Sol, en la cara diurna del planeta la temperatura supera los 450 °C; pero como en Mercurio no hay atmósfera que desplace el calor de un lado al otro del planeta, durante la prolongada noche la temperatura en el lado oscuro cae hasta los 180 bajo cero. Con un diámetro de 4.880 kilómetros, Mercurio solo supera en un 50% el tamaño de nuestra Luna y, como ella, está cubierto de cráteres que prueban la existencia de una fase de intenso bombardeo cuando el Sistema Solar era joven. El mayor de los cráteres, la cuenca de Caloris, tiene un diámetro de 1.340 kilómetros y tuvo que producirse a consecuencia del impacto de un objeto cuyo diámetro tendría unos 150 kilómetros. En planetas como Mercurio, desde luego, es muy improbable que vayamos a encontrar civilizaciones tecnológicas.

Durante mucho tiempo, Venus, el segundo planeta en girar alrededor del Sol, se consideró un hogar probable para la vida. Por su tamaño, Venus está muy cerca de ser un gemelo de la Tierra, con un diámetro de 12.100 kilómetros, tan solo 650 kilómetros menos

que el de la Tierra. Está cubierto por una espesa capa de nubes que impide a los telescopios ópticos observar la superficie del planeta y esta incertidumbre alentó las conjeturas que sostenían que quizá la nube ocultase océanos y continentes como los de la Tierra, tal vez henchidos de vida tropical. Desgraciadamente para la concepción romántica de Venus, ahora las sondas espaciales han aterrizado en su superficie: allí, la presión de la densa atmósfera de dióxido de carbono multiplica por 90 la presión del aire al nivel del mar en la Tierra y, gracias a un fuerte efecto invernadero, la temperatura supera los 500 °C. La cartografía por radar de la superficie nos indica que tiene valles y colinas, pero que todo es roca desnuda, sin rastro ninguno de agua o de vida.

No hay nada extraño en la órbita de Venus, que es prácticamente circular, con un radio de 0,72 UA (108 millones de kilómetros), de forma que Venus tarda 225 días de los nuestros en completar una vuelta alrededor del Sol. Pero sí hay algo extraño en la rotación del planeta; es el único en todo el Sistema Solar que gira de este a oeste, al revés que la rotación de la Tierra. Lo hace muy despacio: tarda 243 días terrestres en girar una vez sobre su propio eje. La explicación más probable es que, en algún momento de su historia, Venus recibió un golpe formidable que cambió el sentido del giro que había heredado de la formación del Sistema Solar. Y, aunque no hay duda de que Venus no alberga vida, un impacto como ese podría haber tenido consecuencias cruciales para la vida en la Tierra, que describiremos en el capítulo 6.

La Tierra, claro está, orbita en torno del Sol a la distancia de 1 UA (149 597 870kilómetros) una vez cada 365,242199 días. La temperatura media en la superficie de la Tierra es de unos 15 °C, cifra que permite sin problemas la presencia de agua líquida, y el aire está lleno de oxígeno, un factor clave que posibilita la existencia de formas de vida energéticas como nosotros.

Marte, el siguiente planeta del Sistema Solar, está tentadoramente cerca de poder albergar formas de vida como nosotros. Situado aproximadamente un 50% más lejos del Sol que nosotros, Marte tiene una órbita ligeramente elíptica que lo acerca hasta 1,38 UA del Sol y lo aleja hasta 1,67 UA. Su tamaño es poco más de la mitad del de la Tierra, con un diámetro de 6790 kilómetros, su masa se limita a poco más de una décima parte de la terrestre. En parte debido a esta escasez de masa, solamente ha sido capaz de retener una atmósfera débil, fundamentalmente de dióxido de carbono; en la superficie de Marte, la presión es la misma que en nuestra atmósfera 335 kilómetros sobre el nivel del mar.

Es una coincidencia que en Marte el día dure casi lo mismo que en la Tierra: 24 horas y 37 minutos, frente a nuestras 23 horas y 56 minutos. Pero Marte tarda 687 días terrestres en orbitar una vez alrededor del Sol. Las temperaturas de Marte oscilan, en la actualidad, entre los 26 °C bajo cero y los 110 °C bajo cero; son demasiado frías para que exista agua corriente. Pero hay pruebas de que, en el pasado, Marte sí tuvo agua líquida, que esculpió canales en la superficie. Es casi seguro que esto sucedió así porque antes, cuando era un planeta joven, Marte tuvo una atmósfera más gruesa

que provocó un efecto invernadero lo suficientemente fuerte como para mantener las temperaturas por encima del punto de congelación, pese a la distancia que mantiene con el Sol. El destino de esta atmósfera también nos brinda otra clave importante para resolver la cuestión de la escasez de civilizaciones inteligentes y tecnológicas en la Vía Láctea. No se perdió solo porque la gravedad de Marte fuese débil. Este planeta tampoco dispone de un campo magnético fuerte, lo que significa que nada lo protegía de las partículas con carga eléctrica que emanan del Sol —el viento solar—, que erosionaron su atmósfera hace miles de millones de años. El campo magnético de la Tierra es fuerte y, al parecer, ha sido un factor decisivo para que nuestro planeta cuente con condiciones adecuadas para mantener la vida el tiempo suficiente para que se desarrolle la inteligencia.

Más allá de la órbita de Marte hay una región del Sistema Solar llena de escombros que quedaron allí como sobras de la formación de los planetas. Estos fragmentos constituyen un disco delgado, conocido como el Cinturón de Asteroides, que se extiende desde 1,7 UA a unas 4 UA. Contiene más de un millón de asteroides, todos ellos de al menos un kilómetro de diámetro, e incontables piezas menores, algunas tan pequeñas como granos de arena. Pero solo hay diez asteroides que superen los 250 kilómetros de anchura. El mayor de todos es Ceres, que tiene un diámetro de 933 kilómetros y contiene más de una cuarta parte de la masa total del Cinturón de Asteroides; orbita alrededor del Sol una vez cada 4,6 años terrestres, a una distancia de 2,8 UA. Junto con los siguientes dos

asteroides mayores, Vesta y Palas, Ceres podría representar el tipo de componente básico a partir del cual se formaron los planetas. Una pequeña parte de los escombros cósmicos menores se encuentra en órbitas elípticas que hacen que los fragmentos rocosos pasen más cerca del Sol que la Tierra, y así, en este camino, cruzan nuestra órbita. Si coincide que la Tierra está en el paso, entran en nuestra atmósfera a gran velocidad. Las partículas menores arden en la atmósfera como meteoros; los fragmentos rocosos más grandes pueden llegar a impactar en el suelo, como meteoritos.

Si reuniésemos la masa de todos los asteroides no llegaría siquiera a formar un planeta como Mercurio, pero los fragmentos rocosos del Cinturón de Asteroides que caen a la Tierra como meteoritos demuestran que buena parte de este material fue parte de un objeto mayor (o quizá varios objetos) en los primeros tiempos de vida del Sistema Solar, que se rompió (o rompieron) durante los procesos de formación de los cuatro planetas rocosos restantes. Esta es una clave importante para definir cómo se formaron los planetas. Otra clave importante la señala el emplazamiento del Cinturón de Asteroides, que depende de la influencia gravitatoria del siguiente planeta en la órbita solar: el gigante gaseoso Júpiter.

Júpiter es tan grande que ejerce su influencia sobre toda la estructura del Sistema Solar y es clave para comprender la razón por la que estamos aquí. Su masa equivale al 0,1% de la masa solar, lo cual no parece demasiado para los estándares estelares, pero corresponde a 317 veces la masa de la Tierra y es más del doble de la masa de todos los demás planetas del Sistema Solar juntos. Con

un diámetro que es once veces el de la Tierra, el volumen de Júpiter multiplica por más de 1300 el de nuestro planeta madre. Orbita alrededor del Sol cada 11,86 años terrestres, a una distancia de 5,2 UA, y en su paso más cercano a la Tierra dista de ella 590 millones de kilómetros.

La mayoría de la masa de Júpiter se presenta en forma de hidrógeno y, en un grado menor, helio, por lo que su composición se asemeja más a la de una estrella fallida que a un planeta rocoso como la Tierra. También se parece a una estrella como el Sol en otro sentido: debido a su enorme atracción gravitatoria, tiene un séquito de objetos menores que orbitan a su alrededor, del mismo modo que los planetas orbitan en torno del Sol. Las cuatro lunas mayores fueron descubiertas por Galileo y, hace 400 años, la prueba de que estas lunas orbitaban alrededor de Júpiter y no de la Tierra contribuyó a convencer a la gente de que la Tierra no era el centro del universo.

Más allá de Júpiter hay otros tres planetas gigantes, todos ellos fascinantes por sí mismos, pero que solo poseen una importancia marginal para la historia de la vida en la Tierra. Saturno, famoso por su espectacular sistema de anillos, orbita alrededor del Sol una vez cada 29,46 años terrestres a una distancia de 9,5 UA y cuenta con un diámetro de 120.536 kilómetros —ligeramente superior a nueve veces el de la Tierra— y una masa que es 95 veces la de la Tierra. Urano, el siguiente planeta partiendo desde el Sol, tiene una órbita ligeramente elíptica, cuya distancia mínima con respecto al Sol es de 18,3 UA y la máxima, de 20,1 UA. Tarda 84 años en

completar una órbita. La masa de Urano es 8,7 veces la de la Tierra y el diámetro solo unas cuatro veces el nuestro; de este modo, es un planeta pequeño, para ser un gigante gaseoso. Algunos astrónomos prefieren denominarlo «gigante de hielo», igual que a Neptuno, el último planeta mayor del Sistema Solar, que órbita en torno del Sol a una distancia de 30 UA. Neptuno, que tarda 165 años terrestres en completar una órbita solar, tiene un diámetro que multiplica por 3,8 el de la Tierra (similar al de Urano, por ende), pero una masa que es 17 veces la nuestra (y duplica la de Urano).

Más allá de Neptuno hay una réplica del Cinturón de Asteroides: una región conocida como Cinturón de Kuiper, que se extiende en la franja que va de las 30 UA a las 50 UA desde el Sol. Está formado por materiales sobrantes de la formación del Sistema Solar y, al encontrarse tan alejado del Sol, la mayor parte de su material aparece en forma de hielo; no solo agua helada, sino también cosas como amoníaco y metano congelados. Análisis estadísticos de las órbitas de los Objetos observados en el Cinturón de Kuiper (KBO, por sus siglas en inglés) apuntan que hay al menos 70.000 de ellos con diámetros superiores a un kilómetro, y que cerca de la mitad tienen diámetros superiores a los 100 kilómetros. De estos objetos, los mayores son conocidos como *planetas enanos*; entre ellos se incluye Plutón, con un diámetro de 2.300 kilómetros. Se lo solía considerar planeta por derecho propio, pero ahora sabemos que es menor que algunos otros objetos del Cinturón de Kuiper. Sin embargo, si reuniéramos toda la masa de todos los objetos del Cinturón, solo conseguiríamos un total equivalente a 40 veces la

masa de la Tierra; esto es: menos que la mitad de la masa de Saturno.

Aún más lejos del Cinturón de Kuiper, llegamos al borde del Sistema Solar. El análisis de las órbitas de los cometas demuestra que muchos de ellos provienen de alguna parte muy lejana en el espacio, donde, para poder explicar las observaciones, debe existir una cáscara esférica, o una nube de esa forma, alrededor del Sistema Solar, a una distancia de entre 50.000 y 100.000 UA (¡entre 0,75 y 1,5 años luz!) del Sol. Allí, una masa similar a la que hay en el Cinturón de Kuiper se reparte entre varios billones de objetos dispersos, a decenas de millones de kilómetros los unos de los otros, que navegan alrededor del Sol en sus solitarias órbitas circulares. Este lugar se conoce como la Nube de Oort. Estos objetos de la Nube de Oort están como a un tercio de la distancia que hay hasta la estrella más cercana y, aunque se sostienen más o menos por la débil fuerza de atracción gravitatoria del Sol, de vez en cuando, la interacción derivada del paso de estrellas o nubes de gas interestelar hace que algunos de estos objetos helados caigan hacia el Sol, donde se calientan, emiten nubes de abundante gas y se convierten en cometas.

§. Formación de los planetas

Pertrechados con este conocimiento de la geografía del Sistema Solar, ya podemos empezar a comprender cómo se formaron los planetas y por qué el Sistema Solar es especial. Si hacemos el viaje de vuelta desde la Nube de Oort, la clave para entender esto está en

el modo en que se formaron los planetas gigantes y, en especial, el papel que representó Júpiter.

Los planetas gigantes no se pudieron formar solo a base de pegar fragmentos menores de material hasta construir un gigantesco planeta gaseoso (o de hielo). Un trozo de roca con varias veces la masa de la Tierra, en la órbita de Júpiter o más allá, sin duda podría atraer gas de una nube como aquella en la que se formó el Sol hasta alcanzar el tamaño de los gigantes; pero en formar planetas como Urano y Neptuno de esta forma y en sus órbitas actuales se tardaría más tiempo del que ha vivido nuestro Sistema Solar, porque tan lejos del Sol había poco gas disponible. La única alternativa es que los cuatro planetas gigantes se formasen más cerca del Sol de lo que hoy se encuentra Saturno, pero más lejos que la órbita actual de Júpiter, donde había una abundancia de gas pero también hacía suficiente frío como para que existiera material congelado. Se habrían formado estando cerca unos de otros, en una nube de gas llena de planetesimales compuestos de roca y de hielo. Fue solo una casualidad que de aquel tumulto emergieran cuatro gigantes. Aunque, por fuerza, uno de los cuatro tenía que ser mayor que los demás y dominar las dinámicas orbitales del sistema por medio de su influencia gravitatoria, no había nada de inevitable en la forma en que Júpiter se hizo mucho más grande que el resto de planetas juntos; es tan solo otro más de los rasgos que distinguen nuestro Sistema Solar de otros sistemas planetarios.

Las simulaciones por ordenador muestran que, en estas circunstancias, la órbita del planeta mayor (Júpiter) se mueve

espacio hacia el interior, hacia el Sol, mientras que las órbitas de los tres planetas menores (Saturno, Urano y Neptuno) se mueven lentamente hacia el exterior, conservando momento angular. Al principio, este proceso se desarrolla suavemente, sin brusquedades. Pero unos 700 millones de años después de que se formase el Sistema Solar, este pasó por lo que se conoce como *resonancia*: una situación en la que Saturno tarda exactamente el doble que Júpiter en completar una vuelta alrededor del Sol. En esta circunstancia, la influencia combinada de Júpiter y Saturno genera una influencia poderosa y rítmica sobre los planetas menores del Sistema Solar exterior. La simulación nos indica que, como consecuencia, Urano y Neptuno se alejaron de repente del Sol; la órbita de Neptuno creció hasta doblar su tamaño y envió al planeta a la región interior de lo que entonces era un Cinturón de Kuiper mucho más extenso. Estas alteraciones sacudieron a los objetos menores del Sistema Solar exterior: muchos de ellos cayeron hacia el Sol, donde una gran parte se estrellaron contra los planetas interiores, mientras otros fueron expulsados hacia el exterior, a las profundidades del espacio; y unos pocos fueron a parar cerca de los gigantes, que los capturaron y los convirtieron en sus lunas. Solo después de este agitado intervalo, los planetas gigantes desarrollaron órbitas razonablemente estables y parecidas a las actuales; aun cuando, de hecho, en el Sistema Solar no existe ninguna órbita totalmente estable.

Pero las simulaciones también indican que los sistemas planetarios bien ordenados, como el nuestro, son escasos. Cuando unos investigadores de la universidad estadounidense de Northwestern

realizaron decenas de simulaciones que empezaban con un disco de gas y polvo alrededor de una estrella como el Sol y acababan con planetas, descubrieron que, en la mayoría de casos, el producto final estaba «lleno de dramatismo y violencia»; los júpiteres calientes eran habituales y los planetas, por lo general, describían órbitas elípticas e inestables. «Estos otros sistemas planetarios no se parecen en nada al Sistema Solar... Para que aparezca un sistema como el Sistema Solar deben darse las condiciones precisas». La «inmensa mayoría» de los sistemas planetarios son, según estos autores, «muy distintos» del nuestro.

En nuestro Sistema Solar, sin embargo, el intenso bombardeo del Sistema Solar interior durante la reorganización de las órbitas de los planetas gigantes determinó en esencia el fin de la formación de los planetas rocosos, incluida la Tierra. El principio de su formación se dio cuando la nube de materiales sobrantes de la formación del Sol se asentó en un disco alrededor de la joven estrella. La mayoría del material de la nube, como el material del propio Sol, se manifestaba en forma de hidrógeno y helio. Pero había un rastro de polvo, que no superaba el 2% del material de origen, en forma de partículas tan finas como las del humo de un cigarrillo. El calor del joven Sol hizo que se alejara buena parte del gas, pero la rotación de la nube original garantizó que el polvo se asentara formando un disco alrededor del joven Sol: un disco protoplanetario como los que hoy día vemos alrededor de estrellas jóvenes.

Dentro del disco, todas las partículas se movían en la misma dirección alrededor del Sol, como los corredores que dan vueltas a

una pista. Esto significa que, cuando chocaban unas con otras, lo hacían con relativa suavidad; no se producían colisiones frontales y, de este modo, las partículas tenían la oportunidad de pegarse unas a otras. Quizá la tendencia a pegarse contase con la ayuda de fuerzas eléctricas producidas por la fricción entre partículas, del mismo modo que nosotros podemos hacer que el globo de un niño se pegue al techo después de frotarlo contra un jersey de lana. Otro factor importante fue la turbulencia dentro del gas, que generaba estructuras arremolinadas como torbellinos que reunían los fragmentos de material y les daban la oportunidad de interactuar. Las simulaciones por ordenador nos muestran el modo en que, siguiendo este patrón, pueden formarse objetos tan grandes como Ceres; siempre y cuando las partículas puedan pegarse las unas a las otras.

Quizá hubo algo más que ayudase a las partículas en su proceso de unión; algo específico del Sistema Solar. Los estudios de fragmentos de rocas provenientes de meteoritos indican que el disco de polvo que giraba alrededor del joven Sol contenía glóbulos diminutos de material, conocidos como cóndrulos, formados a partir de la fusión a temperaturas entre los 1.200 y los 1.600 °C. Las gotas fundidas, en todo o en parte, serían más pegajosas y favorecerían la formación de trozos de materia más grandes dentro del disco. ¿Pero cómo se calentaron tanto? La explicación más probable es que el calor fue liberado por elementos radiactivos que, tras la agonía de una estrella cercana, salieron despedidos hacia la nube de gas en la que se formaron los planetas. Una posibilidad, que encaja con las

pruebas analizadas en el capítulo 3, es que una supernova explotase cerca de la nube que se convertiría en el Sol justo antes de la formación de esta estrella; es posible, incluso, que la onda expansiva de esta explosión provocase el colapso de la nube de gas que dio origen al Sol y el Sistema Solar. Hay pruebas a favor de esta idea en la medición de las proporciones de varios isótopos hallados en los meteoritos. El aluminio-26, radiactivo, parece haber estado presente en el proto-Sistema Solar desde el principio, pero cerca de un millón de años después, llegó un pulso de hierro-60. Esto encaja con lo que sabemos del destino de una estrella muy grande, cuya masa multiplica por más de treinta veces la del Sol. En los últimos estadios de su vida, la estrella empieza por deshacerse de buena parte de las capas externas de material, que para entonces son relativamente ricas en aluminio-26, en un viento cuya fuerza es suficiente para provocar fácilmente el colapso de una nube de gas cercana. La estrella solo explotará en el último momento de su vida y entonces rociará las inmediaciones con elementos entre los que aparece el hierro-60.

Hay también una idea distinta, desarrollada en Barcelona por Josep M. Trigo-Rodríguez y sus colegas, según la cual el material radiactivo se introdujo en el Sistema Solar mientras se formaba a partir de una estrella mucho menor que se acercó mucho más al Sol. La proporción adecuada de isótopos podría haber llegado al viento de material expulsado por una estrella que tuviera tan solo seis veces la masa de nuestro Sol, si había alcanzado los últimos estadios de su vida. Pero la estrella debería haberse encontrado muy

cerca del Sol para que esto funcionase —a una distancia inferior a 10 años luz—, lo que convierte este suceso en algo improbable, al menos desde el punto de vista de la estadística.

Lo importante es que ambos escenarios son improbables, pero, según parece, para que se formasen los planetas rocosos tuvo que suceder algo similar. La conclusión es que, aunque otros sistemas puedan contener planetas gigantes y escombros cósmicos rocosos que formen extensos cinturones de asteroides, los sistemas como el nuestro —con unos pocos planetas gigantes y unos pocos planetas del tamaño de la Tierra— podrían escasear.

No obstante, la buena noticia es que, una vez se han desarrollado objetos del tamaño de un kilómetro, aproximadamente —y eso parece que sucedió antes de que se cumplieran 100.000 años de la formación del Sol—, el resto del proceso de formación de planetas, aunque alambicado, es fácil de explicar.

§. Formación del sistema solar

Douglas Lin, de la Universidad de California en Santa Cruz, ha estudiado con detalle qué les sucede a los trozos de material sólido que se acumulan en el disco que rodea una estrella joven como el Sol. Un rasgo fundamental de sus cálculos es la forma en que los objetos sólidos interactúan con el gas que aún está presente en el disco durante los primeros estadios de la formación del planeta. Debido a la interacción entre la presión, la gravedad y la rotación, el gas, a cualquier distancia dada desde la estrella central, se mueve alrededor de esta a una velocidad ligeramente más lenta que aquella

a la que viajan por sus órbitas las partículas y los fragmentos de material. Esto significa que las partículas adelantan al gas; de hecho, en palabras de Lin, «chocan con un viento contrario que las ralentiza y provoca que giren en un movimiento de espiral hacia el interior, hacia la estrella». Un trozo de material de un metro de diámetro puede reducir su distancia con la estrella a la mitad, de este modo, en solo mil años; y cuanto más crecen los fragmentos, más rápido avanzan hacia el interior. Ahora bien: hasta cierto punto.

A este punto se lo conoce con el pintoresco sobrenombre de «línea de nieve». Es la distancia desde la estrella donde sustancias volátiles como el amoníaco, el agua congelada y otras se evaporan; en el caso del Sol, esto sucede a una distancia de entre 2 y 4 UA, entre las órbitas de Marte y Júpiter. Por eso el límite entre los planetas rocosos y los objetos helados de nuestro Sistema Solar está precisamente donde está.

En la línea de nieve, el vapor de agua liberado por los granos helados cuando se evaporan cambia las propiedades del gas, de modo que ahora rota más deprisa que los granos sólidos y les da un impulso que tiende a hacer que estos se muevan hacia el exterior de sus órbitas. Así que, en la línea de nieve se acumula material, los granos se van acercando cada vez más entre ellos y pueden formar rápidamente trozos de mayor tamaño. Un millón de años después de la formación del Sol, muchos de estos fragmentos tienen una anchura próxima a un kilómetro y queda muy poco polvo. A medida que van creciendo, y que el gas se va disipando de la parte interna

del disco por el calor del Sol, los planetesimales —que es lo que son ahora— reciben una influencia menor de la interacción con el gas y muchos de ellos emigran hacia el interior, en dirección al Sol, y entran en la región en la que hoy se encuentran los planetas rocosos. La posición exacta que acaban teniendo los planetas cuando estas migraciones acaban depende de muchos factores, como la temperatura en las distintas regiones del disco y el tamaño del planeta; sin embargo, el panorama general está claro, después de muchas simulaciones por ordenador.

Los planetesimales reúnen el resto del polvo gravitatoriamente y chocan y se funden entre ellos; los supervivientes se establecerán en órbitas aproximadamente circulares que ya han quedado libres de escombros. Pueden quedar todavía trozos de materia residual después de las colisiones, en forma de algunos de los asteroides. Como en las zonas más alejadas del Sol hay más polvo del que alimentarse, los planetas embrionarios crecen más cuanto más lejos están. Según los cálculos de Lin, a una distancia de 1 UA del Sol, un embrión de planeta puede crecer hasta alcanzar una décima parte de la masa terrestre en 100.000 años, pero entonces todo el polvo disponible se habrá terminado; a una distancia de 5 UA, hay más polvo y un embrión puede seguir creciendo durante unos pocos millones de años hasta cuadruplicar, aproximadamente, la masa de la Tierra. Pero la historia no termina aquí. Lin señala una cuestión interesante: en nuestro Sistema Solar, hoy, no hay sitio para más planetas; nuestros planetas están todo lo cerca unos de otros que permite la compleja interacción mutua de las fuerzas gravitatorias.

Es muy probable que, cuando el Sistema Solar era joven, se formaran más planetas; pero el excedente fue expulsado de las órbitas inestables antes de que se fijara este modelo estable actual. No puede ser una coincidencia que Júpiter, el planeta más grande de nuestro Sistema Solar, se encuentre justo al otro lado de la línea de nieve; pero los astrónomos aún no han podido explicar cómo un planeta del tamaño de Júpiter terminó en una órbita estable en ese lugar. Las interacciones entre un planeta embrionario en la zona exterior del Sistema Solar y el gas del disco, aún importantes a esa distancia del Sol, explican por qué el incipiente Júpiter acabó tan cerca de la línea de nieve y acumuló una gran cantidad de gas a partir del material disponible en su zona. Pero ¿qué impidió que se moviera en espiral hacia el interior, hasta una órbita similar a la de los muchos «júpiteres calientes» que se han descubierto ahora? Si hubiera sucedido así, habría empujado a cualquier planeta rocoso de la zona interior del Sistema Solar hacia el Sol, por delante de sí. Una vez formado Júpiter, este planeta ayudó a los demás planetas gigantes a formarse al detener el flujo de material hacia el interior del disco y al modificar la órbita de los planetesimales de modo que muchos de ellos emigraron a la parte exterior del Sistema Solar. El primer efecto ayudó en la formación del segundo gigante gaseoso: Saturno; el segundo generó suficientes fragmentos congelados como para formar los enormes núcleos de los gigantes de hielo, Urano y Neptuno. Todo esto, antes de los procesos que mandarían a los planetas gigantes a sus órbitas actuales y alterarían el Cinturón de Kuiper, solo requirió de 10 millones de años, después de la

formación del Sol. Pero la formación de la Tierra duraría mucho más.

§. Formación de la tierra

Las simulaciones por ordenador muestran que aproximadamente un millón de años después del colapso de la nube a partir de la cual se formaron el Sol y los planetas, debía de haber entre veinte y treinta objetos en la región situada entre el Sol y la órbita actual de Marte, con tamaños comprendidos entre la Luna (un 27%, más o menos, del diámetro actual de la Tierra) y Marte (un 53%, aproximadamente, del diámetro terrestre). Estarían acompañados por un elevado número de planetesimales menores, barridos en una serie de colisiones por los objetos mayores que, a su vez, habrían chocado entre ellos y se habrían ido fundiendo entre sí hasta que, al final, quedaron solo cuatro o cinco; los objetos que se convertirían en Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, además de otro objeto del tamaño de Marte. El calor del joven Sol habría destruido las moléculas complejas y expulsado los gases hacia el exterior, de modo que estos cuatro protoplanetas (más uno) estarían formados principalmente por hierro y silicatos, más compuestos estables de carbono.

Pero aunque Mercurio y Venus no tengan ningún satélite, y Marte cuenta solo con dos satélites minúsculos —fragmentos de roca de forma irregular, apresados del Cinturón de Asteroides por el campo gravitatorio del planeta—, la Tierra cuenta con una luna que es la mayor, en la proporción con su planeta madre, de cuantos satélites

tenga ninguno de los ocho planetas principales del Sistema Solar. Para un astrónomo, los tamaños son tan similares que el sistema Tierra-Luna debe considerarse más propiamente como un doble planeta. Así pues, ¿cómo se formó un sistema tan inusual?

La explicación más probable es que la Tierra empezase su vida como gemelo casi idéntico de Venus, con una gruesa corteza rocosa, mientras otro objeto planetario, de las dimensiones de Marte aproximadamente, se formaba en los alrededores. El emplazamiento más probable para la formación de este planeta se hallaría en uno de los dos lugares conocidos como puntos de Lagrange. Estos se hallan a 60 grados por delante o por detrás de la Tierra, pero en la misma órbita alrededor del Sol. Son lugares en los que el efecto combinado de las fuerzas de atracción respectivas del Sol y la Tierra genera una especie de sima gravitatoria, un lugar en el que los objetos menores pueden acumularse y permanecer durante mucho tiempo. Los puntos de Lagrange se usan hoy como plazas de aparcamiento estable para satélites como por ejemplo el telescopio de infrarrojos Herschel, que debe mantenerse lo suficientemente lejos de la Tierra para no sufrir la interferencia de las radiaciones de nuestro planeta, naturales o provocadas por el hombre. Un cuerpo pequeño que no está exactamente en un punto de Lagrange se balancea ligeramente adelante y atrás del punto en cuestión, como un péndulo; en estos puntos, hay que ajustar de vez en cuando las órbitas de los satélites artificiales, usando los motores del cohete, para mantenerlos en su sitio. Pero si cerca de uno de los puntos de Lagrange de la órbita terrestre se formase un objeto natural grande

a partir de los escombros cósmicos, entonces estas oscilaciones serían cada vez mayores y pronto llegarían a tal extremo que el objeto chocaría contra la Tierra. Esto habría sucedido durante los 50 millones de años que siguieron a la formación de la corteza original de la Tierra.

El nombre de este hipotético protoplaneta es Tea (Theia), por la diosa griega que alumbró a Selene, la diosa de la Luna. Tea se formó con los otros planetas de nuestro Sistema Solar, hace unos 4.600 millones de años. La órbita de Tea se volvió inestable cuando su masa superó un valor crítico, lo que provocó la colisión que formó el doble planeta Tierra-Luna hace unos 4.530 millones de años; aproximadamente entre 30 y 50 millones de años después de que se hubieran formado los otros planetas rocosos.

Una colisión de esta naturaleza no sería como cuando dos trozos de roca chocan y hacen saltar fragmentos de los dos. Los astrónomos conocen esta colisión con el nombre de «Gran Impacto» y la imagen que ello evoca describe con claridad lo que sucedió cuando la Tierra era joven y un cuerpo del tamaño de Marte le asestó un golpe de refilón. En la colisión se habría liberado tanta energía cinética que el cuerpo que entraba habría quedado completamente destrozado y la superficie de la Tierra se habría fundido por entero. Las capas externas del objeto entrante también se habrían derretido y mezclado con el material fundido de la superficie terrestre; buena parte del conjunto saldría repelida para terminar formando un anillo de escombros alrededor del planeta. Mientras tanto, el núcleo denso y metálico del objeto entrante se habría hundido en la capa

externa de elementos fundidos para quedar absorbida por el núcleo de la joven Tierra. El material más ligero del objeto entrante y de la superficie original de la Tierra, esparcido de este modo por el espacio, habría contenido cerca de diez veces la masa actual de la Luna; en su mayoría escapó del todo y pasó a navegar en órbitas independientes alrededor del Sol, dando origen a asteroides; pero otra parte terminó apresada en un anillo de material que giraba alrededor de la Tierra. Cuando la superficie de la Tierra se enfrió y formó una corteza nueva, más delgada, el material de este anillo se fusionó en la Luna y repitió en miniatura, pero mucho más deprisa, el proceso mediante el cual se formaron los planetas alrededor del Sol. Las simulaciones por ordenador hacen pensar que cerca del 2% de la masa original de Tea acabó en el anillo de escombros y cerca de la mitad se fusionó para formar la Luna. La formación completa de la Luna podría haber tardado tan solo un mes en llevarse a cabo. Otros objetos creados fuera del anillo de escombros podrían haber permanecido en órbitas de puntos de Lagrange durante hasta cien millones de años, antes de que la influencia gravitatoria de otros planetas los expulsase de aquellas cuevas gravitatorias e hiciera que muchos se estrellaran contra la Tierra o la Luna.

Las pruebas que respaldan este modelo de formación del sistema Tierra-Luna se obtuvieron a través de muestras de rocas extraídas de la Luna. Estas rocas tienen exactamente la misma composición de la corteza terrestre. Y las mediciones sísmicas de los terremotos lunares, realizadas con instrumentos dejados en la superficie lunar, indican que no hay un núcleo metálico importante; el radio del

núcleo es, sin duda, inferior al 25% del radio de la Luna, mientras que el radio del núcleo de la Tierra ocupa cerca del 50% del radio del planeta. El núcleo de la Luna solo aporta un pequeño porcentaje de la masa total del satélite, mientras que el de la Tierra representa casi la tercera parte de la masa planetaria. Debido a la ausencia de hierro, la densidad general de la Luna es muy inferior a la de la Tierra. La Tierra tiene una densidad media de 5,5 gramos por centímetro cúbico, mientras que la de la Luna es de tan solo 3,3 gramos por centímetro cúbico.

La edad de las rocas de la Luna nos brinda, incluso, una fecha precisa para este suceso dramático: hace unos 4400 millones de años, casi al tiempo de la formación del Sol. Hay otras pruebas más circunstanciales, también: tal golpe de refilón explica por qué la Tierra rota tan deprisa, una vez cada veinticuatro horas, mientras que Venus, que no tiene satélite, tarda 243 días terrestres en completar la rotación. El golpe tangencial que formó la Luna habría hecho que la Tierra girase aún más rápido, de forma que después del impacto habría tenido días de unas cinco horas de duración y, desde entonces, ha ido perdiendo velocidad. El impacto descentrado también sería el responsable de la inclinación de la Tierra, razón por la cual tenemos estaciones; pero la presencia de un satélite tan grande orbitando alrededor de la Tierra ha actuado desde entonces como estabilizador gravitatorio, lo que impide que la inclinación varíe mucho a lo largo del tiempo geológico. De forma adicional, una combinación del hierro añadido al núcleo de la Tierra y el rápido movimiento de giro explica, probablemente, por qué nuestro planeta

tiene un campo magnético tan fuerte. Todas estas influencias podrían resultar cruciales, como veremos, para permitir la aparición de una civilización tecnológica en la Tierra.

Hay otra prueba aún más convincente de que en efecto sucedieron colisiones como esta cuando el Sistema Solar era joven. Las sondas espaciales que han volado más allá de Mercurio han medido la potencia de su fuerza gravitatoria y han descubierto que, pese a su reducido tamaño, tiene una densidad relativamente alta. La Luna se parece a la corteza terrestre, sin núcleo, pero Mercurio se parece al núcleo terrestre, sin corteza. La explicación natural es que en los primeros estadios de vida del Sistema Solar Mercurio recibió un golpe, no tangencial sino frontal, de otro protoplaneta formado originalmente en su misma órbita. En una colisión frontal, todo el material más ligero habría salido despedido al espacio y solo quedaría el núcleo más pesado.

Este modelo de impacto explica por qué, de los ocho planetas que hay en el Sistema Solar, solo uno tiene un satélite de dimensión comparable a la de su planeta madre; pero también implica que estos planetas dobles son raros.

§. El especial

En general, nuestro Sistema Solar parece ser singular —o, al menos, una clase de sistema planetario infrecuente— porque las órbitas de los planetas son casi circulares y están lo suficientemente alejadas entre sí como para no influenciarse mucho mutuamente, en la actualidad. En la mayoría de los otros sistemas planetarios

conocidos, las órbitas de los planetas gigantes son más elípticas. (Este descubrimiento no se debe solo a que los planetas gigantes con órbitas elípticas sean más fáciles de hallar: es significativo estadísticamente hablando). También es más probable que se den sistemas de esta clase por razones dinámicas; es fácil explicar cómo los planetas llegan a recorrer tales órbitas, pero no tanto mostrar cómo pueden seguir órbitas circulares. Nadie sabe todavía por qué algunos sistemas planetarios, incluido el nuestro, se han asentado en una condición más regular. Puede tratarse solo de una casualidad estadística: si una configuración es rara, pero posible, en alguna parte tendrá que existir dado el número suficiente de sistemas planetarios. O quizá este hecho tenga que ver con la cantidad de gas que había en el disco alrededor del joven Sol, que arrastró los planetas a medida que crecían. Esto, a su vez, tendría relación con el entorno en el que se formó el Sistema Solar y con la presencia de material vertido allí por una supernova cercana o una estrella gigante. Fuera por la razón que fuese, cuanto más diversos descubren los astrónomos que son los sistemas planetarios, más especial parece el Sistema Solar.

La última categoría de sistema planetario descubierta subraya este hecho. Ahora sabemos que varias estrellas vecinas están acompañadas por planetas más grandes que la Tierra pero menores que Neptuno, en órbitas tan próximas a su estrella madre que las completan en un periodo de pocas semanas; sin duda, no son ubicaciones probables para otras Tierras. Pero aún queda algo de esperanza para los astrónomos que buscan otros sistemas como el

nuestro; la estrella 23 Lib tiene un planeta cuya masa es aproximadamente la de Júpiter, que se mueve en una órbita casi circular y tarda catorce años en girar en torno de la estrella, tan solo un par de años más que Júpiter en dar la vuelta al Sol. Quizá también tenga una familia de planetas rocosos, demasiado pequeños para haberlos descubierto aún.

Aun en una órbita casi circular, la influencia de Júpiter en el proceso de formación de los planetas no ha sido del todo benigna. El Cinturón de Asteroides representa los escombros restantes de un planeta que podría haber existido si el material disponible no hubiera sido absorbido por el propio Júpiter o desviado por la influencia gravitatoria de Júpiter hasta apartarlo por completo de la región. Marte, el planeta rocoso más cercano al Cinturón de Asteroides, es del tamaño de tan solo media Tierra y su masa es, aproximadamente, una décima parte de la de nuestro planeta. Si hubiera sido tan grande como la Tierra, tal vez pudiera haber tenido una potencia de atracción gravitatoria suficiente y otras propiedades necesarias para conservar una atmósfera gruesa, tal que mantuviera el calor mediante el efecto invernadero. Venus, al otro lado de la Tierra y lejos de la proximidad inmediata de Júpiter, tiene de hecho un tamaño y una masa similares a los del planeta que nos acoge, aunque allí el efecto invernadero ha llegado al extremo. Sin Júpiter, es probable que Marte también hubiera podido crecer hasta alcanzar el tamaño de la Tierra; y si el «planeta-asteroide» perdido hubiera hecho lo mismo, nuestro Sistema Solar pudiera haber empezado con tres planetas semejantes a la Tierra y situados a la

distancia adecuada del Sol como para que fluyera el agua líquida. Todo ello, sin embargo, admitiendo siempre —y es mucho admitir— que tales planetas hubieran podido llegar a formarse sin la presencia de Júpiter. Por otra parte, si Júpiter hubiera sido algo mayor, o la Tierra se hubiera formado un poco más cerca de Júpiter, los mismos procesos que restringieron el crecimiento de Marte habrían limitado el tamaño de la Tierra.

Pero, dejando a un lado la cantidad de planetas como la Tierra que se pudieran formar, ¿podrían haberse mantenido estables sus órbitas sin la influencia de Júpiter en el Sistema Solar en su conjunto? Las pruebas hacen pensar que no. Es realmente imposible calcular con precisión cómo cambian las órbitas de todos los planetas a lo largo de intervalos de tiempo prolongados, por la forma en que cada planeta ejerce una influencia simultánea sobre todos los demás, por pequeña que esta sea. Si hubiera solo un planeta girando alrededor del Sol, su órbita, una elipse simple, podría calcularse perfectamente y para siempre. Pero con añadir un solo planeta más, se crea un «problema de tres cuerpos» imposible de resolver con precisión. La única solución es calcular las órbitas paso a paso, dejar que un planeta se mueva un poco, calcular la influencia resultante en el otro planeta y mover este planeta un poco más, para luego calcular cómo afecta este cambio al primer planeta, y así en adelante.

Los ordenadores modernos son tan capaces que nos permiten realizar cálculos de este tipo manejando todos los planetas principales del Sistema Solar para ver cómo cambian las órbitas a lo

largo de miles de millones de años. Pero estos cálculos nos muestran que las órbitas de los planetas interiores se ven afectadas por el caos matemático. Esto quiere decir que, en algunos casos, un cambio muy pequeño en las condiciones iniciales del cálculo lleva a un gran cambio en la evolución de las órbitas. Es un ejemplo de lo que algunas veces se llama el «efecto mariposa», que parte del concepto de que el aleteo de una mariposa en Brasil puede, en principio, afectar el recorrido de un huracán en el Caribe.

En el caso del Sistema Solar, los cálculos por ordenador muestran que las órbitas de los cuatro planetas gigantes son muy estables y no son proclives al caos. Pero solo con que o bien Júpiter o Saturno hubieran tenido algo más de masa, o si los dos gigantes gaseosos hubieran estado un poco más cerca uno del otro, o si hubiera habido un tercer gigante gaseoso de tamaño comparable al de estos dos en la zona exterior del Sistema Solar, se habría desatado el caos. Peor aún, cuando las simulaciones de las órbitas de los planetas interiores se realizan miles de veces con ligeros cambios en los parámetros iniciales, en uno de cada cien cálculos aparece el caos. Debido a las interacciones gravitatorias con los otros planetas, con Júpiter en particular, la órbita de Mercurio, el menor de los planetas rocosos, se extiende tanto que Mercurio puede pasar cerca de Venus, o incluso chocar con él, lo cual alteraría tanto todo el Sistema Solar que, en algunos escenarios, Venus sale despedido de su órbita y choca con la Tierra. El hecho de que esto suceda en el 1% de las simulaciones implica que hay una posibilidad entre cien de que esto suceda en nuestro Sistema Solar en algún momento

antes de que muera el Sol. No es nada por lo que tengamos que perder el sueño, pero muestra que la estabilidad de los sistemas planetarios no se puede dar por hecha. De hecho, con el estudio de las extrañas órbitas de tres planetas que se descubrieron orbitando alrededor de la estrella Ípsilon Andrómeda, y retrayendo en efecto sus cálculos en el tiempo, los astrónomos han deducido que el sistema albergaba en tiempos un cuarto planeta que ha sido expulsado por completo del sistema como consecuencia, precisamente, de este tipo de caos orbital.

De ello se deduce, una vez más, que nuestro Sistema Solar no es típico, sino un ejemplo raro de una familia de planetas con órbitas más o menos estables. Hasta qué punto es raro un sistema como este, sin embargo, es imposible determinarlo. Lo que sí sabemos es que dentro de este patrón de estabilidad, en general la influencia de Júpiter ha sido beneficiosa, en lo que atañe a convertir la Tierra en un lugar apto para el desarrollo de una civilización como la nuestra. Participó en la reorganización del Sistema Solar exterior que provocó el intenso bombardeo de los planetas interiores, incluido el doble planeta Tierra-Luna, poco después de la formación de los planetas rocosos. Muchos de los impactos que se produjeron durante este intenso bombardeo implicaron trozos rocosos de una anchura superior a los cien kilómetros, impactos que, hoy día, serían desastrosos para la vida en la Tierra. Pero al limpiar de este modo buena parte de los escombros que habían quedado después de la formación de los planetas, el Último Bombardeo Intenso redujo la cantidad de escombros cósmicos que podían provocar tales

colisiones en un futuro y, al mismo tiempo, estacionó la mayoría de escombros restantes en el Cinturón de Asteroides, el Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort. Aunque los objetos aún pueden escapar de esos nichos especiales y descender hacia el Sol, desde el Último Bombardeo Intenso Júpiter ha hecho las veces de centinela y protegido al Sistema Solar de la mayoría de materiales que caen desde la zona exterior. Muchos de estos cuerpos se desvían a consecuencia de la gran fuerza de atracción de Júpiter, ya sea porque acaban desplazados a órbitas que les impiden cruzar el Cinturón de Asteroides o porque Júpiter los absorbe por completo, como sucedió con el cometa Shoemaker-Levy 9, que se partió y chocó contra Júpiter en julio de 1994; esta fue la primera observación directa de tal colisión de objetos en el Sistema Solar.

Las pruebas geológicas nos indican que, a lo largo de la mayor parte de la historia de la Tierra, el promedio de impactos causados sobre nuestro planeta por objetos de al menos 10 kilómetros de anchura es de uno cada cien millones de años. Un impacto de esta magnitud fue el que contribuyó a la «muerte de los dinosaurios», hace 65 millones de años. Pero si Júpiter no hubiera estado en la zona para limpiar primero buena parte de los escombros originales del Sistema Solar y luego protegernos de objetos como el Shoemaker-Levy 9, estos impactos habrían sucedido cada 10.000 años, no cada cien millones de años. Se hace difícil pensar que en esas circunstancias la vida animal hubiera podido evolucionar, y ya no digamos desarrollar inteligencia y una civilización tecnológica.

No obstante, los impactos que azotaron la Tierra antigua podrían haber sido un requisito previo esencial para nuestra existencia. ¿Cómo pudo conservar suficiente agua como para llenar los océanos un planeta que un día estuvo fundido (en realidad, fundido en dos ocasiones, si acertamos con nuestras ideas sobre el origen de la Luna)? La respuesta es que no lo hizo: el agua llegó después. Pero ¿de dónde salió el agua?

Hasta hace poco, el hecho de que el agua pudiera sobrevivir en forma líquida o vaporosa en el disco de material del que se formaron los planetas suponía un tremendo enigma. Las moléculas de agua tenían que haberse roto a consecuencia de la radiación ultravioleta de una estrella joven, de un modo muy similar a como las moléculas de oxígeno se rompen hoy día en lo alto de la atmósfera terrestre, debido a la radiación ultravioleta del Sol. Pero el agua tenía que haber estado allí o no estaría hoy aquí; y, durante la primera década del siglo XXI, se ha observado la firma espectral tanto del agua como del radical hidróxilo (OH ; un tipo de molécula de agua privada de un átomo de hidrógeno) en los discos de formación de planetas que orbitan alrededor de muchas estrellas jóvenes. En algunos casos, tenemos incluso pruebas indirectas de la presencia de cuerpos helados, similares a cometas. La supervivencia del agua en estos discos se pudo explicar por fin en 2009, gracias al trabajo de investigadores de la Universidad de Michigan. Descubrieron que el vapor de agua se protege a sí mismo de los efectos nocivos de la radiación ultravioleta porque, en realidad, la radiación entrante se agota al quedar absorbida por las moléculas de agua del exterior (la

cara más próxima a la estrella) de una nube. Las moléculas de agua, tan pronto como se dividen por efecto de la radiación para liberar hidrógeno y OH, se reagrupan mediante reacciones químicas normales y deben dividirse de nuevo.

Como siempre hay abundante hidrógeno en las nubes que dan lugar a la formación de estrellas, el resultado global es que todo el oxígeno disponible termina convertido en agua. La zona interior de la nube, rica en agua, queda protegida de un modo bastante parecido a como la capa de ozono de la atmósfera protege la vida en la superficie de la Tierra de las radiaciones ultravioletas del Sol. En la estratosfera de nuestro planeta, las reacciones en las que participa la radiación ultravioleta convierten en todo momento las moléculas de oxígeno en ozono, pero otras reacciones químicas convierten el ozono otra vez en oxígeno, nada más formarse aquel. El efecto global es que tenemos una capa permanente de ozono, a gran altura sobre nuestras cabezas, pero al suelo llegan muy pocos rayos ultravioletas. Dentro de las nubes de material en las que se empiezan a formar los planetesimales, se produce un efecto de escudo semejante y la radiación ultravioleta que atraviesa la capa exterior es muy escasa. Eso permite la existencia de moléculas complejas y posibilita incluso que se vuelvan más complejas cuando interactúan entre ellas; de ahí surge una nutrida fuente de componentes orgánicos con los que se puede sembrar los planetas, incluso dentro de un radio de pocas unidades astronómicas desde la estrella madre.

Pero ¿cómo baja el agua, y las moléculas orgánicas complejas, hasta un planeta como la Tierra después de que este se haya enfriado lo suficiente como para hacer que el agua deje de hervir? Llega de planetesimales que siempre contuvieron agua y, al ser tan pequeños, jamás se calentaron lo suficiente para que el agua se evaporase. Visto en perspectiva, en la actualidad la Tierra contiene menos del 1% de agua y menos del 0,1% de carbono, mientras que los escombros del Cinturón de Asteroides contienen un 20% de agua (combinada con otras sustancias) y algo menos de un 5% de carbono (hablaremos más del carbono en el próximo capítulo). Si la Tierra se hubiera formado del mismo tipo de materia que los asteroides, solo un poco más allá de la órbita de Marte, podría haber tenido un océano de cientos de kilómetros de profundidad y una atmósfera compuesta por una gruesa capa de dióxido de carbono, que elevaría la temperatura de la superficie mediante un efecto invernadero tan fuerte que el agua se habría consumido, lo cual agravaría aún más el efecto invernadero y convertiría el lugar en un sitio demasiado caliente para albergar vida. Aunque la Tierra hubiera terminado solo con el doble de agua de la que tiene en realidad, en tal caso habría quedado cubierta casi totalmente por el agua, esto es, con muy poca tierra (si es que algo hubiera) en la que nuestra clase de vida pudiera desarrollarse. El exceso de agua es tan malo como su ausencia, cuando se trata de desarrollar una civilización tecnológica. Este es otro ejemplo de por qué la Tierra es «idónea», en equilibrio entre los dos extremos.

En nuestro Sistema Solar, además de sus muchas otras contribuciones a que la Tierra fuera un lugar apropiado para la vida, Júpiter está también en el sitio idóneo para enviar hacia nosotros el número justo de asteroides ricos en agua cuando la Tierra era joven. Y no solo asteroides; el Último Bombardeo Intenso, que a primera vista parece una catástrofe para la Tierra, también afectó a materia helada de la zona exterior del Sistema Solar, objetos semejantes a cometas con abundancia de agua y moléculas orgánicas. Estudios sobre los isótopos de criptón y xenón en el manto terrestre —la capa inferior a la corteza— han ofrecido pruebas que respaldan este panorama. Encajan con las proporciones halladas en muestras de meteoritos y confirman que la Tierra adquirió sus materiales volátiles a partir de impactos ocurridos en un estadio tardío de la formación del planeta. De hecho, el impacto de un solo cuerpo del «cinturón de agua», de un tamaño no especialmente grande, podría haber suministrado toda el agua necesaria para llenar los océanos de la Tierra. El descubrimiento reciente de agua apresada en rocas de la Luna también encaja en este modelo.

Si Júpiter se hubiera formado más lejos del Sol, las simulaciones por ordenador muestran que aún habría sido posible que se formase un planeta del tamaño de la Tierra, pero a solo 5 unidades astronómicas del Sol, más o menos. Habría estado lleno de agua, pero totalmente bloqueada en forma de hielo. Sin ningún Júpiter, aún habríamos tenido abundancia de agua, pero toda encerrada en

los asteroides, que jamás tuvieron ocasión de formar un planeta del tamaño de la Tierra.

Sin embargo, en nuestro Sistema Solar, tan especial, sí se formó la Tierra, junto con un gran satélite, y sí tiene océanos de agua líquida. Eso bastó para que empezase a existir vida en el planeta. Pero aún queda mucho por contar en la historia de cómo se desarrolló la inteligencia y evolucionó una civilización tecnológica.

Capítulo 5

¿Por qué es tan especial la tierra?

Contenido:

§. Como un diamante en el cielo

§. El rompecabezas planetario

§. La creación de los continentes

§. Un campo de fuerza

§. Venus y Marte

§. Un estabilizador planetario

§. Tectónica de placas y vida

La Tierra es un planeta rocoso. Quizá esto no parezca tan especial en lo que atañe al Sistema Solar; cuatro de los ocho planetas principales están compuestos de roca. Pero en el universo, en general, los planetas rocosos son mucho menos comunes de lo que esto nos podría hacer pensar. Todo depende de las proporciones relativas del carbono y el oxígeno, que son los dos elementos más habituales después del hidrógeno y el helio, en el disco de material que gira en torno de una estrella en la que se forman planetas.

§. Como un diamante en el cielo

Las rocas están compuestas de silicatos, lo cual incluye combinaciones de átomos de silicio con átomos de oxígeno; esencialmente, óxidos de silicio, aunque a veces en combinación con otros elementos. Si hay abundante oxígeno excedente en la región

donde se forma un planeta, prácticamente todo el silicio quedará integrado en silicatos y obtendremos un planeta rocoso. Pero si no hay excedente de oxígeno, no habrá silicatos ni planeta rocoso. La alternativa es tener abundancia de carbono, porque la proporción de carbono y oxígeno producida por la nucleosíntesis estelar está casi equilibrada, con un poco más de carbono en algunas estrellas y nubes interestelares, y un poco más de oxígeno en otras. En nuestra galaxia, en general, hay aproximadamente el doble de oxígeno que de carbono, y diez veces más carbono que silicio, pero el carbono domina sobre el oxígeno en algunas estrellas. El carbono y el oxígeno son muy afines entre sí, desde el punto de vista químico. De los dos, el que cuente con una presencia menor en la nube a partir de la cual se forma un nuevo sistema planetario quedará integrado en compuestos como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, y el excedente de los átomos más abundantes quedará disponible para participar en reacciones con otros elementos. Esto no es solo una teoría. Las observaciones realizadas en las longitudes de onda infrarroja demuestran que muchas estrellas, en un estadio tardío de su vida, están rodeadas de nubes de material, incluidos granos de polvo ricos en compuestos de carbono, que son lanzados al espacio; lo más común de todo, con gran diferencia, es el carburo de silicio. También hay compuestos de carbono más complejos que, cuando se distribuyen por el espacio, pueden representar un papel importante en la aparición de vida en los planetas apropiados, en una fecha posterior. Sin embargo, es revelador que, de todas las estrellas que ahora sabemos que

albergan planetas, la mayoría cuentan con una proporción de carbono-oxígeno más elevada que la del Sol.

En la Tierra hay, realmente, muy poco carbono, en comparación con otras cosas como las rocas de silicato. En nuestro Sistema Solar, la mayoría del carbono de la región interior en la que se formaron los planetas rocosos parece haber salido disparado como gas monóxido de carbono cuando el Sol era joven, y se incorporó a la estructura de asteroides y cometas en una zona más alejada del Sistema Solar. Como el agua, el carbono acabó bajando a la Tierra más tarde, por el impacto de estos objetos, una vez el planeta se había solidificado; otra razón para dar las gracias a Júpiter y al Último Bombardeo Intenso.

Pero en los sistemas planetarios donde el carbono domina sobre el oxígeno, esto no sucede. Los compuestos de carbono sólido, como el carburo de silicio, e incluso el carbono sólido por sí solo en forma de granos de grafito, serán los componentes básicos de los planetas, incluso de planetas en órbitas como la que recorre la Tierra alrededor del Sol. Un planeta que, con un tamaño similar a la Tierra, se formase de este modo tendría una corteza de grafito, pero en las profundidades inferiores a la superficie habría una presión lo bastante fuerte para producir capas de carburo de silicio y diamante cristalino (lo cual otorgaría una profundidad de sentido muy distinta a la conocida canción inglesa «Twinkle, twinkle, little star», que habla del centelleo de una pequeña estrella). En la superficie de un planeta similar, la modesta cantidad de oxígeno disponible se presentaría en forma de monóxido de carbono, y

habría más carbono en forma de metano (un compuesto de carbono e hidrógeno). En determinadas circunstancias, un planeta de estas características habría tenido lagos y océanos de alquitrán.

Hasta qué punto esto reduce las posibilidades de encontrar planetas como el nuestro es una cuestión aún abierta, si bien no podemos negar que se trata de malas noticias para los entusiastas de la búsqueda de inteligencia extraterrestre. Y como muchos de los factores que hacen de la Tierra un lugar apropiado para vivir, se trata de una cuestión de tiempo y de lugar. Las regiones de nuestra galaxia que contienen una proporción más elevada de elementos pesados («metales») tienen una proporción más alta de carbono-oxígeno. Esto significa que las regiones de la galaxia mucho más cercanas que la nuestra al centro de la Vía Láctea probablemente no tendrán planetas rocosos como la Tierra, sin contar con las otras razones que hacen que estas regiones sean lugares inhóspitos para las formas de vida como nosotros, y que una oleada de lo que podríamos llamar «carbonificación» pasa barriendo hacia la parte exterior de la galaxia conforme transcurre el tiempo. Ninguno de estos factores se puede cuantificar todavía de forma adecuada. Pero sí está claro que todo esto reduce la posibilidad de que existan mundos como la Tierra situados aún más lejos. E incluso dentro del Sistema Solar, la naturaleza de la corteza de silicato de la Tierra parece ser a un tiempo única y vital para la aparición de formas de vida como la nuestra.

§. El rompecabezas planetario

La corteza terrestre se divide en varias «placas» grandes y otras menores, que encajan entre sí como las piezas de un rompecabezas esférico. Pero a diferencia de los puzzles, estas placas están en un movimiento constante que termina causando lo que a veces se denomina *deriva continental*, aunque hoy preferimos usar el término de *tectónica de placas* (que significa «construcción con placas»). Distintas líneas de investigación —como, entre otras, los estudios magnéticos del lecho marino, la sismología y la observación directa desde el espacio de la forma en que se mueven hoy los continentes— se combinaron en la segunda mitad del siglo XX para formular la teoría moderna de la tectónica de placas. Esta teoría explica cómo y por qué los terremotos y los volcanes se dan allí donde lo hacen, por qué en ocasiones existen Edades de Hielo y en otras la Tierra está libre de hielos, e incluso por qué las especies se diversifican y se extinguen.

En el centro de esta teoría de las placas tectónicas está el descubrimiento de la expansión oceánica. En el fondo marino hay grietas, sobre todo a lo largo de una línea que recorre aproximadamente de norte a sur el océano Atlántico, en la que materiales fundidos situados por debajo de la corteza terrestre (magma) brotan hacia la superficie en una dorsal, salen empujando hacia ambos lados de la grieta y allí se quedan. En consecuencia, se genera una especie de cinta transportadora del fondo del mar que, de forma gradual pero constante, va empujando y separando los continentes de ambos lados del océano. En el caso del Atlántico Norte, este proceso está ensanchando la distancia entre Europa y

América en un par de centímetros al año; más o menos, la velocidad a la que crecen nuestras uñas. Y este ensanchamiento del océano se ha medido directamente gracias a instrumentos instalados en los satélites orbitales.

Si acabase aquí la historia de las placas tectónicas, la Tierra tendría que crecer sin parar para dar cabida a todo el lecho marino nuevo que va apareciendo en las dorsales oceánicas. Pero la realidad es que el lecho marino se destruye con la misma rapidez con que se crea. La destrucción tiene lugar en regiones donde el fondo marino es empujado bajo un continente y se hunde de nuevo en el interior de la Tierra a través de una profunda trinchera. Esto no sucede siempre que el fondo marino toma contacto con un continente; en toda la orilla del océano Atlántico, por ejemplo, no sucede. Pero el ejemplo arquetípico de una región tan destructiva como esta se encuentra bajo la costa occidental del Pacífico, donde el fondo marino del Pacífico desplazado hacia el oeste se hunde bajo la masa terrestre de la placa continental eurasiática. No es una coincidencia que toda esta región, Japón incluido, tenga tendencia a sufrir terremotos y actividad volcánica. Así, el océano Pacífico se encoge aproximadamente a la misma velocidad que se expande el Atlántico, y la destrucción del lecho marino es un proceso violento. La creación del fondo del mar también entraña violencia, por supuesto; pero suele producirse bastante lejos, en el mar, donde los terremotos y los volcanes submarinos no nos preocupan. Islandia constituye una excepción; allí, una sección de la dorsal Mesoatlántica ha emergido sobre el nivel del mar.

En conjunto, todo el proceso se reduce a la convección. Un material líquido y caliente de debajo de la superficie de la Tierra aflora, se expande al tiempo que se enfría y luego vuelve a sumergirse hacia el interior. Sencillo. Por supuesto, la cosa tiene sus complicaciones. Los puntos calientes situados bajo la superficie pueden abrirse paso a través de los continentes y romperlos para formar nuevos océanos (parece que es lo que está sucediendo en la actualidad en la zona este de Africa). En otras ocasiones, los continentes chocan, cuando el manto oceánico que hay entre ellos se encoge hasta desaparecer, y entonces aparecen nuevas cordilleras montañosas, como el Himalaya. Pero los principios subyacentes están claros. También está claro que estos procesos solo pueden tener lugar en un planeta que, como la Tierra, tenga una corteza relativamente delgada y compuesta de material sólido por encima de otras capas de materia fluida.

No obstante, la corteza terrestre no tiene el mismo grosor en todas partes. El grosor de la corteza continental oscila entre los 35 y los 70 kilómetros, mientras que bajo los océanos el promedio es de unos 7 kilómetros, y es más uniforme. Para mirarlo en perspectiva, recordemos que el diámetro de la Tierra no llega a los 13 000 kilómetros. A esta escala, toda la corteza no es más importante que la piel de una manzana comparada con la fruta entera.

Aun así, las diferencias entre las cortezas continental y oceánica tienen su importancia; importancia que tal vez sea, literalmente, vital. La corteza continental, además de ser más gruesa que la oceánica, es también algo menos densa. La densidad de la corteza

en el lecho marino es de unos 3 gramos por centímetro cúbico, mientras la densidad de la continental es de solo unos 2,7 gramos por centímetro cúbico. En parte, esto se debe a que la corteza oceánica es fundamentalmente un bloque sólido de material uniforme, mientras que la continental está constituida por fragmentos diversos que se habían mezclado y unido a consecuencia de los procesos de la tectónica de placas. Pero explica por qué es la corteza oceánica — y no la corteza continental— la que se destruye en las profundas trincheras por las que el material desciende de nuevo al interior de la Tierra. La materia menos densa tiende, por naturaleza, a situarse por encima de la más densa y propicia que esta siga su camino hacia las profundidades. Pero hay algo más que participa en el proceso: el agua.

Las regiones en las que la corteza oceánica está siendo destruida en trincheras profundas a lo largo de los márgenes continentales se llaman *zonas de subducción* (también hay lugares en los que una parte de fondo marino se desliza bajo otra, pero es un detalle del que podemos prescindir ahora). El lecho marino que se hunde en las profundidades de una zona de subducción se modifica a consecuencia de las interacciones con el agua, que permea a través de las grietas en la roca y puede llegar a calentarse lo bastante como para hervir, lo cual desata reacciones químicas que cambian la composición de la roca. En el margen de un continente la roca está cubierta por una capa de sedimentos, ricos en restos de vida orgánica que han sido arrastrados desde el continente. Cuando esta mezcla se hunde por debajo de la corteza continental, se calienta

cada vez más y se ve sometida a presiones extremas: a una profundidad de 50 kilómetros, la presión es 15.000 veces superior a la presión atmosférica en la superficie de la Tierra, y las temperaturas alcanzan varios centenares de grados Celsius. Una consecuencia de todo esto es que las rocas pierden el agua, que pasa al material que rodea el bloque de roca que se hunde. Esto ayuda a que la roca se funda, igual que echar sal sobre el hielo favorece que este se deshaga. Cerca del bloque que se hunde aparecen gotas de magma y, como el magma líquido es más ligero que el sólido, estas gotas de material fundido van subiendo progresivamente, penetran en la corteza y crean una cadena de volcanes sobre la región en la que se está destruyendo el fondo marino. Sin agua, nada de todo esto podría suceder; sin agua, no habría tectónica de placas. Es importante darse cuenta de la importancia que tiene todo esto para la existencia de la vida en la Tierra; sobre todo, para nuestro tipo de vida. Mientras este proceso está en marcha, el magma expulsa burbujas de gas que se abren paso hasta la superficie, donde quedan liberadas en las chimeneas volcánicas. De estos gases, los más importantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el nitrógeno. El nitrógeno proviene en su mayoría de los restos orgánicos mezclados con el sedimento que arrastró el bloque de la litosfera en su hundimiento. Todos estos gases son importantes para los seres vivos de la superficie terrestre, de modo que la vida en la Tierra está íntimamente vinculada con los ciclos en los que participan las rocas sin vida. Uno de los aspectos más importantes de todo esto radica en que la combinación de

procesos vivos y no vivos ayuda a mantener el equilibrio de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, en especial el dióxido de carbono, que regula la temperatura de la Tierra mediante una especie de termostato global que mantiene unas condiciones adecuadas para la vida.

En esta actividad volcánica hay otros aspectos que también son importantes para la aparición de una civilización tecnológica. Cuando la roca fundida asciende por la corteza, se enfría, y una parte se solidifica en el camino de ascenso. Una de las formas de cuantificar lo sucedido es recurriendo a la cantidad de sílice presente en las distintas rocas. *Sílice* es simplemente otro nombre para el dióxido de silicio, y está prácticamente en todas las rocas. El basalto liberado por la actividad volcánica es, con mucho, el componente más importante de la corteza oceánica. Contiene un 50% de sílice (en lo que al peso se refiere), pero la corteza que forma los continentes tiene otra composición: incluye un 60% de sílice, otro factor que explica que la corteza continental sea más ligera que la oceánica. Algunas rocas, por supuesto, contienen aún más sílice que la media; el granito, por ejemplo, es sílice en casi un 75%. La razón por la que la corteza continental contiene relativamente más sílice que basalto es que, en el camino hacia la superficie desde una zona de subducción, desaparecieron otros elementos de la mezcla típica de basalto. Entre estos otros elementos se cuentan minerales como el cuarzo, que en su ascenso cristaliza a partir del magma fundido y lo deja con un índice relativamente elevado de sílice; y compuestos con abundancia de metales como el hierro, el cobre, la

plata y el oro, que se solidifican más arriba. Por eso encontramos metales preciosos, por ejemplo, en las jóvenes montañas de América del Sur: la riqueza que llevó a los conquistadores españoles al continente en busca de El Dorado y financió los días de gloria del Imperio Español. Este tipo de proceso fue el que, hace mucho tiempo, cuando los continentes tenían una disposición muy distinta a la actual, formó los depósitos europeos de metales como el cobre y el hierro, que tan esenciales resultaron para la revolución industrial. La combinación de una corteza delgada y el agua ha permitido que aparezca la tecnología en la Tierra, sin pensar ahora en las razones que permitieron la evolución de la vida inteligente en nuestro planeta. Sin los metales, la inteligencia por sí sola no podría haber generado una civilización tecnológica capaz de enviar señales a las estrellas y, quizá, viajar hasta ellas. Pero ¿qué generó los continentes donde tuvieron lugar estos procesos y se desarrolló nuestra civilización tecnológica?

§. La creación de los continentes

Una de las cuestiones fundamentales que nos ha permitido comprender la tectónica de placas es que las cuencas oceánicas son características temporales del globo, mientras que los continentes son permanentes, aunque terminen desgarrados y vueltos a soldar en diferentes configuraciones a medida que pasan los eones. También crecen (lo que significa que, a medida que va pasando el tiempo, la zona de nuestro planeta cubierta por agua es cada vez menor). La actividad volcánica a lo largo de los márgenes

continentales, junto con las zonas de subducción, añaden material nuevo a los continentes y, cuando estos chocan, la corteza oceánica puede arrugarse y convertirse en parte de cordilleras montañosas. Por descontado, los continentes también están en constante desgaste por el efecto del viento y el clima y algunos sedimentos acaban cayendo al lecho marino. Pero la velocidad a la que se añade el nuevo material a los continentes es muy superior a la de la erosión. Si retrocedemos lo suficiente en el tiempo, podríamos llegar a un punto en que no hubiera ningún continente.

Es algo obvio cuando pensamos en cómo se formó la Tierra. Tras el impacto que dio origen a la Luna, nuestro planeta se asentó como una masa de material fundido, de forma casi esférica (solo «casi» esférica porque el giro habría hecho que el ecuador sobresaliera un poco). Se habría quedado como una esfera sin apenas características especiales. Si hoy día la Tierra adoptase una forma de esfera tan lisa, dispondríamos de agua suficiente como para que los océanos formasen un mar poco profundo que cubriría todo el globo. La profundidad media de los océanos es de 3800 metros, lo cual más que cuadruplica la altura media de los continentes, y dos tercios del planeta están cubiertos de agua; por tanto, si la superficie sólida de la Tierra quedase allanada por completo, el agua la cubriría hasta una profundidad de muy poco menos de 3 km.

Si toda esta agua hubiera caído en forma de lluvia sobre la superficie de una Tierra joven sin perturbaciones, esta quizá se habría quedado como mundo acuático, con todo lo que esto implica para la vida y la tecnología. Pero gran parte del agua —o quizá

toda— llegó a la Tierra por los impactos del espacio, y ahora se cree que los últimos impactos fueron los que potenciaron el crecimiento de los continentes y desencadenaron los procesos de la tectónica de placas.

Incluso bajo los océanos de la Tierra joven, habría habido grietas en la corteza, provocadas por magma que manaría a la superficie desde el interior. Las embrionarias placas tectónicas se habrían estado empujando entre ellas mientras las arrastraban corrientes de convección, y algunas tuvieron que terminar empujadas debajo de otras, lo que generó mini zonas de subducción e hizo emerger las primeras islas volcánicas. Cuando una placa pequeña empuja bajo otra, algunos trozos se levantan y estos fragmentos de roca habrían contribuido al desarrollo de los mini continentes en proceso de crecimiento. Pero tenemos pruebas de que más de la mitad de la corteza continental moderna ya se había formado hace 2.500 millones de años, y esto implica una explosión de crecimiento continental mucho más espectacular que la generada por los empujones de unas placas embrionarias. Al parecer, la cuestión se explica porque la Tierra fue golpeada por una serie de impactos de gran intensidad hace entre 3800 millones de años (final del Último Bombardeo Intenso) y 2.500 millones de años. En consecuencia de ello, más de la mitad (quizá hasta dos terceras partes) de la corteza continental de la Tierra se creó en tan solo 700.000 años, menos de una quinta parte de su vida hasta el momento. Las pruebas de los impactos son lo suficientemente claras. Tenemos pruebas directas de grandes impactos en estructuras con rasgos geológicos conocidos

como crotones, descubiertos en algunas rocas antiguas. Los ejemplos más llamativos aparecieron en una región del sureste africano y otra del noroeste de Australia; se parecen tanto que no cabe duda de que en cierto momento formaron parte de una única masa terrestre enorme que luego se dividió. Y disponemos también de pruebas indirectas en la cara más golpeada de la Luna, a partir de lo cual los astrónomos pueden calcular cuántos impactos de diferentes medidas afectaron a la Tierra y su vecina durante distintas etapas del tiempo geológico. La conclusión es que hace entre 3.800 y 2.500 millones de años la Tierra podría haber sido golpeada nueve o diez veces por cuerpos cuyo tamaño oscila entre los 20 y los 50 kilómetros de diámetro.

Para contemplar el panorama en general, el asteroide implicado en la muerte de los dinosaurios hace cerca de 65 millones de años solo medía 10 kilómetros de diámetro. Un objeto de más de 20 kilómetros de diámetro, que llega a una velocidad de unos 20 kilómetros por segundo, apenas notaría la presencia de una fina capa de agua, de solo 3 kilómetros de profundidad, alrededor de la Tierra. La imagen que representa este efecto más apropiadamente no es la de un guijarro lanzado al mar, sino la de un ladrillo que cae sobre un charco. El escombro entrante se habría estrellado directamente con la corteza subyacente y habría generado tanto calor que la superficie se habría fundido y convertido en un lago de roca líquida, de quizá 500 kilómetros de anchura.

Pero ¿cómo un acontecimiento de esta naturaleza pudo impulsar el crecimiento de los continentes? Andrew Glikson, de la Universidad

Nacional de Australia, ha propuesto una explicación convincente. A semejante distancia en el tiempo, cualquier explicación contiene cierto grado de conjetura; pero su idea ensambla todas las piezas del rompecabezas y está respaldada por cálculos del efecto de un impacto semejante realizados por Jay Melosh, de la Universidad de Purdue. Una versión primigenia de la tectónica de placas, en la que aparecen solo trozos de corteza muy delgados, podría seguir desarrollándose con relativa tranquilidad, mientras el material fundido y caliente va ascendiendo en plumas que empujan las finas placas y las separan a medida que el material se expande en la superficie, luego se enfría y se hunde otra vez en el interior de la Tierra. Pero si un gran asteroide impacta justo encima de una pluma del manto en ascenso, el lago de roca fundida que produciría estaría más caliente que la pluma ascendente, de modo que esta se desviaría. El lago fundido se extendería sobre los márgenes de las placas jóvenes y (lo que es crucial) también por debajo. En lugar de alcanzar la superficie a través de una grieta en la corteza, la pluma se convertiría en una columna caliente de magma que asciende bajo una placa que ya existe. Allí se desataría una violenta actividad volcánica, con roca fundida atravesando la corteza y formando sobre ésta montañas volcánicas que aumentarían el grosor de la corteza y contribuirían a la forma actual de la tectónica de placas, más vigorosa. Dependiendo de la geometría exacta de la situación, una pluma menor, que se hubiera desprendido de la principal, podría cruzar hasta la superficie al otro lado del lago fundido mientras el

lago se enfría y se solidifica, lo cual generaría una nueva cadena de islas volcánicas.

Pese a lo atractivo de este panorama, no podemos afirmar que sea esta la razón de que la tectónica de placas y la formación de continentes recibieran un gran impulso en la primera época de la historia de la Tierra. Pero lo que sí es seguro es que la combinación de una corteza fina y abundancia de agua resulta esencial para que la tectónica de placas tenga lugar en la forma en que la conocemos hoy. La delgada corteza es herencia del impacto que creó la Luna, y otro legado de este impacto es el núcleo de la Tierra, denso y rico en hierro, que también resulta ser esencial para el desarrollo de nuestra civilización.

§. Un campo de fuerza

En cierta clase de historias de ficción científica, es frecuente que las naves espaciales y las personas estén rodeadas por «campos de fuerza» casi mágicos que los protegen de los atacantes. Es una idea bonita, pero no muy práctica a la escala de las naves y las personas (admitiendo que existiesen esos campos), debido a la gran cantidad de energía que se necesitaría para producir escudos de este tipo. Pero toda la Tierra, y en especial la vida sobre su superficie, sí está protegida de ciertas clases de peligro espacial gracias exactamente a este tipo de campo de fuerza, generado por corrientes de metal fundido que se arremolinan en las profundidades del interior del planeta. Es el campo magnético de la Tierra, o *magnetosfera*; y, aunque no puede protegernos de los asteroides entrantes, sí lo hace

de unas partículas espaciales de carga peligrosa que conocemos como *rayos cósmicos*.

Saber qué tenemos bajo los pies es una tarea más difícil, en cierto modo, que descubrir de qué están hechas las estrellas. Puede que las estrellas estén muy lejos, pero aun así podemos analizar la luz que emiten y usar la espectroscopia para determinar qué átomos calientes están generando esta luz. Ahora bien, los sismólogos han realizado un gran avance en la comprensión de la estructura interna de la Tierra al estudiar el modo en que las vibraciones asociadas a terremotos se expanden alrededor del globo. Estas ondas viajan a velocidades distintas en diferentes tipos de rocas y algunas de ellas lo hacen muy por debajo de la superficie, atravesando el interior del planeta antes de ser detectadas en la otra punta del mundo. También se desvían y reflejan, del mismo modo que las ondas de luz se desvían y reflejan frente a cosas como un bloque de cristal. Con las suficientes observaciones, podemos formarnos una imagen de la estructura interior, más o menos del mismo modo en que podemos construir una imagen de la estructura interna del cuerpo humano recurriendo a los rayos X.

Si descendemos desde la superficie, la combinación de las cortezas continental y oceánica de la Tierra solo suman un 0,6% del volumen de nuestro planeta, y solo el 0,4% de su masa. La capa que hay debajo de la corteza, llamada *manto*, se extiende hasta una profundidad de 2900 kilómetros y ocupa el 82% del volumen de la Tierra. El propio manto está dividido en dos regiones con propiedades ligeramente distintas, el manto superior y el inferior;

pero la diferencia no es importante en lo que a la generación del campo magnético de la Tierra se refiere. Eso sucede a una profundidad aún mayor, en el núcleo de la Tierra. El núcleo es una pieza sólida, suponemos que constituida en su mayoría por hierro y níquel, con un diámetro de unos 2400 kilómetros (un radio de 1.200 kilómetros). Por tanto, el punto más alto del núcleo interno está unos 5.200 kilómetros por debajo de la superficie de la Tierra. Pero la acción que nos interesa ahora se desarrolla en el núcleo externo, una capa líquida, rica en hierro y níquel, que se extiende desde el final del núcleo interno hasta la base del manto, en una franja de 2300 kilómetros. En general, el núcleo solo ocupa el 17,4% del volumen de la Tierra (es más o menos del mismo tamaño que Marte), pero es tan denso, presionado por el peso de todo el material que tiene encima, que contiene una tercera parte de la masa de la Tierra.

Con estudios sísmicos se ha demostrado que el núcleo externo es líquido, y los experimentos realizados en laboratorio nos indican que con la presión existente allí abajo, la temperatura a la que se licúa una mezcla de hierro-níquel es de unos 5.000 °C. Por lo tanto, esta tiene que ser la temperatura (tan solo un poco por debajo de la temperatura en la superficie solar) del material líquido en el que se producen las corrientes arremolinadas responsables de que exista un campo magnético en la Tierra.

¿Cómo puede seguir el centro de la Tierra tan caliente después de que han pasado más de 4000 millones de años desde que se formó el planeta? En parte, esto sucede porque las capas externas del

planeta le proporcionan un buen aislamiento, como una manta que conserva el calor en su interior. Pero también porque el núcleo tiene una buena dosis de elementos radiactivos, como el uranio y el torio, que siguen emanando calor mientras se desintegran, aun después de todo este tiempo. Y en el núcleo hay elementos radiactivos debido al entorno en el que se formó el Sistema Solar, a partir de una nube de material previamente enriquecida con escombros de otra supernova cercana o de los vientos de una estrella gigante. Ahí tenemos otra pista para ver que civilizaciones como la nuestra en planetas como el nuestro quizá no sean muy comunes, ya que incluso los planetas del tamaño de la Tierra pueden carecer de núcleos fundidos y, por lo tanto, de campos de fuerza magnéticos que los protejan. Dentro de 4.000 millones de años el núcleo de la Tierra se habrá solidificado por completo y perderá su campo magnético.

El campo magnético es el resultado de corrientes físicas de metales conductores de electricidad que dan vueltas en el núcleo externo y actúan como una dinamo, produciendo corrientes eléctricas que a su vez generan campos magnéticos. La región ocupada por el campo magnético alrededor de la Tierra, la magnetosfera, tiene en realidad forma de lágrima porque por una parte está aplastada por un viento de partículas cargadas que viene del Sol, mientras que la otra se expande en el espacio. En la cara de la Tierra que mira al Sol, la frontera entre la magnetosfera y el viento solar de partículas cargadas, la *magnetopausa*, se sitúa a unos 10 radios terrestres (más de 60 000 kilómetros) por encima de la superficie de nuestro

planeta; por el otro lado, se extiende hasta alcanzar aproximadamente la distancia que nos separa de la Luna, por encima de los 60 radios terrestres. Las partículas con carga eléctrica del viento solar (que son como protones) viajan a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo, la mayor parte del tiempo, con puntas de cerca de 1500 kilómetros por segundo cuando el Sol pasa por las rachas de actividad conocidas como *tormentas solares*. La Tierra, y todo el Sistema Solar, también está bombardeada por partículas del espacio lejano, conocidas como rayos cósmicos.

Todas estas partículas podrían provocar graves daños a la vida si llegasen a la superficie de la Tierra; son, en esencia, lo mismo que las partículas producidas por la radiactividad o las que se desatan en nuestras explosiones nucleares. Pero como tienen carga eléctrica, son canalizadas por el campo magnético de la Tierra hacia los polos, donde interactúan con moléculas de gas a gran altura de la atmósfera y producen la colorida actividad que denominamos aurora boreal.

Aun así, durante las tormentas solares la actividad eléctrica causada por la llegada de estas partículas a la Tierra puede alterar las comunicaciones y distorsionar el campo magnético local hasta el punto de que las líneas eléctricas se vean afectadas y en países de latitudes elevadas, como Canadá, puedan producirse apagones. Cuando se incrementa la intensidad de la fuerza de las partículas del viento solar también pueden dejar fuera de uso los satélites, incluidas las comunicaciones por satélite, y representa un serio

peligro para cualquier astronauta lo suficientemente desafortunado como para encontrarse en el espacio en ese momento. ¿Hasta qué punto resultaría nociva la desaparición total del campo magnético? Pues resulta que ya lo sabemos, porque ya ha sucedido, y más de una vez.

Tal como cabe esperar de un campo magnético producido por corrientes arremolinadas de metal fundido, el campo magnético de la Tierra no es estable. Su fuerza varía de vez en cuando, y la localización precisa de los polos magnéticos deriva por la superficie terrestre. Las rocas que se forman en diferentes épocas conservan un registro del magnetismo previo; cuando la roca fundida se asienta, el campo magnético queda atrapado en él y, por tanto, la roca conserva, como un fósil, una señal tanto de la fuerza como de la dirección del campo magnético que existió tiempo atrás. A partir de estos datos, los geólogos pueden reconstruir el modo en que cambió el campo magnético y lo pueden comparar con las pruebas fósiles de cómo era la vida en aquella época.

Por razones que aún no comprendemos, de vez en cuando el campo magnético va desapareciendo de forma gradual hasta reducirse a la nada y entonces se vuelve a formar, ya sea con la misma configuración anterior o con los polos magnéticos invertidos, de modo que el polo magnético norte se convierte en el sur y viceversa. El registro fósil demuestra que, cuando el campo magnético desaparece, muchas especies de la vida terrestre se extinguen. La explicación obvia es que las especies terrestres en concreto mueren a consecuencia de la radiación del espacio que alcanza la superficie

de la Tierra durante las inversiones magnéticas. De todos modos, tampoco importa tanto cuál sea la conexión, sino que hay un vínculo entre la ausencia de campo magnético y la muerte en la superficie de nuestro planeta. Sin duda, la existencia de una magnetosfera protectora es un factor importante a la hora de permitir que formas de vida como nosotros se hayan desarrollado en el planeta. Una inversión típica tarda varios miles de años en completarse. Una vez el campo ha asumido una orientación, puede permanecer así durante relativamente poco tiempo (100.000 años) o mucho (varias decenas de millones de años). En ocasiones, se producen incluso oleadas de inversiones, con cuatro o cinco cambios en un millón de años; estas tienden a asociarse con procesos de extinción aún más extremos. Si el lector quiere preocuparse por estas cosas, tenemos pruebas de que el campo magnético de la Tierra se está debilitando y de que lleva así miles de años; si la tendencia continúa, desaparecerá bastante pronto (para los estándares geológicos).

Por tanto, otra razón por la que estamos aquí es que la Tierra tiene un campo magnético fuerte; y la causa de que tenga este campo es que posee un gran núcleo metálico, formado a consecuencia del impacto en el que se formó la Luna. De hecho, debemos estar muy agradecidos a la Luna. Y la cuestión no acaba aquí, ni mucho menos. Pero antes de analizar el papel actual de la Luna como agente de conservación de la Tierra como lugar apropiado para la civilización, vale la pena que observemos cómo Venus y Marte han

sufrido la ausencia de los rasgos geológicos que hacen de la Tierra un lugar especial.

§. Venus y Marte

Tal como hemos visto, Venus es casi gemela de la Tierra por su tamaño y podríamos esperar que tuviera una actividad geológica similar. Pero no es el caso. Una explicación parcial es que la gruesa atmósfera de Venus, rica en dióxido de carbono, ha provocado un efecto invernadero desmedido sobre el planeta, sin dejarle agua para, entre otras cosas, lubricar los procesos de las placas tectónicas. Pero la historia no termina aquí; no parece que Venus haya conocido una tectónica de placas como la nuestra. Ahora las sondas espaciales en órbita han cartografiado Venus totalmente por radar, de forma que podemos «ver» su superficie con gran detalle. Aunque esta superficie tiene colinas y valles y hay pruebas de actividad volcánica donde materiales fundidos del interior afloran a través de la corteza, no las hay de movimiento lateral: en Venus no hay deriva continental.

Un rasgo curioso de la superficie de Venus es que no tiene tantos cráteres como las superficies de la Luna, Mercurio y Marte. Los estudios de las superficies de estos otros cuerpos, en especial de la Luna, nos han revelado la velocidad a la que los impactos han continuado sucediéndose desde el Último Bombardeo Intenso. Pero no hay rastro del Último Bombardeo Intenso en Venus, ni de nada más en los 3000 millones de años posteriores; tan solo una cantidad menor de cráteres que creemos se corresponden con el

número de impactos recibidos en los últimos 700 millones de años. La mejor explicación que se ha podido plantear es que hace 700 millones de años, rocas fundidas del interior de Venus atravesaron la corteza en un suceso global y catastrófico y se expandieron por todo el planeta antes de enfriarse; así, esta superficie quedó sin rasgos especiales: se borraron las huellas de impactos previos y quedó una pizarra limpia en la que los meteoritos podían empezar a dejar sus marcas otra vez.

Esta explicación funciona si Venus tiene una corteza gruesa; tan gruesa como habría sido la de la Tierra de no haber sufrido el impacto que dio origen a la Luna. La corteza gruesa, aislante, sella el calor en el interior del planeta, donde la radiactividad hace subir la temperatura hasta alcanzar un punto crítico y toda la superficie se agrieta y se inunda de magma. Una vez liberado el calor, el planeta se calma, la superficie se solidifica y todo el proceso vuelve a comenzar. Venus podría haber resurgido de este modo varias veces desde la formación del Sistema Solar. Este tipo de resurgimiento jamás ocurre a la misma escala en la Tierra, porque el calor escapa de forma constante del interior en las zonas en expansión donde el magma aflora a la superficie.

Disponemos de pruebas que apoyan esta idea, extraídas de lo que puede parecer una cuestión independiente: Venus no tiene ningún campo magnético importante. Esto significa que carece de un núcleo grande y rico en metales. El gran núcleo metálico terrestre y la corteza delgada son ambos el resultado del impacto que dio origen a la Luna; sin haber recibido tal golpe en su historia, Venus

se ha quedado con una corteza gruesa pero sin un núcleo metálico grande. Sin la Luna, lo más probable es que la Tierra hubiera acabado como Venus y nosotros no estuviéramos aquí.

Marte también carece de este tipo de actividad tectónica y de un campo magnético considerable, pero por razones distintas. Es un planeta pequeño, no mayor que el núcleo de la Tierra, por lo que se enfrió enseguida. Solo disponía de un núcleo pequeño y escaso calor interior, así que no podía contener las corrientes arremolinadas de metal fundido que hacen falta para generar un campo magnético, ni el tipo de corrientes de convección que hacen funcionar la deriva continental en la Tierra. De hecho, el calor que hubiera escapó del interior de Marte en puntos calientes que han erigido grandes volcanes durante largos periodos de tiempo. Entre ellos está el volcán más grande del Sistema Solar, el Nix Olímpica (o monte Olimpo), que cubre un área de la extensión del estado de Arizona y se eleva 26 kilómetros por encima del equivalente al nivel del mar de Marte (la superficie «media»). Este y otros volcanes marcianos, casi igual de impresionantes, todavía crecen, muy despacio, gracias al calor residual de debajo de la superficie.

A diferencia de Venus, Marte tiene una atmósfera muy delgada. Quizá comenzó con una mucho más gruesa —hay pruebas de que en otro tiempo tuvo incluso océanos—, pero una combinación de su débil fuerza gravitatoria (como planeta pequeño) y la ausencia de campo magnético dejaron que escapase casi todo el gas, y el planeta se congeló. La falta de campo magnético implica que las partículas del viento solar podían penetrar en la atmósfera, erosionándola

conforme pasaban los eones, mientras que la débil fuerza gravitatoria facilitaba el terreno a la erosión de la atmósfera. Venus también está sufriendo el mismo desgaste, pero aún le queda mucha atmósfera por perder y su atracción gravitatoria es más fuerte. Sin una atmósfera tan gruesa como la de Venus, y de no haber tenido un campo magnético fuerte, la Tierra se habría visto profundamente afectada por el efecto erosivo del viento solar; pero no es algo realmente importante, porque la Tierra solo carecería de campo magnético si la Luna no existiese y el planeta se pareciese más a Venus. Ha llegado el momento de echar un vistazo a los otros beneficios de tener un satélite grande.

§. Un estabilizador planetario

Si nos fijamos en el diámetro de la Luna, tiene un tamaño que supera la cuarta parte de la Tierra. Su masa es solo como una octogésima parte de la masa de la Tierra y, sin embargo, su proporción a la masa del planeta sigue siendo mayor que la de cualquier otro satélite de los grandes planetas del Sistema Solar. En consecuencia, la Luna ha tenido, y tiene, una gran influencia gravitatoria sobre la Tierra y ha sido muy importante para el desarrollo de nuestro planeta. Además de la importancia que tiene el origen de la Luna para la tectónica de placas, las tres grandes influencias de nuestra compañera son: la inclinación, las mareas y la tectónica. Esta última, algo le debe incluso a la gravedad lunar. La inclinación hace referencia al ángulo por el que la Tierra se inclina hacia un lado en su órbita. En lugar de estar recta, con una

línea que la atravesase desde el Polo Norte al Polo Sur en ángulo recto con el plano de la órbita terrestre alrededor del Sol, nuestro planeta está inclinado en un ángulo de 23,5 grados fuera de su vertical. Esta inclinación es la responsable de las estaciones. La Tierra siempre se inclina en la misma dirección en el espacio, de modo que cuando gira alrededor del Sol, primero el Sol está en la cara en la que un hemisferio se inclina hacia el Sol, y es verano allí e invierno en el otro hemisferio; al cabo de seis meses, la situación se ha invertido. La inclinación también representa un papel en los ritmos de las Edades de Hielo; lo veremos más adelante.

Aunque la inclinación terrestre cambia ligeramente en plazos de decenas de miles de años, no puede variar mucho, porque la influencia gravitatoria de la Luna actúa como estabilizador. Si no tuviéramos una Luna tan grande, o si se encontrara mucho más lejos de la Tierra, la influencia combinada del Sol y Júpiter (y en menor medida, también la de otros planetas) tiraría de la Tierra y la haría caer en el espacio, de forma que de repente podría estar casi vertical y de repente cambiar y quedarse completamente tumbada en su órbita (aunque el «de repente», en esta escala temporal, significa como poco 100.000 años). Esta clase de comportamiento es caótica, en el sentido matemático del término, lo que significa que cambios menores en las distintas fuerzas que actúan sobre la Tierra pueden tener consecuencias grandes e impredecibles. Estas caídas caóticas ya se han dado en Marte, donde no hay ningún satélite grande y donde la inclinación puede variar 45 grados al menos, de forma repentina, y hasta 60, con más lentitud. Pero en la Tierra, la

inclinación se ha mantenido prácticamente constante durante centenares de millones de años, al menos, y probablemente mucho más.

No hace falta mucha imaginación para darse cuenta del efecto que tendría en una incipiente civilización tecnológica una caída repentina de la Tierra sobre una de sus caras, en la que, digamos, el Polo Norte pasara a mirar directamente hacia el Sol. Los océanos y la Tierra que rodea el ecuador se congelarían y, en latitudes más elevadas, cada hemisferio, por turnos, experimentaría una secuencia de veranos abrasadores seguidos de gélidos inviernos. Las regiones ecuatoriales no llegarían a derretirse jamás, porque aun cuando la Tierra estuviera «de cara» al Sol en su órbita, la superficie del hielo y la nieve, tan brillantes, reflejaría la mayoría del calor solar entrante. Los trópicos son, por descontado, el hogar de muchísimas especies terrestres, la mayoría de las cuales se extinguiría. Parece que los cambios caóticos en la inclinación son normales en los planetas terrestres, lo cual puede ser relevante por sí solo en el surgimiento de una civilización tecnológica o de cualquier forma de vida compleja basada en la Tierra, en un planeta que «coincide» que tiene un satélite grande.

Como la Luna se va separando de la Tierra de forma progresiva, su influencia estabilizadora acabará desapareciendo con el paso del tiempo, lo cual pone fecha de caducidad a esta oportunidad exclusiva para que una civilización como la nuestra pueda aparecer en la Tierra. Cuando se formó la Luna, estaba mucho más cerca de la Tierra, y se ha ido apartando de forma ininterrumpida a medida

que la energía de su movimiento orbital ha empezado a provocar mareas. Por ahora, se desplaza hacia el exterior a una velocidad de 4 centímetros por año; dentro de dos mil millones de años ya no podrá estabilizar la inclinación de la Tierra. Esto guarda relación con una de las coincidencias más curiosas de la astronomía — y de la ciencia, en realidad—, para la que no parece haber explicación y que continúa siendo un misterio absoluto. Ahora mismo, la Luna es unas cuatrocientas veces más pequeña que el Sol, pero el Sol está unas cuatrocientas veces más lejos que la Luna, por lo que los dos parecen tener el mismo tamaño en el cielo. En el momento actual del tiempo cósmico, durante un eclipse, el disco de la Luna cubre casi exactamente el del Sol. En el pasado, la Luna habría parecido mucho mayor y habría oscurecido por completo al Sol durante los eclipses; en el futuro, la Luna parecerá mucho más pequeña desde la Tierra y se podrá ver un anillo de luz incluso durante los eclipses. Nadie ha sido capaz de dar con una razón de por qué seres inteligentes capaces de darse cuenta de esta singularidad evolucionaron en la Tierra justo en el momento en que esta coincidencia estaba ahí para que se pudiera notar. A mí me preocupa, pero parece que la mayoría de la gente lo admite como una de esas cosas que pasan.

Las mareas son menos preocupantes, porque las comprendemos bien. Y han tenido que representar un papel importante en el surgimiento de vida en el mar y su paso a la tierra. En la Tierra, las mareas se producen, sobre todo, por la fuerza de atracción gravitatoria del Sol y la Luna; en principio, otros planetas participan

también, pero el efecto es demasiado minúsculo como para ser perceptible. Ambos, Sol y Luna, provocan que tanto los océanos como la tierra firme sobresalgan hacia arriba por debajo de ellos y en la cara opuesta del planeta (la protuberancia del extremo contrario la podemos imaginar como algo relacionado con el estiramiento de una Tierra que fuera arrastrada hacia la Luna o el Sol). Mientras tanto, tenemos marea baja. Por su parte, las mareas lunares de hoy son el doble de grandes que las solares. Pero las dos mareas se suman o se eliminan parcialmente en diferentes momentos del mes. Con luna nueva y luna llena, la Luna, la Tierra y el Sol están en línea recta y las mareas se suman. Esto provoca mareas muy altas, conocidas como *mareas vivas*. Con lunas menguantes y crecientes, la Tierra y la Luna están en ángulo recto, y el efecto solar anula la mitad del efecto lunar, lo cual provoca unas mareas mucho menos impresionantes, conocidas (como el lector ya habrá deducido) como *mareas muertas*. Se dan variaciones locales provocadas por la forma del litoral, pero fundamentalmente esto significa que cada lugar en la Tierra tiene dos mareas altas y bajas al día, ya que la Tierra gira bajo la influencia del Sol y de la Luna.

Incluso en la actualidad, las mareas oceánicas nos admiran y, en cierto modo, aún es más impresionante que las mareas de «tierra firme» tengan una amplitud de cerca de 20 centímetros. La tierra que pisamos se eleva y desciende, literalmente, esa distancia dos veces al día, pero no nos damos cuenta porque vamos arriba y abajo con ella. La influencia solar ha sido constante mientras la Tierra se

ha mantenido en su órbita actual. Pero cuando la Luna estaba más cerca de la Tierra, las mareas que arrastraba, tanto en el mar como en tierra firme, eran mayores, tal como cabía esperar.

Las simulaciones del acontecimiento en el que se formó la Luna apuntan que esta se fusionó a partir de un anillo de escombros a no más de 25.000 kilómetros por encima de la Tierra, en lugar de los 384.000 kilómetros que nos separan hoy de nuestro satélite. Eso es menos que la décima parte de la distancia actual entre la Tierra y la Luna. Por entonces, las mareas oceánicas debían de ser enormes, si es que había océanos en aquella época; pero sin duda el ensanchamiento y encogimiento constantes de la tierra firme, junto con mareas sólidas de más de un kilómetro de altura, habrían generado suficiente calor como para mantener la superficie terrestre fundida durante cierto tiempo después del impacto. Pero la enorme cantidad de energía liberada habría visto cómo la Luna se alejaba relativamente deprisa y las cosas se habrían calmado lo suficiente como para que la corteza terrestre se formase (o reformase) en un lapso de un millón de años. Aún así, el calor generado por las mareas lunares dentro de la Tierra habría seguido siendo importante, y habría contribuido, junto con el calor de la radiactividad, a establecer la actividad tectónica en la Tierra.

La Tierra también giraba mucho más deprisa justo después del impacto que dio origen a la Luna, como consecuencia directa del golpe. Las fuerzas de la marea han ralentizado la velocidad de giro de la Tierra a medida que la Luna se apartaba de nosotros. Justo después de que se formase la Luna, un día en la Tierra no duraba

más de cinco horas. En aquel momento, en lugar de mareas de dos metros de altura cada doce horas, las mareas debían alcanzar varios kilómetros de altura cada dos horas y media. No obstante, estas mareas tan extremas no duraron mucho tiempo. Las primeras formas de vida vegetal razonablemente complejas emergieron del mar a la tierra hace poco más de 500 millones de años y —en una coincidencia numérica memorable— hace 400 millones de años un año duraba unos 400 días; por tanto, la aparición de vida compleja a partir del mar sucedió con unas condiciones de marea no tan distintas a las actuales. Las plantas —y, más tarde, los animales— que hicieron la transición a la tierra pudieron hacer este cambio propagándose a partir de las zonas de mareas. En primer lugar, desarrollaron la capacidad de sobrevivir secándose dos veces al día en los intervalos entre las mareas altas; luego, algunos desarrollaron la capacidad de sobrevivir también más allá de la línea de la marea. Este paso debió de representar una gran ventaja evolutiva, puesto que les otorgaba la posibilidad de propagarse y colonizar zonas más grandes en las que no había predadores. Por supuesto, los predadores no tardaron en seguirlos. Pero ¿habría sucedido todo esto con tanta facilidad sin las grandes mareas que van ligadas a nuestro gran satélite?

Cuanto más se mira, más importante parece la Luna para nuestra existencia. En consecuencia, vale la pena regresar a la cuestión de la tectónica de placas, ahora desde una perspectiva ligeramente distinta, y no olvidar que la tectónica de placas terrestre es consecuencia directa del impacto que dio origen a la Luna y de la

constante influencia que la Luna ha ejercido en nuestro planeta para mantener el interior caliente y animar las corrientes de convección.

§. Tectónica de placas y vida

Peter Ward y Donald Brownlee han descrito la tectónica de placas como «el requisito básico para que haya vida en el planeta», entre otras razones por la muy importante de que «es necesaria para que el planeta siga teniendo agua». Pero lo primero que hizo la tectónica de placas fue abastecer a nuestro planeta con tierra y convirtió lo que podría haber sido un mundo acuático en otro con océanos y continentes. Sin continentes, no habría vida terrestre que contemplase las estrellas, que extrajese los minerales metalíferos para levantar una civilización tecnológica o conjeturase sobre la posibilidad de encontrar vida en otras partes del universo. La tectónica de placas es fundamental para que nuestro mundo siga teniendo agua porque gracias a ella la temperatura de la Tierra se mantiene dentro de unos valores aptos para el agua en estado líquido y se cumple el ciclo del agua, que va de los océanos a la tierra y de nuevo al océano.

La temperatura en la superficie de un planeta depende del calor que reciba de su estrella madre, de cuánto se refleje en el espacio y de cuánto quede atrapado en la atmósfera planetaria (el efecto invernadero). Disponemos de una indicación bastante práctica de cuál sería la temperatura terrestre si no existiera atmósfera y solo entrasen en juego los dos primeros factores: la Luna está formada

por el mismo material que la superficie de la Tierra, en lo esencial está a la misma distancia del Sol que nosotros, y no tiene atmósfera. La temperatura media en la superficie de la Luna sin aire es de 18 °C bajo cero, mientras la temperatura media en la superficie de la Tierra es de 15 °C positivos. El efecto invernadero de la atmósfera terrestre es el responsable de esos 33 grados de diferencia. La magnitud del efecto invernadero depende de la concentración de gases como el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua en la atmósfera terrestre (el nitrógeno, el componente principal de la atmósfera, no atrapa el calor de esta forma y no contribuye a lo que a veces conocemos como «termostato global»). Y la concentración de estos gases de invernadero está regulada en gran medida por la tectónica de placas; o lo estaba, antes de que las actividades del ser humano empezasen a afectar a los ciclos naturales.

Los gases de invernadero, en especial el dióxido de carbono y el vapor de agua, se liberan durante la actividad volcánica en cualquier planeta rocoso suficientemente grande como para tener calor interno. Los gases provienen de compuestos químicos presentes en los materiales rocosos con los que se formaron los planetas. En un planeta como Venus, donde no hay tectónica de placas ni agua líquida, estos gases no tienen adónde ir y se acumulan en la atmósfera de modo que ese efecto invernadero se va intensificando conforme pasa el tiempo. Pero en un planeta como la Tierra, en el que sí existe actividad tectónica y agua líquida, la situación se complica. El dióxido de carbono se disuelve en el agua

y luego reacciona con los minerales de las rocas, en especial con los silicatos, y produce carbonato cálcico: piedra caliza. La química se muestra particularmente eficaz en los mares poco profundos, de menos de cuatro metros de profundidad. En efecto, el dióxido de carbono se ha convertido en una roca y, por tanto, ya no puede contribuir al efecto invernadero; no es una coincidencia que la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera de Venus, que es casi del mismo tamaño que la Tierra, sea prácticamente igual a la cantidad de dióxido de carbono apresado en todas las rocas carbonáticas de la Tierra.

Pero aún hay más. La erosión actúa con más rapidez si el agua que participa en ella está caliente. Por lo tanto, si la Tierra se calienta un poco, sale más dióxido de carbono de la atmósfera, se reduce el efecto invernadero y el planeta se enfría. Cuando desciende la temperatura, la erosión es menos eficiente y el aire conserva más dióxido de carbono y vuelve a calentar el mundo. Es un ejemplo de lo que se conoce como *retroalimentación negativa*, de cualquier modo que la temperatura fluctúe, la tendencia natural es volver al promedio a largo plazo. La tectónica de placas aparece en esta historia porque el material generado por la acción de los elementos acaba siendo arrastrado al mar y allí se deposita como sedimento sobre el suelo oceánico. Allí, la cinta transportadora oceánica lo lleva a las zonas de subducción donde se ve forzado a entrar bajo la corteza de un continente y se funde de nuevo con el material caliente de allí abajo. Parte del dióxido de carbono queda liberado durante este proceso y vuelve a la atmósfera a través de los volcanes

asociados con las zonas de subducción. Pero las cordilleras montañosas fruto de esta actividad fomentan las precipitaciones y la erosión, forman rocas carbonáticas en la tierra y devuelven carbonato otra vez al mar. Las placas tectónicas tienen por efecto acelerar todo el ciclo de retroalimentación, de forma que puede responder rápidamente, para los estándares geológicos, a los cambios de temperatura e impedir oscilaciones salvajes de un extremo a otro. El proceso es tan efectivo que si la Tierra se trasladase progresivamente a la órbita de Marte, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera aumentaría su valor actual en unas 12 000 veces, con un incremento del efecto invernadero que mantendría al planeta lo suficientemente caliente como para tener agua líquida y vida.

No obstante, todo esto solo funciona bien si el planeta tiene una capa de agua poco profunda, que permite a la tierra asomar por encima de la superficie. Si todo el planeta estuviera cubierto por un océano profundo —lo que parece totalmente posible, dada la facilidad con que los impactos trajeron agua a la Tierra mientras el Sistema Solar era aún joven—, y dejando a un lado el hecho de que no habría tierra en la que formas de vida como la nuestra pudiesen evolucionar, tampoco tendríamos mares poco profundos en los que abocar las abundantes cantidades de carbonato obtenidas en los procesos químicos protagonizados por los residuos de los materiales terrestres. Al aumentar la temperatura solar, el mundo se habría calentado y el agua habría hervido. Pero si hubiera habido una cantidad notablemente menor de agua y, por tanto, más zonas de

tierra sobre el planeta de las que realmente tenemos, las temperaturas habrían tendido a fluctuar de forma extrema (porque la tierra se calienta y se enfría, ambas cosas, más rápido que el mar), mientras que el aumento de la erosión continental habría reducido el dióxido de carbono de la atmósfera y, de este modo, el planeta se habría enfriado y habría vivido glaciaciones extremas.

En la Tierra real, la vida también aparece en esta historia, tanto porque intensifica la erosión terrestre, por una parte, como porque hay diminutas criaturas marinas que fabrican sus conchas a partir de carbonatos que se depositan en el lecho marino cuando mueren; los famosos acantilados blancos de Dover, como todos los acantilados calizos, se formaron con los restos de innumerables conchas minúsculas acumuladas así. La forma en que interactúan todos estos procesos en un planeta vivo como la Tierra ha sido objeto de una concienzuda investigación por parte de James Lovelock, y podemos encontrar más detalles en sus libros; la obra de Wallace Broecker *How to Build a Habitable Planet* también aborda esta cuestión, aunque solo en parte. Sin embargo, lo que aquí nos importa es que, pese a que otros factores estén implicados, sin la tectónica de placas la Tierra no habría podido conservar una temperatura de superficie que se moviera dentro de los valores necesarios para que existiese agua líquida (es decir, dentro de los valores necesarios para que existiese nuestra clase de vida) durante los miles de millones de años que las criaturas como nosotros hemos tardado en evolucionar. Probablemente, esto se habría convertido en un tórrido desierto como Venus; también cabe la

posibilidad de que hubiera terminado como un mundo helado, tan frío como la Luna.

Todo esto ejemplifica el modo en que las placas tectónicas garantizan la estabilidad en la Tierra. Pero en lo que a la vida se refiere, representaron otro papel crucial: ¡promover el cambio! Imaginemos un planeta del tamaño de la Tierra, con continentes y mares pero sin deriva continental, sin formación de montañas, sin cambios climáticos. Permanecería siempre estable. Quizá existiría vida en ese planeta, pero cada una de las especies encajaría a la perfección en su propio nicho ecológico, sin necesidad de cambiar ni de evolucionar excepto para adaptarse aún mejor a su vida cotidiana. Ha habido épocas a lo largo de la dilatada historia de la vida en la Tierra que, en verdad, ha sido más o menos así. Pero también han llegado las épocas del choque de continentes, del surgimiento de nuevas montañas, del cambio en los patrones de precipitación y de poner en contacto especies que vivían en continentes aislados —en mundos separados, de hecho— y luego tuvieron que competir entre ellas. También llegaron tiempos en que los continentes se dividieron, crearon hábitats distintos en cada uno de ellos y la separación en dos poblaciones de los descendientes de la que había sido una especie única los obligó a seguir caminos evolutivos distintos para adaptarse a sus nuevos hogares.

Charles Darwin consiguió comprender con tanto acierto el mecanismo evolutivo, la selección natural, al observar el modo en que especies de aves estrechamente emparentadas se adaptaban a condiciones distintas, que los obligaban a asumir distintos tipos de

vida, en las islas vecinas de las Galápagos. Pero si todas estas islas hubieran sido idénticas, todos los pájaros se habrían adaptado al mismo estilo de vida y no habrían existido diferencias entre ellas que Darwin pudiera descubrir. No es ninguna coincidencia que los océanos profundos formen la parte del globo que se ve menos afectada por los cambios asociados a la tectónica de placas, y que el océano profundo sea la parte del mundo con menos diversidad de especies. Tampoco es coincidencia, tal como desarrollaré en el capítulo 8, que nuestra propia especie evolucionase en la parte de África que está desgarrándose a consecuencia de la actividad tectónica, en una época en la que la deriva continental estaba cambiando el clima del globo.

En conjunto, parece seguro que las placas tectónicas han sido el factor único más importante a la hora de hacer de la Tierra un lugar especial. Tal como ha señalado David Stevenson, del Caltech, en lo que a planetas se refiere, «la tectónica de placas ni es obligatoria ni habitual». Pero el factor único más importante a la hora de garantizar que la Tierra cuente con placas tectónicas es la Luna; el impacto que dio origen a la Luna significó que la Tierra se quedase con una corteza delgada, y el calentamiento del interior de la Tierra por efecto de las mareas ayudó a poner en marcha la actividad tectónica cuando la Tierra era joven. Puesto que la Luna también ha actuado como estabilizador planetario, impidiendo que la Tierra se volcase en el espacio, y quizá también nos ha protegido de algunos escombros cósmicos que nos habrían alcanzado de no ser porque la Luna estaba en su camino, ello significa realmente que el factor más

importante, a la hora de convertir la Tierra en un lugar apto para el desarrollo de una civilización tecnológica, fue la Luna. Y las lunas como la nuestra escasean, sin duda. El tipo de colisión a partir de la cual se originó nuestro satélite, sucedido entre 30 y 50 millones de años después del nacimiento del Sol, tuvo que desprender grandes cantidades de polvo alrededor del sistema planetario. Pero cuando los astrónomos utilizan el telescopio de infrarrojos Spitzer y contemplan las estrellas que tienen una edad parecida a la del Sol cuando se formó la Luna, descubren rastros de polvo en solo uno de cada cuatrocientos candidatos. Puesto que un impacto capaz de destrozar un planeta no tiene por qué originar un satélite grande, las probabilidades en contra son aún mayores de lo que esto apunta. Dada la probabilidad extraordinariamente remota de que exista otro sistema de planetas dobles como el de la Tierra-Luna, formado del modo en que este lo hizo, las ya escasas posibilidades de encontrar una civilización como la nuestra en la galaxia se reducen drásticamente. Pero en ningún caso hemos agotado la extensa lista de factores especiales que nuestra existencia requiere sin remedio.

Capítulo 6

¿Por qué es tan especial la explosión del cámbrico?

I. Contingencia y convergencia

Contenido:

§. *La explosión del cámbrico*

§. *El esquisto de Burgess*

§. *Contingencia*

§. *Convergencia*

§. *La tercera vía*

La historia de la vida en la Tierra es también la historia de la muerte en la Tierra. No solamente los individuos, sino también los géneros y las especies mueren y son reemplazados por otros. Este es un rasgo fundamental de la evolución por selección natural. Los individuos que están bien adaptados a su entorno prosperan y tienen una nutrida descendencia; los individuos que no se adaptan tan bien mueren jóvenes y dejan menos herederos. Si la historia se redujera a esto, un planeta como la Tierra acabaría con una serie limitada de especies, todas ellas adaptadas perfectamente a su nicho ecológico; y así, en cierta medida, se habría terminado la evolución. Pero no, la historia no se reduce a esto. El entorno cambia, de modo que los antiguos nichos desaparecen y aparecen otros nuevos. En ocasiones, una especie queda aniquilada sin haber cometido ningún «error» propio, como cuando un meteorito enorme golpea la Tierra. Pero lo que para unas especies son catástrofes, son oportunidades

para otras, que se diversifican e irradian para llenar los huecos que han dejado las especies extintas. Cómo sucede esto y qué consecuencias tiene a largo plazo es objeto de un enconado debate entre los expertos. Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard, ha argumentado desde un extremo, mientras que Simon Conway Morris, de la Universidad de Cambridge, ha respondido desde el otro. Para alguien que lo ve desde fuera, la verdad —como tantas veces sucede— parece hallarse en alguna parte intermedia entre los dos extremos, allí donde coinciden puntos clave de cada uno de los escenarios.

§. La explosión del cámbrico

Los antecedentes de este debate se sitúan en la repentina (para los estándares geológicos) proliferación de organismos complejos, animales pluricelulares modernos, en el registro fósil de hace aproximadamente 570 millones de años. Esta explosión de formas pluricelulares es tan importante que se usa como hito en el registro geológico; es el «sello temporal» más importante de toda la geología. Es el inicio del periodo geológico denominado Cámbrico, que se prolongó hasta hace unos 485 millones de años. El periodo Cámbrico es el principio de la era Paleozoica, que terminó hace unos 225 millones de años; a continuación vinieron la era Mesozoica (de hace 225 a hace 65 millones de años) y la Cenozoica (desde hace 65 millones de años hasta hoy). Los límites entre las eras quedan definidos por cambios importantes en la flora y la fauna que habitaban la Tierra. Pero cualquier cosa previa a la explosión del

Cámbrico, los primeros 3500 millones de años de tiempo geológico, se contemplan como una única era, el Precámbrico, en la que no sucedieron cambios drásticos comparables y los océanos se llenaron de organismos unicelulares.

En cuanto a las perspectivas de encontrar vida inteligente en otras partes de la galaxia, es decepcionante lo tardío de la explosión cámbrica: pasaron al menos 3000 millones de años desde la aparición de la vida sobre la Tierra. Dejando a un lado las pruebas más circunstanciales de vida, hace 3800 millones de años, se han recuperado restos fósiles de auténticas células en rocas datadas hace aproximadamente 3600 millones de años. Puesto que los descendientes de aquellos organismos unicelulares, idénticos en esencia a ellos, aún prosperan en la Tierra hoy día, podría decirse que son las especies de mayor éxito en la historia de la vida en nuestro planeta. Durante al menos 2200 millones de años (2400, si damos por buenas las pruebas circunstanciales), toda la vida en la Tierra consistió en estas células simples, llamadas *procariotas*, que son fundamentalmente pequeñas bolsas de gelatina que contienen la química de la vida (elementos como el ADN o las proteínas), pero sin el núcleo y otras estructuras internas que caracterizan las llamadas células *eucariotas* de criaturas como nosotros.

Las células eucariotas son mucho más grandes que las procariotas y, además del núcleo que alberga su ADN, también contienen otras estructuras, como por ejemplo los cloroplastos que llevan a cabo la fotosíntesis en las plantas y los mitocondrios que usan las reacciones químicas para generar la energía que las células de

nuestro cuerpo necesitan. Lynn Margulis, de la Universidad de Amherst en Massachusetts, determinó que esta estructura es el resultado de anteriores procariotas de vida independiente que se unieron para vivir en simbiosis dentro de una sola pared celular. Esto tuvo que suponer una ventaja evolutiva, o no estaríamos aquí para hablar de ello. Pero las células eucariotas solo aparecen en el registro fósil hace aproximadamente 1400 millones de años. Ni siquiera entonces emergieron de golpe los organismos de nuestra clase. Entre la aparición de las eucariotas y la explosión de las formas pluricelulares al principio del Cámbrico pasó casi 1,5 veces el tiempo que media entre la explosión cámbrica y hoy.

Disponemos de algunos vestigios de dos tipos de formas de vida pluricelulares en estratos del Precámbrico tardío o una primera fase temprana del Cámbrico, en los 100 millones de años, más o menos, inmediatamente anteriores a la explosión cámbrica. Pero no tienen el aspecto de ser los antecesores de los animales modernos. Una clase de criaturas, llamadas ediacáricos, parecen haber sido de cuerpo blando y plano, divididas en secciones que se ha dicho guardan cierto parecido con la estructura de un edredón acolchado o un colchón de aire. Gould sostiene que estos organismos serían incapaces de desarrollar un interior complejo y que, si los ediacáricos hubieran seguido dominando, la vida animal en la Tierra se habría quedado «para siempre en las sábanas y las tortitas; una forma de lo más inapropiada para la complejidad consciente de sí misma, tal y como la conocemos». Los primeros vestigios de criaturas con caparazón son del principio del Cámbrico; pero

tampoco parecen los antecesores de los animales modernos; ni, de hecho, parecen formar parte de la misma rama de vida que los ediacáricos. Se llaman *tomotianos* y los paleontólogos resumen su descripción como «fauna pequeña con caparazón». Tanto los ediacáricos como los tomotianos desaparecieron cuando la explosión cámbrica introdujo una enorme variedad de nuevos tipos de cuerpos en el registro fósil, incluidos los filos (*phyla*) básicos, divisiones principales del reino animal tal y como lo conocemos. Por lo tanto, la vía evolutiva que lleva hasta nosotros empieza con la explosión cámbrica. Pero ¿qué ruta siguió esa vía?

§. El esquisto de Burgess

Buena parte de lo que sabemos acerca de la vida animal a principios del Cámbrico proviene de estudios de fósiles descubiertos en los esquistos de Burgess, una formación geológica de las Montañas Rocosas de Canadá. Estos restos se depositaron allí hace cerca de 530 millones de años, en los sedimentos del fondo de un acantilado, en un mar tropical poco profundo; la vida animal no empezaría a trasladarse a tierra hasta transcurrir otro centenar de millones de años, y los vertebrados solo salieron a la superficie terrestre hace unos 380 millones de años. El esquisto de Burgess tiene una importancia especial porque ha conservado los restos de criaturas de cuerpo blando, algo poco habitual, y no solo los fragmentos óseos o de caparazón, que fosilizan con facilidad. Pero allí también encontramos el tipo de fósiles más común, en las mismas proporciones en que aparecen en estratos de la misma época allí

donde no se conservan restos de animales de cuerpo blando. Estos fósiles «duros» representan solo el 5% de la fauna de Burgess, lo cual nos da una idea del grado de restricción al que se verían sometidos los paleontólogos si solo pudieran basar sus investigaciones en estos cuerpos óseos y de caparazón. Al parecer, el esquisto ofrece una representación completa, la mejor de su clase, de la vida animal en aquel momento. Tal como subraya Conway Morris, los fragmentos óseos, aunque son minoría, son iguales a los hallados en otros estratos de la misma época en otras partes del mundo, lo cual nos indica que los miembros de la fauna del esquisto de Burgess no son el resultado de un desarrollo evolutivo extraño en una región aislada del resto del globo, sino «una parte de la corriente normal de la vida en el Cámbrico». Esta fauna se ha popularizado mucho a través del libro *La vida maravillosa*, de Stephen Jay Gould, que se basa en las reconstrucciones de animales realizadas por Simon Conway Morris y sus colegas de Cambridge, aunque Gould y Conway Morris disienten casi por completo en cuanto a la interpretación de estas pruebas, en términos evolutivos.

La prueba es suficientemente clara por sí sola. Las criaturas vivas a principios del Cámbrico asumieron una gran variedad de formas con rasgos anatómicos singulares; muchos de ellos guardan muy poco parecido con los restos hallados antes o después en el registro fósil (esto es, antes o después del Cámbrico). Se han descubierto más de 70 000 especímenes, pero, por mencionar solo unos pocos ejemplos: uno de ellos, el denominado *Nectocaris*, tiene el aspecto

de un vertebrado con caparazón (o, si lo concebimos a la inversa, es como un crustáceo con aletas). Otro, tan raro que Conway Morris lo bautizó con el nombre de *Hallucigenia*, tenía un cuerpo largo apoyado sobre siete pares de patas con aspecto de zancos, con una protuberancia en uno de los extremos (que podría haber sido una cabeza), siete largos tentáculos que se agitaban a lo largo del cuerpo, seis tentáculos cortos en lo que suponemos era el final de la cola del bicho, y un cuerpo que se le torcía hacia arriba después de este racimo de tentáculos. *Opabinia* es una criatura con cinco ojos y una especie de tronco que termina en una pinza, tan extraño que cuando el paleontólogo Harry Whittington presentó el primer dibujo de la criatura en una reunión de científicos de Oxford, el público se echó a reír.

Sin embargo, para entender las razones por las que estamos aquí, la velocidad a la que sucedió la explosión del Cámbrico es aún más importante que la variedad de animales generada. Ya en el siglo XIX, los geólogos sabían sin duda que algo extraño había sucedido a principios del Cámbrico; y ese fue el motivo que los llevó a unificar toda la historia previa bajo la etiqueta de Precámbrico. Al principio no lograron encontrar rastros de vida del Precámbrico, algo que preocupó mucho a Charles Darwin, entre otros autores. Analizó el misterio en *El origen de las especies* y admitió que el hecho de que, a principios del Cámbrico, parecieran haber surgido formas de vida compleja completamente formadas era el argumento más convincente que se podía usar contra su teoría. Pero ahora somos capaces de trazar el camino del origen de la vida hasta los primeros

procariotas, lo que descarta aquel argumento. Nos queda el enigma de cómo y por qué las formas complejas evolucionaron muy deprisa a partir de sus antepasados simples, aunque no de la noche a la mañana, claro, ni en el curso de una semana. Para un paleontólogo, el término «explosión» evoca un paisaje de diversificación de la vida que tuvo lugar durante un intervalo de unos pocos millones de años. Conway Morris ha descrito que, en los montes Flinders de Australia, es posible caminar por un desfiladero en el que los estratos se han inclinado por la acción de fuerzas geológicas, de modo que ahora no se encuentran en capas, una debajo de otra, sino que yacen uno al lado de otro. El paseo por el desfiladero es como un paseo por el tiempo y primero se pasa por capas y capas de rocas que contienen fósiles ediacáricos. Luego estos desaparecen y «los sustituye algo mucho más importante: esqueletos. Esta es la manifestación más clara de la explosión del Cámbrico».

Estamos ante una prueba extrema de la realidad de la explosión del Cámbrico. Y uno de los rasgos más importantes del esquisto de Burgess es que, al contener tanto piezas óseas como restos fosilizados de criaturas de cuerpo blando, nos ofrece garantías de que la diversificación que apreciamos en los estratos en los que solo se encuentran piezas óseas es representativa de lo que estaba sucediendo en la fauna en general. La explosión cámbrica fue un acontecimiento evolutivo auténtico, el más radical en el registro fósil, una época sobre la que tenemos, por decirlo en palabras de Conway Morris, «pruebas convincentes de un cambio profundo en la complejidad anatómica, ecológica y neuronal». En el próximo

capítulo me ocuparé de qué podría haber desencadenado este suceso único; pero antes nos preguntaremos: ¿Cómo evolucionó esta diversidad de la vida cámbrica hasta convertirse en el mundo de la vida moderna, el mundo donde apareció la civilización tecnológica?

§. Contingencia

Hay una imagen popular del modo en que la evolución ha desarrollado la diversidad de la vida en la Tierra, que empieza con una sola célula y se va ramificando, repetidas veces, como un árbol que crece hacia arriba a partir de un solo tallo y, en lo alto, se abre en una soberbia copa. Vistos los miles de millones de años durante los cuales las únicas formas de vida en la Tierra eran organismos unicelulares que flotaban en el mar o alfombraban el suelo marino, el «tallo» tendría que ser realmente largo en proporción a la altura del árbol. Pero la imagen sirve para que nos hagamos una idea. Si lo simplificamos aún más, obtendremos la imagen de un cono invertido: la parte ancha está en lo más alto y la variedad de la vida irradia del primer antepasado. La variedad llega con la propagación de las especies a nuevos nichos ecológicos y con la adaptación a distintos entornos, y la diversidad aumenta conforme va pasando el tiempo.

Pero esta interpretación de la evolución de la diversidad ha sido puesta en tela de juicio, sobre todo por Stephen Jay Gould, que defendió su explicación alternativa en su influyente libro *La vida maravillosa*. Por desgracia, «influyente» no significa necesariamente

«acertado»; pero la tesis de Gould es tan famosa que es importante tratar de ella y aclarar por qué es errónea.

Gould le da la vuelta, de forma literal, a la imagen de la propagación de la diversidad como un cono invertido cada vez más ancho a medida que se aparta del vértice que le sirve de base. Él sostiene que es mejor la analogía de un cono apoyado sobre la base, que se va estrechando a medida que se encoge hasta el vértice. En esta imagen, la base del cono representa la explosión de diversidad que tuvo lugar al principio del Cámbrico y quedó registrada en los esquistos de Burgess; a partir de entonces, sin embargo, la diversidad ha ido menguando, en lugar de aumentar, y muchos de los primeros experimentos con esquemas corporales e incluso formas de vida, tal vez, han desaparecido. Esto no significa que haya menguado el número de especies: los paleontólogos están de acuerdo en que el número de especies ha aumentado con el tiempo. Pero si hay un mayor número de especies emparentadas, también pueden contemplarse como variaciones de un mismo tema, definidas por un único diseño corporal básico: todos los mamíferos, por ejemplo, tienen la misma estructura de base. Lo que se ha reducido es el número de diseños corporales básicos, según Gould. Si adaptamos la analogía del «árbol de la vida», su versión se parece más al árbol de Navidad, con un tronco que representaría la monotonía unicelular de la vida precámbrica, una propagación repentina de diversidad a comienzos del Cámbrico, y luego una reducción hacia una punta. Sean cuales sean las razones que expliquen la aparición de animales pluricelulares a principios del

Cámbrico, todas las clases de formas de vida complejas aparecieron en un florecimiento de experimentación evolutiva, que desde entonces se ha reducido a una sombra del esplendor de antaño; en palabras de Gould, «el espectro máximo de posibilidades anatómicas aflora con la primera oleada de diversificación». Muchos de estos experimentos tempranos desaparecen luego, conforme la vida se asienta y da lugar a numerosas variaciones, pero sobre un corto número de temas. Esto se observa mejor, afirma Gould, cuando contemplamos el número de filos, la principal división de especies dentro del reino animal. Actualmente, tenemos cerca de 35 filos (los biólogos no se ponen de acuerdo en el número exacto, porque a veces los límites son algo arbitrarios). Pero Gould sostiene que muchos de los animales descubiertos en los esquistos de Burgess no pertenecen a ninguno de los filos modernos. En un fragmento clave de su libro, afirma que «los quince o veinte diseños exclusivos de Burgess son filos en virtud de su singularidad anatómica. Este hecho tan notable se debe reconocer con todo lo que implica...» y, según Gould, estos quince o veinte filos no tienen descendientes vivos en la actualidad; lo cual implica que quizá 20 de unos 55 filos originales —casi la mitad— han desaparecido.

Es una afirmación discutida; pero la dejaremos por ahora. Gould aún va más allá. Sostiene que la desaparición de tantos filos no es solamente el resultado de lo que solemos denominar evolución «darwiniana», según la cual la especie mejor adaptada (la que mejor «encaja» con su entorno, no la «más fuerte», como se dice a veces en la cultura popular) sobrevive y el resto se extingue. Por el contrario,

él señala que hay un elemento de azar —en su terminología, de «contingencia»— a la hora de determinar qué especies y qué filos sobreviven y cuales se extinguen. Dicho de otro modo, todo un filo podría desaparecer de la faz de la Tierra tanto a consecuencia de la mala suerte o como por efecto de deficiencias genéticas. El tipo de mala suerte que provocaría extinciones como estas pudiera ser un impacto desde el espacio, o un cambio climático provocado por la deriva continental. Según Gould, «por más que los peces afinen sus adaptaciones hasta alcanzar máximos de perfección acuática, morirán todos, si se seca el estanque».

Esta noción de contingencia es la que lleva a la imagen más poderosa de todo el libro de Gould: la idea de reproducir de nuevo la «cinta» de la vida en la Tierra, empezando otra vez a partir de la fauna que existía cuando se consolidó el esquisto de Burgess. ¿Qué pasaría si pudiéramos rebobinar la evolución para empezar de nuevo en aquel momento? ¿Acabariamos con un mundo bastante parecido al de la Tierra actual, con criaturas como nosotros, que vivirían en un mundo de animales y plantas como los nuestros? ¿O acaso nuestros supuestos antepasados estarían entre los filos que desaparecieron, por accidente más que por diseño, y el mundo quedaría poblado, entre otras criaturas, por las extrañas especies descendientes de los filos que Gould considera extintos en nuestra versión de la historia? Su respuesta es inequívoca: «Cualquier nueva reproducción de la cinta llevaría la evolución por caminos radicalmente distintos del que tomó... Altérese cualquier suceso de los primeros tiempos y, por leve que este sea y parezca carecer de

importancia en ese momento, la evolución discurrirá por un canal completamente distinto».

Esto lleva a Gould a la conclusión de que la evolución de los seres humanos, que empieza con la explosión del Cámbrico, fue un suceso extraordinariamente improbable. Y lo respalda señalando ejemplos en nuestro mundo real y presente, que sugieren que el salto de los simios (o, al menos, de un tipo de simios) a la inteligencia fue una conclusión que distaba mucho de ser previsible. Hay una concepción generalizada sobre el ascenso de los mamíferos, en el contexto de la historia de la vida en la Tierra, que dice que los dinosaurios dominaron el planeta durante cientos de millones de años, mientras los mamíferos existían como criaturas pequeñas que corrían entre la maleza o escarbaban en la tierra, quizá de noche, alejados de los dinosaurios. Solo a partir de la extinción de los dinosaurios, hace unos 65 millones de años, se abrió el camino a los mamíferos, que pudieron propagarse y diversificarse ocupando los nichos ecológicos que acababan de dejar vacíos los dinosaurios, lo que condujo al inevitable «ascenso» de los simios y a nuestra propia aparición. Pero Gould señala que, hace 50 millones de años, el ascenso de los mamíferos no le habría parecido inevitable a ningún biólogo alienígena que visitase la Tierra. En aquella época, pájaros carnívoros gigantescos, parientes cercanos de los dinosaurios, deambulaban por Europa y América del Norte. Algunos alcanzaban los dos metros de altura, tenían cabezas enormes, picos muy fuertes y patas con garras feroces, aunque las alas eran solo testimoniales. Se parecían más a una versión

reducida del Tiranosaurio Rex que a los pájaros cantores modernos. Pájaros y mamíferos rivalizaron en la sucesión de los dinosaurios y desconocemos por qué triunfaron los mamíferos, en lugar de los pájaros. Gould pensaba que fue por mero azar, lo que él llama contingencia, en lugar de por la superioridad evolutiva de los mamíferos, y respaldó su teoría con ejemplos de América del Sur.

Hace cincuenta millones de años, América del Sur era un continente insular, que no se unió a América del Norte hasta hace tan solo unos pocos millones de años. En América del Sur, los pájaros se habían convertido en los carnívoros dominantes, si bien es cierto que estas especies murieron en su mayoría antes que los mamíferos del norte cruzasen el Istmo de Panamá e invadieran el territorio. De nuevo seguimos sin saber por qué; no sabemos por qué los pájaros consiguieron dominar América del Sur, ni por qué se extinguieron. Pero el hecho de que los mamíferos se convirtieran en los carnívoros dominantes en una parte del mundo y los pájaros lo fuesen en otra hizo pensar a Gould que, en ambos casos, el resultado dependió más de la suerte que de la superioridad evolutiva.

Pero en cuanto a esos pájaros carnívoros de América del Sur, existe otro factor que nos permite comprender la evolución de un modo distinto. Aunque no estaban estrechamente emparentados con la versión reducida del Tiranosaurio Rex que vagaba por Europa y América del Norte, en posición erguida alcanzaban casi los tres metros de altura, y tenían también cabezas enormes, cuellos anchos y fornidos, alas vestigiales y patas con garras feroces. Este es un ejemplo de la evolución convergente; las mismas presiones

evolutivas que hicieron de este tipo de diseño corporal un éxito en Europa y América del Norte funcionaron también en América del Sur. Para Gould, esta convergencia es un rasgo secundario, de importancia menor. En cambio, para Conway Morris, la convergencia se halla en el corazón mismo de la historia de por qué estamos aquí.

§. Convergencia

Buena parte de la tesis de Gould se basa en la afirmación de que muchos filos presentes en los esquistos de Burgess no tienen equivalentes hoy en día. Pero, en realidad, no fue el propio Gould quien analizó los fósiles de Burgess. Tal como reconoce él mismo, su interpretación se basa en las reconstrucciones llevadas a cabo por Simon Conway Morris y sus colegas. Ahora bien, hay un detalle que pasa mucho más desapercibido: su interpretación se basa en los primeros trabajos de estas personas. Mientras Gould escribía *La vida maravillosa*, en la segunda mitad de la década de los ochenta, estos autores seguían perfeccionando afanosamente los análisis y las interpretaciones de los restos fósiles. Tras la aparición del libro de Gould, sacaron a la luz más información de Burgess (incluidos nuevos estudios sobre el habitante arquetípico del esquisto, la *Hallucigenia*) y también se realizaron nuevos descubrimientos en estratos del mismo periodo situados en China, Groenlandia y otros lugares del mundo. Todo esto alentó en Conway Morris el deseo de escribir su propio libro, *The Crucible of Creation*, que apareció poco

antes del año 2000. ¿A qué conclusión llega Conway a partir de los datos?

Según Conway Morris, «hasta la fecha, los datos no apoyan la metáfora [de Gould] de un «cono de vida invertido». Aunque a primera vista parecía difícil clasificar muchos de los fósiles del esquisto de Burgess, con su extraña apariencia, dentro de grupos conocidos como por ejemplo los filos, tras una investigación más concienzuda el equipo de Cambridge se convenció de que, más que representar filos extintos, en realidad los raros y maravillosos fósiles del primer Cámbrico permitían ahondar más en el conocimiento de cómo evolucionaron los filos actuales. Dicho de un modo más coloquial, con un sintagma que Conway Morris probablemente desaprobaba, estos fósiles representan «eslabones perdidos», más que ramificaciones distintas del árbol evolutivo. En su esquema, ha llegado a encontrar incluso un sitio para los ediacáricos, que él interpreta como miembros del filo cnidario, en el que se encuentran las medusas actuales.

Conway Morris rechaza la antigua idea de que la diversidad (con el sentido que yo le doy al término) crezca, a medida que pasa el tiempo, como un cono apoyado sobre el vértice; y rechaza también la idea de Gould según la cual la diversidad disminuye a medida que pasa el tiempo, como un cono apoyado sobre la base o un árbol de Navidad. E igualmente rechaza la posibilidad de que hubiera una explosión de diversidad a principios del Cámbrico tras lo cual se hubieran sucedido pocos cambios. Al contrario, sostiene que hubo una auténtica proliferación de vida animal en los inicios del

Cámbrico y que, desde entonces, se han producido largos intervalos de tiempo durante los cuales hubo pocos cambios en lo que a diversidad se refiere, interrumpidos por breves lapsos en los que aumentó la diversidad, por más que nunca a una escala tan espectacular como al principio del Cámbrico: «innovaciones ocasionales en la evolución cuyas consecuencias se extienden por la biosfera y traen consigo tiempos de cambio rápido». Estas explosiones menores en la diversidad, con frecuencia (o tal vez siempre), están vinculadas con cambios en el entorno terrestre, ligados a cambios geográficos provocados por la deriva continental, impactos desde el espacio y otros sucesos. Esta es una pista muy importante en lo que se refiere a la causa de la explosión cámbrica en sí, que será el tema del próximo capítulo.

Uno de los temas que aborda Conway Morris es la continuidad y el carácter interrelacionado de la vida en la Tierra, y lo que esto nos dice sobre los orígenes del hombre. En el nivel más básico de la bioquímica, todas las células del cuerpo (y todas las demás células vivas en la Tierra) actúan esencialmente del mismo modo que las células de las bacterias «primitivas», prueba fehaciente de que toda la vida que hay hoy en la Tierra ha evolucionado a partir de un único antepasado. La característica más importante de los humanos, el cerebro, si bien es grande y digno de admiración, está construido esencialmente del mismo modo que el cerebro del pez primitivo, lo cual nos indica que esta estructura evolucionó hace al menos quinientos millones de años. Y la estructura de lo que se convertiría en el miembro pentadáctilo, con cinco dedos en cada

apéndice, puede observarse en los restos fósiles de peces hallados en rocas de hace 370 millones de años, en Groenlandia.

Tal como demuestran estos ejemplos, es asombroso cuánta variedad puede producir la evolución a partir de un solo tipo de esquema corporal. Por tomar un ejemplo un poco más alejado de los humanos, los caracoles de un jardín, las lapas, las ostras e incluso los pulpos (nadadores o caminantes) son todos ellos miembros del filo de los moluscos, y todos han evolucionado a partir de un solo antepasado común. El pulpo en particular es un ejemplo interesante, porque ha desarrollado una forma cerebral compleja y un ojo muy parecido a la lente de una cámara, de un modo bastante independiente a la senda evolutiva que a nosotros nos ha conducido hasta nuestro cerebro y nuestros ojos. Según señala Conway Morris, en lo que respecta a la evolución, «no existe un número infinito de formas de hacer algo. Pese a su exuberancia, las formas de vida están restringidas y canalizadas». Aquí es donde hace su aparición la convergencia, al apuntar que, en la generación de nuestra inteligencia, hubo bastante más que una simple cuestión de suerte.

Ya nos hemos encontrado con un ejemplo de la convergencia, la forma en que los pájaros asesinos de América del Sur y los de Europa y América del Norte desarrollaron cuerpos relativamente parecidos para alcanzar un éxito similar en sus nichos ecológicos, más o menos en el mismo momento del tiempo geológico. Disponemos de otros ejemplos muy distanciados en el tiempo. La especie marina bautizada como ictiosaurio estuvo nadando en los

océanos del mundo desde hace 245 millones de años hasta hace 90 millones de años y tuvo su época de florecimiento en el periodo Jurásico, hace entre 200 y 145 millones de años. Eran criaturas que respiraban aire y habían evolucionado a partir de criaturas terrestres que volvieron al agua; crecieron hasta alcanzar un tamaño de unos dos o tres metros e incluso parían a sus crías, en lugar de poner huevos. Tenían un aspecto parecido al de los delfines modernos y suponemos que también se comportaban como ellos. Las mismas presiones evolutivas que hicieron del cuerpo y de la forma de vida del ictosaurio un éxito en el Jurásico, han conseguido que el cuerpo y la forma de vida del delfín actual sean igualmente un éxito en nuestro tiempo geológico, el Cuaternario.

Conway Morris también llama la atención sobre otros ejemplos. Un gran gato de dientes de sable, parecido al famoso tigre de dientes de sable, evolucionó en América del Sur a partir del tronco de los marsupiales; pese a su apariencia exterior, guarda más relación con el canguro que con los tigres vivos. Y Australia, el hogar del canguro, también lo es del topo marsupial que, como su equivalente mamífero, «también está equipado con extremidades delanteras preparadas para cavar y ojos frágiles acordes con su existencia subterránea». Con estos y otros ejemplos (analizados en su libro *Life's solution*, «La solución de la vida») hace hincapié en que «una y otra vez disponemos de pruebas de formas biológicas que dan con la misma solución para un problema». Si la cinta de la vida pudiera, realmente, volver a reproducirse a partir de la explosión cámbrica, aunque «la evolución de la ballena... no sea más probable que la de

cientos de otros resultados finales, sí lo será la evolución de algún tipo de animal rápido, un habitante de los océanos que críbe el agua marina en busca de comida; y tal vez sea casi inevitable». John Maynard Smith, que fue ingeniero aeronáutico antes de convertirse en biólogo evolutivo, me comentaba una vez en la misma línea que lo que él llamaba «diseño de ingeniería» restringe la posible variedad de formas biológicas; por eso no es una sorpresa que, por ejemplo, el ojo de lente haya evolucionado en más de un caso (de hecho, ha sucedido al menos seis veces). El número de posibilidades evolutivas es limitado y las mismas posibles soluciones a problemas evolutivos se han alcanzado en distintas ocasiones. Sin duda, nos encontramos ante una confirmación sólida de que la vida evoluciona adaptándose a las condiciones en que se encuentra.

Pero si hablamos de la evolución de una especie inteligente que explota minas metalíferas y construye radiotelescopios y naves espaciales, ¿es «probable» o tal vez «inevitable»? Llevando la tesis de la convergencia hasta el límite, Conway Morris sugiere que, a partir de la explosión cámbrica, la inteligencia era casi inevitable. Esto es exactamente lo contrario de lo que sostiene Gould: que la inteligencia era de lo más improbable. Pero el argumento de Morris no será del agrado de nadie que espere establecer contacto con la vida extraterrestre, porque él cree que la vida en sí misma «fue el producto de un suceso insólito y extraordinariamente raro» que tuvo lugar al principio de la historia de nuestro planeta. Desde este punto de vista, una vez se ha alcanzado la vida, la inteligencia es inevitable; pero la Tierra podría ser el único planeta con vida. Desde

mi punto de vista, tanto la contingencia como la convergencia tienen su parte en la historia de la vida y la aparición de los seres humanos. Pero esto no ofrece a los entusiastas de la vida extraterrestre ninguna base para el optimismo.

§. La tercera vía

En el mundo real, tanto la contingencia como la convergencia han representado sus papeles propios a la hora de generar una civilización tecnológica. El ejemplo clásico de contingencia es la «muerte de los dinosaurios», hace unos 65 millones de años, hoy considerada por casi todo el mundo la consecuencia del impacto contra la Tierra de un gran meteorito, una roca de unos 10 o 12 kilómetros de ancho. Seguiremos con esto en el capítulo siguiente; la cuestión más destacable aquí es que durante casi cien millones de años, antes de este impacto, los dinosaurios dominaron los nichos de los animales grandes sobre la Tierra, mientras que los mamíferos existían como miembros insignificantes de la ecología global. Fue la muerte de los dinosaurios la que brindó su gran ocasión a los mamíferos, aunque esa posibilidad también ofreciera, quizá, oportunidades para las aves. En cuanto a la convergencia, no existe ejemplo mejor que el del ictiosaurio y el delfín.

Pero la extinción de muchas especies de vida en la Tierra, que se ha denominado «muerte de los dinosaurios» y es más apropiado designar como «acontecimiento de extinción terminal del Cretácico», pues marcó el final del periodo Cretácico del tiempo geológico, no fue un suceso aislado. El registro fósil muestra que, desde el

Cámbrico, han sido numerosas las ocasiones en las que, por una u otra razón, se han extinguido especies en gran número. Los más extremos de estos casos de extinciones masivas se han bautizado con el nombre de «cinco grandes». El acontecimiento terminal del Cretácico fue el más reciente de los cinco, pero no el mayor.

Los «cinco grandes» se consideran casos de extinción masiva porque al menos el 65% de las especies animales marinas perecieron; y se elige a los animales marinos como punto de referencia porque sus fósiles tienden a preservarse con más eficacia que los de los animales terrestres. Pero en cierto sentido, a un filo le resulta más fácil sobrevivir que a una especie; antes de una extinción masiva, un filo en particular podría contar con muchas especies en su seno; después del acontecimiento, no importa cuántas especies puedan haber perecido, ya que mientras un miembro del filo sobreviva, el filo sigue existiendo. La extinción masiva más extrema de las «cinco grandes» marcó el fin del período Pérmico, hace unos 225 millones de años, y comportó la desaparición del 95% de las especies animales marinas. En la pizarra evolutiva se borraron casi literalmente los organismos complejos multicelulares; en el periodo posterior a este acontecimiento, los dinosaurios se alzaron a la posición de dominio. Los otros casos incluidos en los «cinco grandes» marcan el fin del periodo Ordovícico, hace 440 millones de años; el final del Devónico, hace 365 millones de años (justo antes de que los vertebrados, nuestros antecesores directos, pasaran a la tierra); y el final del Triásico, hace 210 millones de años.

Las extinciones no siguen ningún patrón obvio, aunque el acontecimiento terminal del Cretácico se puede relacionar, definitivamente, con un impacto del espacio. Pero lo que ha sucedido antes puede volver a ocurrir otra vez, por descontado, y no hay razón para suponer que el *Homo sapiens*, o cualquier joven civilización que emerja en otro planeta, será inmune a tales desastres, así como no lo fueron los dinosaurios. Se trata de un nuevo factor que también limita las probabilidades de que una civilización tecnológica se desarrolle hasta el punto del viaje interestelar o incluso de la comunicación interestelar.

La mejor hipótesis es que muchas de las «cinco grandes» extinciones masivas y, posiblemente, algunas de las extinciones menores que se observan en el registro fósil, se originaron en cambios en el clima asociados con la geografía cambiante del globo, causada a su vez por la deriva continental. El acontecimiento que puso fin al Pérmico, por ejemplo, ocurrió cuando toda la tierra del planeta estaba unida en un único supercontinente, Pangea, que se extendía de un polo al otro. Esto reducía la disponibilidad de mares poco profundos en los que pudieran prosperar los organismos marinos y provocó que el interior continental, alejado del océano, se secara.

El paleontólogo Steven Stanley, que ha realizado un estudio especial de las extinciones, afirma que probablemente el enfriamiento global ha sido el causante principal de tales extinciones, debido a la «relativa facilidad con la que un cambio en las temperaturas globales puede eliminar especies por miríadas». En una Edad de Hielo, las latitudes elevadas se tornan inhabitables y los hábitats

restantes se reducen hacia el ecuador. Si hoy los trópicos dejaran de contar con un clima «tropical» tal como lo conocemos, ello causaría la muerte de un número muy elevado de especies. Como ha afirmado el paleoantropólogo Richard Leakey, la evolución «no puede anticipar acontecimientos futuros». Pero este autor también ha descrito las extinciones masivas como «una fuerza creativa de gran importancia en la conformación del flujo de la vida... las extinciones masivas no solo retrasan el reloj de la evolución, con una vuelta atrás temporal, pero brusca; también cambian la apariencia del reloj. Crean el patrón de vida».

En un texto de 1989, Gould resumió los misterios centrales de la historia de la vida en: (1) ¿Por qué la vida multicelular apareció tan tarde?, y (2): ¿Por qué esas criaturas anatómicamente complejas no tienen precursores directos, más simples, en el registro fósil de los tiempos precámbricos? Diez años más tarde, Conway Morris, con una perspectiva ligeramente distinta (pero solo ligeramente), afirma que «podemos estar razonablemente seguros de que cualquier animal anterior a los ediacáricos habría sido minúsculo, de tan solo unos pocos milímetros de longitud... Lo que más adelante provocó su aparición inicial como fauna ediacárica y, consiguientemente, la explosión cámbrica, aún más espectacular, sigue siendo un tema de discusión importante». Cuando haya pasado otra década, parece muy probable —y ahora se tiende a reconocer así ampliamente— que una serie de cambios medioambientales de gran calado, vividos en nuestro planeta hace unos 600 millones de años, proporcionen al menos una clave parcial para la resolución de esos rompecabezas.

Por mi parte, entiendo que estos hechos, por sí mismos, pueden relacionarse con cambios que ocurrían por todo el Sistema Solar interior en aquella época. Una de las razones principales por las que estamos aquí quizá esté escrita en el rostro de Venus.

Capítulo 7

¿Por qué es tan especial la explosión del cámbrico?

II. El Venus invernadero y la Tierra bola de nieve

Contenido:

- §. Después del hielo*
- §. Inclinar la balanza*
- §. ¿Desde fuera o desde dentro?*
- §. El impacto arquetípico*
- §. Nubes cósmicas y polvo cometario*
- §. Polvo de diamantes y estiramiento*

Después de la aparición inicial de la vida misma, los dos acontecimientos más significativos acerca de la vida en la Tierra fueron la aparición de las células eucariotas, hace 2.500 millones de años (más de 1.000 millones de años después del surgimiento de las células procariotas), y la explosión de las formas de vida multicelulares, con la abundancia de vida animal consiguiente, hace alrededor de 600 millones de años. Existen pruebas convincentes de que estos acontecimientos ocurrieron después de los dos cambios medioambientales más severos que ha experimentado la Tierra desde la formación de la Luna, glaciaciones tan extremas que incluso los trópicos se congelaron. Es posible restar importancia a una yuxtaposición semejante y considerarla una mera coincidencia; pero el hecho de que los dos mayores desarrollos evolutivos se produjeran después de una de las dos mayores catástrofes

ambientales nos dice con claridad que estamos ante una relación de causa y efecto. Como acaso diría la Lady Bracknell de Oscar Wilde: el hecho de que después de una glaciación se produzca un salto evolutivo puede considerarse una coincidencia; el hecho de que ocurra dos veces sugiere una pauta. Y aunque desconocemos el mecanismo exacto a través del cual un desastre ambiental desencadena un estallido de actividad evolutiva, está claro que esto coincide con la pauta que, en una escala menor, se asocia con las extinciones menores de los últimos cientos de millones de años.

§. Después del hielo

Estas glaciaciones globales, capaces de convertir la Tierra en una gran «bola de nieve», son visibles en las marcas que los glaciares dejaron en la roca, marcas que demuestran que en ambas ocasiones toda la superficie terrestre del planeta se congeló, mientras que otros testimonios indican que la mayoría de los océanos, si no la totalidad de ellos, quedaron cubiertos de hielo. Este es un estado peligroso para nuestro planeta, y otro obstáculo más para la vida. Una vez que la Tierra se congela, refleja tanto el calor del Sol que resulta extremadamente difícil que el hielo se funda. Si el hielo cubre la tierra, más allá del problema que plantea el frío, está el inconveniente del poco espacio disponible para la vida (y hace 2500 millones de años no existía vida terrestre); y si el hielo cubre los mares, la luz solar no puede penetrar en el agua para posibilitar la fotosíntesis y otros procesos que dependen de su energía. La vida se abre paso con dificultad en charcas aisladas o lagos medio

derretidos repartidos aquí y allá, y ello produce diversidad a medida que la evolución empuja a las células a adaptarse a las condiciones ambientales de su pequeño entorno. Es muy posible que la célula eucariota se «inventara» solo una vez, en una charca medio derretida, y se propagara a partir de allí cuando la Tierra se descongeló.

Ahora bien, ¿por qué se descongeló esa Tierra bola de nieve? La única posibilidad parece ser la acumulación de gases de efecto invernadero, en particular de dióxido de carbono, que atraparon el calor procedente del Sol, lo que, llegado el momento, elevó la temperatura de la superficie lo suficiente como para que el hielo empezara a derretirse. Una vez se alcanzó ese umbral, la cantidad de calor reflejado al espacio disminuyó a medida que el hielo iba fundiéndose, lo que fomentó aún más el calentamiento en un proceso acelerado que puso fin al estado bola de nieve.

Esto coincide en gran medida con lo que en la actualidad entendemos sobre cómo se regula la temperatura de la Tierra. Los volcanes liberan a la atmósfera gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Pero este se disuelve en el agua, así que a medida que el agua se filtra a través de las rocas, las reacciones químicas relacionadas con la erosión incorporan parte de ese dióxido de carbono a rocas como la piedra caliza (incluidas las estalactitas y estalagmitas que encontramos en las cavernas de piedra caliza). Asimismo, algunos seres vivos toman dióxido de carbono del aire y lo incorporan a sus caparazones. Si el planeta se calienta un poco, la meteorización aumenta y, con ella, la cantidad

de dióxido de carbono que se suprime del aire. Esto reduce el efecto invernadero y enfría la Tierra. Si el planeta se enfría, la meteorización es menos eficaz (entre otras razones porque hay menos lluvia) y el dióxido de carbono se acumula de nuevo en el aire, lo que vuelve a calentar la Tierra. En la actualidad (al menos antes de la intervención de las actividades humanas) este proceso de realimentación negativa ha estabilizado la temperatura de nuestro planeta dentro de un rango bastante estrecho. Sin embargo, durante una glaciación global, la Tierra bola de nieve, la meteorización es muy poca, pese a que los volcanes continúan lanzando dióxido de carbono a la atmósfera, y el efecto invernadero aumenta hasta que se alcanza el punto crítico en el que el hielo empieza a derretirse. A medida que el calentamiento se afianza y el hielo retrocede, la cantidad de calor solar que se refleja al espacio se reduce, lo que fomenta el calentamiento y proporciona más nichos para la vida, que, en consecuencia, empieza a florecer más allá de los lugares a los que había quedado reducida hasta conquistar de nuevo el mundo (o, al menos, los océanos). Todo el proceso de descongelación tarda unos cuantos millones de años, puede que hasta veinte.

Con la vida propagándose por los océanos durante este intervalo y una abundante provisión tanto de dióxido de carbono como de nutrientes, que las lluvias se encargan de filtrar en la tierra, este periodo de descongelación será testigo de una explosión de actividad fotosintética silvestre que se traduce en la multiplicación de organismos a lo largo y ancho de los océanos, como las algas verdes

que con frecuencia vemos aparecer en los estanques, y la liberación de cantidades elevadas de oxígeno en el aire como consecuencia de ello. El efecto directo del «pico» de oxígeno asociado con la primera Tierra bola de nieve puede apreciarse en rocas de dos mil quinientos millones de años de antigüedad de todo el mundo, en las que se formaron enormes depósitos de óxidos de hierro a medida que el oxígeno liberado en el aire reaccionaba con compuestos de hierro (de hecho, el mundo se fue oxidando a medida que se calentaba y salía del estado bola de nieve). La presencia de oxígeno libre en el aire por primera vez también impulsó cambios evolutivos: algunos organismos no pudieron soportarlo y murieron, otros se adaptaron, aprendieron a usar el oxígeno y prosperaron. Con todo, desde nuestra perspectiva, el suceso clave de la primera Tierra bola de nieve fue que dio origen a las células eucariotas. Sin esa gran glaciación, no estaríamos aquí. Y eso requiere un descenso de temperatura mucho mayor del que se necesita para que nieve. Sin embargo, eso solo explica por qué el planeta no se congeló antes. El desencadenante exacto de lo que ocurrió hace dos mil quinientos millones de años sigue siendo un misterio.

No obstante, es indudable que las placas tectónicas desempeñaron un papel en los acontecimientos que siguieron a la primera Tierra bola de nieve. Una de las razones para el florecimiento de la vida entre las dos glaciaciones globales es que para entonces la superficie seca del planeta empezaba a tener un área cercana a la actual. Todavía no había vida terrestre; pero los continentes estaban rodeados por mares someros y en los mares someros son

abundantes tanto la luz solar, necesaria para la fotosíntesis, como los nutrientes del suelo que el agua arrastra consigo, lo que los convierte en un lugar ideal para que la vida prospere (como demuestra Burgess Shale). Por desgracia, carecemos de datos concretos sobre el período, y los expertos siguen sin ponerse de acuerdo en la disposición exacta de los continentes en el momento en que se produjo la segunda fase de glaciaciones globales, si bien hoy sabemos con precisión que este suceso, que los geólogos conocen como glaciación Sturtian, tuvo lugar hace poco más de setecientos millones de años.

La glaciación Sturtian duró por lo menos cinco millones de años y se extendió hasta el Ecuador. No obstante, el hecho de que la vida eucariota sobreviviera a ella implica que la Tierra no pudo haber quedado literalmente convertida en hielo sólido. Tuvo que haber zonas de mar abierto o estanques medio derretidos a los que llegara la luz del Sol, y en esta ocasión la proliferación que siguió al deshielo fue testigo, entre otras cosas, del surgimiento de los primeros animales.

Los investigadores Joseph Meert, de la Universidad de Florida, y Trond Torsvik, de la Universidad de Oslo, revisaron la limitada información disponible y concluyeron que entre ochocientos y setecientos millones de años atrás la mayoría de la superficie continental del planeta se concentraba al parecer en latitudes bajas. Por sí solo esto podría haber favorecido la congelación de la Tierra. En ese momento no había vegetación sobre la superficie y las rocas desnudas reflejan la energía solar de forma más eficaz que el mar,

de modo que a bajas latitudes la tierra efectivamente hace que el planeta sea más frío. Ahora bien, ¿puede enfriarlo lo suficiente como para congelarlo por completo? Esto parece particularmente improbable, pues la otra cara de esta moneda geográfica es que con tanta tierra cerca del Ecuador, las regiones polares quedan con facilidad al alcance de las corrientes oceánicas cálidas procedentes de latitudes inferiores, lo que hace difícil que el océano se congele incluso en invierno.

Pero, ¿por qué se congeló la Tierra hace dos mil quinientos millones de años? La respuesta corta es que no lo sabemos. Fue un suceso que ocurrió hace tantísimo tiempo que es difícil hallar pruebas de lo que lo causó. Una explicación parcial es que las placas tectónicas (la deriva continental) jugaron un papel en ello. Cuando el planeta era joven, la tierra firme era escasa, y sin tierra la nieve no tiene donde asentarse y formar capas de hielo. La nieve que cae sobre la tierra empieza a reflejar el calor procedente del Sol tan pronto como se asienta; la nieve que cae en el océano sencillamente se funde a menos que el agua se congele. Y es difícil que el océano se congele incluso en invierno. No obstante, una vez que los continentes estuvieron cubiertos de nieve y hielo, la reflectancia extra concentrada en el lugar preciso para devolver la mayor parte del calor procedente del Sol pudo enfriar el planeta lo suficiente para lanzarlo a un estado bola de nieve. Los modelos informáticos han mostrado que una vez aparece hielo marino en un margen de treinta grados desde el Ecuador este se difunde a latitudes más altas y la tierra entera se congela. Pero, aunque resulte paradójico, ello

empieza en latitudes bajas. Lo que se necesita es un desencadenante, alguna influencia externa capaz de inclinar el equilibrio térmico lo suficiente como para que nieve en el Ecuador. Eso suena improbable; pero algo debió de haber hecho que ocurriera, y la ausencia de pruebas fehacientes ha dado lugar a varias especulaciones más o menos respetables. Mencionaré solo dos: una de las primeras y la que considero mi favorita.

§. Inclinar la balanza

La primera especulación es que en la época en que se produjo esta glaciación global, la Tierra quizá estaba más inclinada (es decir, tenía una oblicuidad más alta). Esta idea se remonta a los años setenta, cuando fue propuesta para explicar la glaciación Sturtian, y es anterior al descubrimiento según el cual en esa época toda la Tierra quedó presa del hielo.

Una oblicuidad alta, con la Tierra inclinada más de 55 grados respecto de la vertical, es de hecho una buena forma de enfriar los trópicos. Bajo estas condiciones, los polos reciben a lo largo de un año más luz solar que el Ecuador, y si hubiera algo de tierra en los polos en verano alcanzarían una temperatura que podría superar el punto de ebullición del agua. Esto plantea de inmediato la cuestión de cómo pudo extenderse el hielo a los polos en semejantes condiciones, incluso con glaciares en los trópicos. Una alta oblicuidad puede funcionar como explicación de glaciaciones tropicales aisladas, pero no una glaciación global como la que

plantea la idea de la Tierra bola de nieve. Pero obviemos eso; el modelo tiene muchos otros problemas de qué preocuparse.

Un problema es cómo llegó a inclinarse tanto la Tierra hace unos 700 millones de años y cómo pudo recuperar luego una posición más erguida. A fin de cuentas, con la inclinación actual, de unos 23,5 grados, la Luna actúa como un estabilizador que impide cualquier cambio tan extremo de la oblicuidad. Yo he propuesto que esa es una de las razones por las que estamos aquí. Pero esa no es en absoluto toda la historia. Resulta que si el impacto en el que se formó la Luna hubiera dejado a la Tierra con una inclinación de entre 60 y 90 grados, el planeta podría haberse bamboleado caóticamente dentro de esos límites, incluso estando presente la Luna. Por tanto, para sostener el argumento de la glaciación Sturtian como producto de una alta oblicuidad es necesario apelar a una voltereta que hace unos 600 millones de años permitió al planeta adquirir una posición más erguida y establecerse en la región en que la Luna podía ejercer su fuerza estabilizadora.

Cómo pudo ocurrir eso es un misterio. Una hipótesis asegura que, mientras la Tierra estaba muy inclinada, la mayoría de los continentes formaron una única gran masa y derivaron hacia uno de los polos; ello habría podido alterar el equilibrio de la Tierra y apalancaría a su actual posición a lo largo de un intervalo de decenas de millones de años. Pero aunque a finales del Precámbrico se produjo realmente una concentración de tierra alrededor del Polo Sur, esto evidencia el que probablemente sea el mayor defecto de la tesis según la cual las glaciaciones globales de la Tierra bola de

nieve fueron causadas por una alta oblicuidad. Los cambios de oblicuidad son lentos. En cambio, los sucesos de la Tierra bola de nieve empiezan y terminan de forma abrupta de acuerdo con los criterios geológicos, lo cual nos conduce a mi explicación preferida de qué pudo desencadenar la gran congelación que precedió a la explosión cámbrica. Esta explicación también tiene defectos, pero no más que muchas otras explicaciones alternativas, y sí bastantes menos que algunas de ellas. Para situarla en perspectiva, observemos el impacto que puso fin al periodo Cretácico del tiempo geológico y qué nos dice acerca de los riesgos que entrañan para la vida en la Tierra los impactos de cuerpos procedentes del espacio.

§. ¿Desde fuera o desde dentro?

Las pruebas de que la extinción masiva del Cretácico tardío fue consecuencia del impacto de un asteroide contra la Tierra empezaron a aparecer a comienzos de los años ochenta, cuando Louis y Walter Álvarez descubrieron una delgada capa de iridio en estratos rocosos de 65 millones de años de antigüedad en yacimientos muy separados entre sí por todo el mundo. El iridio es un metal muy raro en la superficie de la Tierra, pero es mucho más común en algunos tipos de meteorito. Estos científicos calcularon que el impacto de un objeto de esta clase y unos 10 km de diámetro podría haber dispersado por todo el globo la cantidad apropiada de iridio en la nube de detritos resultante del impacto. En un primer momento, la idea fue recibida con escepticismo, pero a medida que los geólogos empezaron a buscar pruebas que confirmaran o

desmintieran la hipótesis fueron apareciendo más testimonios de que se había producido un impacto en la época en que murieron los dinosaurios. Para la mayoría de los investigadores, la prueba más contundente se halló a principios de los años noventa, cuando se identificó en Chicxulub, en la península de Yucatán, una formación geológica que estaba en el lugar indicado y tenía la edad adecuada para constituir los vestigios del cráter producido por el impacto.

Con todo, quedaba una duda. Existe iridio dentro de la Tierra y las erupciones volcánicas lo sacan a la superficie. Por tanto, todavía parecía posible que una serie de erupciones volcánicas de una escala realmente gigantesca fuera el origen de la capa de iridio observada; obviamente, una serie de erupciones de esta índole es una muy mala noticia para la vida terrestre. Incluso existía un candidato. Aproximadamente en la misma época, una serie de erupciones enormes esparcieron cantidades ingentes de lava por lo que en la actualidad es el centro-oeste de India, formando una estructura que se conoce como las Trampas del Deccan. Las Trampas del Deccan son una de las mayores formaciones de origen volcánico de la Tierra, con un espesor de más de dos kilómetros y una extensión de más de un millón de kilómetros cuadrados. Pero no son una formación única. Las Trampas Siberianas se produjeron durante una de las mayores erupciones conocidas desde el comienzo del Cámbrico, que duró un millón de años y abarcó la frontera Permo-Triásica, hace unos 250 millones de años. Esto «coincidió» con la extinción del Pérmico tardío, que acabó con cerca del 90% de las especies que existían en la época; de hecho, es casi

seguro que la erupción de las Trampas Siberianas causó esa extinción.

Por tanto, es razonable vincular la formación de las Trampas del Deccan a la extinción ocurrida al final del Cretácico, y es cierto que tales acontecimientos han tenido una importante función en la historia de la vida en la Tierra (otro obstáculo que había que superar para que pudiera surgir una civilización tecnológica en un planeta como el nuestro). Y también es posible que la vida al final del Cretácico estuviera sometida a grandes presiones debido a los cambios ambientales causados por la formación de las Trampas del Deccan, cuando el meteorito chocó contra el planeta. Todas estas posibilidades fomentaron muchísimas investigaciones durante buena parte de las siguientes dos décadas, un trabajo que culminó en una reunión de 41 geólogos, paleontólogos y otros investigadores, que evaluaron todos los datos y en 2010 publicaron sus conclusiones en la revista *Science*. Estos científicos descubrieron que la actividad volcánica duró cerca de 1,5 millones de años, mucho más que el periodo durante el cual se depositó la famosa capa de iridio, y que las erupciones empezaron aproximadamente medio millón de años antes de la extinción masiva del Cretácico tardío. A la sazón, los ecosistemas no sufrieron cambios espectaculares, pero se desmoronaron súbitamente por la época en que el meteorito se estrelló en Chicxulub. A la luz de toda esa información, el equipo concluyó que la principal causa de las extinciones masivas fue el impacto de un gran asteroide en el México actual hace 65 millones de años. Joanna Morgan,

catedrática del Imperial College de Londres y una de las autoras del artículo publicado en *Science*, lo resume así:

Ahora podemos afirmar con gran confianza que un asteroide fue la causa de la extinción [del Cretácico tardío]. Esto desencadenó incendios a gran escala, terremotos de más de 10 grados en la escala de Richter y desplazamientos continentales que crearon tsunamis. Sin embargo, el golpe de gracia para los dinosaurios fue el material lanzado a la atmósfera, que envolvió el planeta de oscuridad y causó un invierno global que mató a las muchas especies que no lograron adaptarse.

§. El impacto arquetípico

El mar poco profundo de lo que en la actualidad es la península de Yucatán constituía un lugar ideal para que el efecto del impacto fuera el peor posible. Los sedimentos en esa parte del mundo incluían carbonatos y una gruesa capa del mineral conocido como anhidrita, rico en azufre. Por tanto en el impacto se produjeron grandes cantidades tanto de dióxido de carbono como de dióxido de azufre, y este último reaccionó con el agua supercaliente para producir cantidades ingentes de ácido sulfúrico, que llegó a la estratosfera en forma de gotas minúsculas. Inmediatamente después del impacto, antes de los peores efectos de esta bruma ácida, el primer gran problema para la vida lo constituyeron el calor y el fuego; los terremotos y los tsunamis apenas merecen ser mencionados junto a las verdaderas catástrofes que estaban a punto de producirse. El material ardiente lanzado por el impacto

debió de recorrer el planeta en el acto y calentar toda la superficie con el equivalente de 10 kilovatios por metro cuadrado durante varias horas (un efecto que el geólogo estadounidense Jay Melosh describe de forma gráfica como «comparable al del gratinador de un horno doméstico»). Esto fue suficiente para causar una conflagración mundial a medida que la vegetación terrestre se quemaba, lo que dejó una capa de hollín que aún en nuestros días resulta visible junto al estrato de iridio. La cantidad de hollín presente en la capa implica que 70 000 millones de toneladas de carbón, el equivalente al 25% de todo el material orgánico de la Tierra en ese momento, se hicieron humo.

La oscuridad producida por todo ese humo fue todavía mayor debido a la presencia de gotas de ácido sulfúrico en la estratosfera, pues estas reflejan con gran eficacia la luz del Sol. Por tanto, la fotosíntesis debió de verse gravemente restringida, lo que causó la muerte de muchas plantas, mientras que tras el «gratinado» el mundo se sumió en el invierno global mencionado por Morgan. A medida que el humo se disipaba y el ácido sulfúrico se eliminaba de la atmósfera en forma de lluvia, el planeta volvió a calentarse; pero ahora, debido a la presencia de todo el dióxido de carbono liberado en el impacto, se sobrecalentó en un efecto invernadero especialmente pronunciado. Al mismo tiempo, la lluvia ácida era una mala noticia para todo lo que aún viviera en la superficie de la Tierra y, en especial, para criaturas marinas como las amonitas, pues el ácido corroía sus conchas. Además, toda esta actividad debió de perturbar la capa de ozono de la atmósfera, lo que permitió

que penetrara a la superficie terrestre la dañina radiación ultravioleta del Sol. Incluso se ha afirmado que la actividad volcánica que estaba teniendo lugar al otro lado del mundo pudo haberse visto estimulada por las ondas expansivas del impacto, concentradas allí debido a la curvatura de la Tierra.

Fue precisamente la diversidad de estas tensiones medioambientales lo que hizo que el impacto tuviera tal capacidad de exterminio. Antes de que surgiera esta explicación, los expertos tenían problemas para argumentar, por ejemplo, cómo un desastre pudo afectar a criaturas tan diferentes como los dinosaurios y las amonitas y, al mismo tiempo, por decir algo, dejar a los cocodrilos indemnes (o solo ligeramente afectados). La respuesta es que se produjo una serie de desastres, todos ellos desencadenados por el mismo acontecimiento. Sobre la tierra, los dinosaurios herbívoros sufrieron (al igual que sus predadores) cuando las plantas murieron; en el mar, las criaturas con caparazón sufrieron debido a la lluvia ácida. Los supervivientes tendieron a ser pequeños (como nuestros ancestros) porque podían guarecerse de los peligros y no necesitaban mucha comida, o tuvieron la suerte de vivir en lugares protegidos desde los que luego, cuando el mundo empezó a volver a la normalidad, pudieron propagarse. El 70% de las especies murieron; pero eso significa que el 30% tuvo nuevas oportunidades para explorar. Sin embargo, un acontecimiento de tales proporciones resulta insignificante cuando se lo compara con lo que ocurrió cuando la Tierra se convirtió en una bola de nieve. Un impacto contra el planeta no puede desencadenar un suceso

semejante. Como demuestran los hechos que rodearon la muerte de los dinosaurios, en la escala de tiempo relevante un impacto tiene más probabilidades de causar calentamiento global que enfriamiento global. Pero los sucesos extraterrestres son otra historia.

§. Nubes cósmicas y polvo cometario

Al especular sin cálculos ni cifras, es fácil imaginar que si el Sistema Solar pasara a través de una nube densa de material interestelar, esta podría bloquear parte del calor del Sol y enfriar la Tierra al punto de causar una glaciación global. Pero incluso una nube densa de material interestelar contiene apenas un millón de átomos y moléculas, la mayoría de hidrógeno, por centímetro cúbico, lo que, de acuerdo con los criterios terrestres, prácticamente equivale al vacío (cada centímetro cúbico del aire que respiramos contiene cerca de 40 trillones de moléculas). Solo alrededor del 1% de la masa de la nube tendría forma de partículas sólidas, cada una de un décimo de micrómetro de longitud. El efecto parasol sería demasiado pequeño para incidir en el clima de la Tierra.

Existe solo una posibilidad de que ocurriera algo así: que el Sistema Solar atravesara una nube realmente densa del material resultante de la explosión de una supernova cercana. Entonces, el polvo situado en lo alto de la atmósfera terrestre podría reflejar suficiente calor solar como para convertir al planeta en una bola de nieve. Sin embargo, ello dejaría rastros de material radioactivo en las rocas del periodo, y hasta el momento no se ha hallado indicio alguno.

No obstante, existe un modo en que el paso del Sistema Solar a través de una nube interestelar normal podría crear una glaciación corriente, aunque no un estado bola de nieve. La Tierra capturaría el hidrógeno de la nube y este se filtraría en las capas más altas de la atmósfera. Allí, las moléculas se romperían y los átomos de hidrógeno se combinarían con el oxígeno para formar diversos compuestos, incluido vapor de agua. Varios estudiosos han considerado los posibles efectos de todo esto sobre la estratosfera, donde la capa de ozono que nos protege de la radiación solar ultravioleta podría verse afectada; con todo, el efecto más importante sería la aparición, a una gran altitud, de una nube densa de agua y cristales de hielo capaz de reflejar parte de la energía del Sol y enfriar la superficie de la Tierra. Sin embargo, el efecto máximo de una nube tan tenue sería la reducción de la temperatura de la superficie terrestre en alrededor de 1 °C, y eso únicamente desencadenaría una glaciación si ya hubiera otros factores inclinando el equilibrio climático en esa dirección. Una nube interestelar no podría producir una Tierra bola de nieve. ¿Qué hay de una nube interplanetaria?

El impacto de un asteroide de 10 kilómetros de diámetro fue suficiente para desencadenar la extinción del Cretácico tardío. Esos objetos no son ni mucho menos raros, pero los únicos que pueden causar daños son aquellos cuyas órbitas se cruzan con la de la Tierra. Estos forman dos familias: los asteroides Apolo, llamados así por el primero de su tipo que se descubrió, pasan la mayor parte del tiempo más alejados del Sol que nosotros, pero cruzan la órbita de

la Tierra cuando se acercan a él; los asteroides Atón, que también deben su nombre a su arquetipo, pasan la mayor parte del tiempo más cerca del Sol que nosotros, pero cruzan la órbita de la Tierra cuando se alejan del Sol. Un tercer grupo, los asteroides Amor, se acercan a la órbita de la Tierra (por el exterior), pero sin cruzarse con ella. Se conocen unas cuantas docenas de asteroides Apolo (la cifra ha ido aumentando debido a nuevos descubrimientos), un número similar de asteroides Atón y más de 1000 asteroides Amor, que son fáciles de ver porque nunca se alejan demasiado. Pero los Apolo y los Atón solo pueden divisarse cuando están relativamente cerca de nuestro planeta, y las estadísticas indican que hay millares de ellos con diámetros superiores a un kilómetro.

¿Qué tamaño puede tener un objeto que se cruce con la Tierra? El asteroide Eros es un cuerpo en forma de ladrillo de 35 kilómetros de largo, 11 kilómetros de ancho y 11 kilómetros de alto. Pensemos en el daño que podría causar a la Tierra si llegara a impactar con ella. Es el asteroide Amor arquetípico, y las simulaciones por ordenador apuntan a que en unos dos millones de años su órbita podría acabar cruzándose con la de la Tierra. Pero además de estas familias de asteroides, y a pesar de la influencia protectora de Júpiter, la parte interior del Sistema Solar todavía tiene visitantes procedentes de muy lejos, más allá de las órbitas de los planetas. Se trata de los cometas, trozos de hielo con rocas incrustadas que se originan en la Nube de Oort. De hecho, es muy probable, aunque no exista aún una prueba definitiva, que muchos de los asteroides cuya órbita se cruza con la de la Tierra sean sencillamente los

restos rocosos de cometas, procedentes del Sistema Solar exterior, cuyo hielo se evaporó hace muchísimo tiempo. Y si Eros es un fragmento, ¿qué tamaño podía tener el objeto original?

Hay dos formas de abordar esa cuestión. La primera es ver el tamaño actual de los objetos helados del Sistema Solar exterior. Aunque no podemos divisar tales objetos en lugares tan lejanos como la Nube de Oort, sí podemos ver cuerpos comparables en el Cinturón de Kuiper. En la actualidad, Plutón tiende a ser considerado más un objeto del Cinturón de Kuiper que un planeta auténtico; tiene un diámetro de 2300 kilómetros y ni siquiera es el objeto más grande del Cinturón de Kuiper. ¿Podría haber realmente cometas de semejante tamaño? La otra forma de abordar la pregunta es intentar reconstruir (mediante un modelo informático) uno o más de los grandes objetos que sabemos con certeza que se hicieron pedazos en el Sistema Solar interior no hace tanto tiempo. El mejor ejemplo nos lo proporciona la estela de restos asociada con el cometa Encke, llamado así en honor al astrónomo del siglo XIX Johann Encke, el primero que calculó su órbita. Se mueve entre 0,34 y 4,08 unidades astronómicas (UA) del Sol y llega casi hasta Júpiter, en una órbita con un periodo de 3,3 años. Esto significa que es el único cometa activo en una órbita Apolo, y cruza con regularidad la órbita de la Tierra. En el siglo XX, los astrónomos Victor Clube, de la Universidad de Oxford, y Bill Napier, del Observatorio Real de Edimburgo, unieron fuerzas para estudiar la relación del cometa Encke y una masa de restos que forman una estela alrededor del Sol.

Cuando un cometa moribundo se instaure en una órbita como esta alrededor del Sol, el hielo que mantiene unidas las rocas que lo componen se reduce cada vez que pasa cerca del Sol y acaba evaporándose. De forma gradual, este proceso libera los materiales sólidos atrapados en el hielo desde el nacimiento del Sistema Solar, que pueden ser desde piedras del tamaño de asteroides hasta partículas tan pequeñas como un grano de arena. Cuando la Tierra cruza la órbita de esta estela, con suerte sin toparse con una de las rocas más grandes, los fragmentos del tamaño de granos de arena arden al entrar en la atmósfera de nuestro planeta. Esto es algo que ocurre todos los años cuando atravesamos la estela de detritos, y es por ello que la noche indicada, o durante varias noches, una lluvia de meteoritos parece caer sobre nosotros desde un punto del cielo. Estas lluvias de meteoritos reciben el nombre de las constelaciones desde las cuales parecen proceder. Así, la lluvia de las Táuridas, que se produce todos los años a principios de noviembre, recibe ese nombre porque al parecer proviene de la constelación de Tauro. Cuando la Tierra está al otro lado del Sol, a finales de junio, pasa a través de más restos del mismo anillo, con lo que se produce la que se conoce como la lluvia de meteoritos de las Táuridas Beta. Este es un indicativo de lo dispersa que es esta estela y, asimismo, de cuánto material contiene.

En 1940, el investigador Fred Whipple, un pionero en el estudio de los cometas, dedujo que las corrientes de detritos de las Táuridas describen órbitas que coinciden exactamente con la del cometa Encke, pero desviadas hacia un lado. Esto, descubrió, se debe a la

influencia gravitatoria de Júpiter, que disemina los restos del cometa. Según Whipple, la diseminación que vemos en la actualidad se produjo a lo largo de al menos mil años. Clube y Napier llevaron ese cálculo más lejos y hallaron que al menos siete de los asteroides Apolo más grandes están asociados con la corriente de las Táuridas, y que el mayor de estos, el asteroide Hefestos (que tiene cerca de 10 kilómetros de diámetro), describe una órbita que denota que se separó del cuerpo principal del cometa Encke hace 20 000 años. En su conjunto, calcularon que deben de existir por lo menos 150 restos con más de un kilómetro de diámetro relacionados con la corriente de las Táuridas y el cometa Encke. Como señalaban en su libro *El invierno cósmico*, «parece claro que estamos viendo los restos de la descomposición de un objeto extremadamente grande».

Al sumar todo el material presente en la estela de detritos, Clube y Napier calcularon que el objeto original debía de tener por lo menos cien kilómetros de diámetro. Ese es el tamaño aproximado de Quirón, un objeto helado que se desplaza alrededor del Sol entre las órbitas de Júpiter y Urano y que cruza la órbita de Saturno. Conocemos la existencia de muchos objetos de este tipo, algunos de los cuales tienen muchos kilómetros de diámetro, en el Sistema Solar exterior, y la relación entre el cometa Encke y los restos de las Táuridas es una prueba de que pueden penetrar hasta el Sistema Solar interior. ¿Qué daño pueden causar al llegar allí?

§. Polvo de diamantes y estiramiento

Clube y Napier estaban especialmente interesados en los efectos que tuvo sobre la Tierra la descomposición de los cometas en el interior del Sistema Solar en tiempos históricos y prehistóricos. Investigaron cómo el polvo resultante se dispersa alrededor del Sol y refleja la luz solar para producir un fenómeno conocido como luz zodiacal, que ha cambiado de intensidad a lo largo de los siglos y los milenios. Estos estudiosos relacionaron esos cambios con cambios climáticos en la Tierra, y propusieron que si un cuerpo como Quirón cayera en una órbita como la del cometa Encke, podría desencadenar una glaciación. Que esto ocurra es en realidad bastante difícil, pero el astrónomo Fred Hoyle, famoso por su pensamiento lateral y por acertar con más frecuencia de lo que se equivocaba, señaló una forma en la que un acontecimiento semejante podía empujar a la Tierra hacia una glaciación global todavía más extrema que las comentadas por Clube y Napier.

El quid del argumento de Hoyle es que el actual equilibrio climático de la Tierra se encuentra en el filo de la navaja, y que una inclinación relativamente modesta podría ser suficiente para desencadenar procesos de realimentación fuera de control. El clima estaba ligado a una «máquina meteorológica» alimentada por la energía calórica proporcionada por el Sol. Cuando el mar absorbía la energía solar, se producía vapor de agua, y cuando el vapor de agua se condensaba para volver a ser agua líquida en alguna parte del planeta, esa energía calórica se liberaba. Por tanto, el vapor de agua lleva energía de los trópicos a latitudes más altas, y también a la atmósfera, hasta la cima de la troposfera, unos quince kilómetros

por encima de la superficie de la Tierra. Allí, la temperatura es de -20°C , pero el vapor de agua no se convierte en hielo, ya que solo puede formar cristales de hielo cuando hay pequeñas partículas de polvo u otro material que sirvan como «semillas» sobre las cuales crecer. Sin estos núcleos de condensación, el agua se mantiene como un vapor superfrío hasta que la temperatura alcance los -40°C , momento en el cual se convierte súbitamente en una profusión de pequeñísimos cristales de hielo que actúan como núcleos de condensación para que se congele más vapor de agua, con lo que se forma una masa de partículas tan reflectantes que los exploradores del Antártico las conocen como «polvo de diamantes». Este material es tan reflectante que si cubrimos toda la superficie de la Tierra con una capa de agua de una centésima de milímetro de grosor y la convertimos en cristales de polvo de diamante, cada uno con un diámetro de una millonésima de metro, estos cristales reflejarían al espacio casi la totalidad de la energía proveniente del Sol. Convertir solo una décima parte del 1% del vapor de agua de la atmósfera terrestre en polvo de diamante sería más que suficiente para desencadenar una glaciación global como la de la Tierra bola de nieve (aunque, de hecho, Hoyle propuso esta idea antes de que se hubieran descubierto pruebas de acontecimientos de este tipo).

Hoyle quería encontrar un desencadenante para las glaciaciones corrientes, no para sucesos como la Tierra bola de nieve. Desarrolló un modelo bastante complicado que incluía impactos de meteoritos que lanzaban polvo a una altura suficiente como para causar el enfriamiento que propiciara la formación de polvo de diamante. Es

muy difícil que esto suceda sin un impacto enorme que dejara un cráter visible en la superficie del planeta. Ahora bien, ¿y si el impacto no se produjo en la Tierra?

Aunque ha habido muchas extinciones de la vida en la Tierra, las únicas que con seguridad podemos vincular a impactos son dos: la que tuvo lugar a final del Cretácico y la que se produjo al término del Triásico. Esto no es en absoluto una buena noticia, pues significa que los impactos son responsables de algunos de los peores desastres que han azotado la Tierra. Una forma de valorar el riesgo es estudiar la superficie de Venus donde, debido a la ausencia de actividad tectónica, los cráteres del planeta ofrecen un historial que puede utilizarse para calcular las probabilidades de que se produzca un impacto de una determinada envergadura en un intervalo de tiempo concreto (y dado que la Tierra y Venus tienen casi el mismo tamaño y son vecinos en el Sistema Solar interior, la estadística básica es aplicable a nuestro planeta). Mediante sondas provistas de radares ha sido posible elaborar mapas de Venus, y las características de su superficie son bien conocidas. Sin embargo, como ya he mencionado, hay algo extraño en esa superficie. En comparación con la Luna y Mercurio, la densidad de cráteres es muy baja. Los cráteres de Venus son demasiado escasos habida cuenta de su tamaño y su edad.

Los estudios de la Luna, Mercurio y Marte nos dicen que Venus tendría que recibir un impacto lo suficientemente grande como para dejar una huella observable para los radares una vez cada 700 000 años aproximadamente. En la superficie de Venus hay alrededor de

900 cráteres de este tipo, lo que implica que tiene entre 600 y 700 millones de años. Sin embargo, el Sistema Solar (y es de suponer que Venus) tiene más de 4000 millones de años. La edad de la superficie representa solo el 15% de la edad del planeta. En Venus se han observado huellas de actividad volcánica reciente («reciente» en este caso significa en los últimos millones de años), pero no basta para explicar por qué la superficie del planeta es tan lisa. La argumentación propuesta por los científicos planetarios es que hace unos 700 millones de años (50 millones de años arriba, 50 millones de años abajo) se produjo un cataclismo volcánico en Venus, en el que la corteza del planeta se abrió y el magma inundó la superficie; esto llenó los cráteres existentes y creó una nueva tabla rasa sobre la cual pudieron dejar huella nuevos meteoritos. Aunque catastrófica de acuerdo con los criterios geológicos, esta «repavimentación» pudo haber tardado hasta cien millones de años en completarse.

Esto enlaza con las pruebas de que Venus posee una corteza gruesa y no experimenta el tipo de actividad tectónica que en la Tierra se asocia con la deriva continental. La interpretación habitual es que bajo el manto aislante que proporciona esa gruesa corteza, el calor liberado por la radioactividad se acumula y la presión aumenta hasta que algo cede y la corteza se abre. De acuerdo con ese escenario, Venus podría haberse «repavimentado» muchas veces en sus 4000 millones de años de historia.

Con todo, hay algo más que resulta extraño en Venus. Como hemos visto, el planeta rota de forma «incorrecta». Si pudiéramos divisar el

Sistema Solar desde un punto del espacio situado muy por encima del Polo Norte terrestre, veríamos a nuestro planeta rotar en el sentido contrario a las agujas del reloj. Así lo hacen todos los planetas excepto Urano, que está prácticamente de costado, y Venus, que rota en sentido contrario (como el reloj, desde nuestro punto de vista imaginario). Por tanto, en Venus el Sol sale por el oeste y se pone por el este, pero tarda mucho tiempo en hacerlo. Venus rota muy lentamente, una vez cada 243 días terrestres medidos por las estrellas. Esto es más de lo que dura un año venusiano (225 días terrestres), pero dado que al mismo tiempo el planeta se mueve alrededor del Sol, la duración del día, de mediodía a mediodía, es de solo 117 días terrestres. Por tanto, en Venus el año tiene menos de dos días. La rotación en el sentido contrario a las agujas del reloj de la mayoría de los planetas se explica por la dirección que seguía la nube de material a partir de la cual se formó mientras giraba alrededor del Sol. Urano y Venus debieron de empezar rotando de la misma forma: las leyes de la física no les dan ninguna opción. Pero en cada caso su actual pauta de comportamiento podría explicarse por un impacto tremendo.

Nadie puede decir con exactitud cuándo recibió Venus ese impacto, más allá de que tuvo que producirse hace más de 700 millones de años, pues de lo contrario, las huellas de lo ocurrido todavía serían visibles. O puede que el impacto derretiera la corteza del planeta y liberara enormes cantidades de magma, al punto de que toda la superficie se inundó y no quedó huella alguna del suceso. James Kasting, profesor de la Universidad Estatal de Pensilvania, señala

que el asteroide Ceres tiene un diámetro de más de 1000 km, mientras que Vesta y Palas poseen diámetros de alrededor de 500 km. El impacto de un objeto de semejante tamaño contra nuestro planeta, dice, «probablemente sería suficiente para evaporar los océanos de la Tierra por completo y crearía una atmósfera de vapor muy similar al efecto invernadero incontrolado del primitivo Venus... [ello] podría esterilizar por completo la Tierra». Pero lo que no se pregunta es qué pasaría si un objeto así golpeara Venus.

Aunque las pruebas son solo circunstanciales, la tentación de sacar la conclusión obvia es irresistible, a menos que uno crea que las coincidencias pueden llevarse al límite. Si un cuerpo realmente enorme, del tamaño de uno de los objetos del Cinturón de Kuiper o de un asteroide grande, llegó al Sistema Solar interior hace unos 700 millones de años, se hizo pedazos y el fragmento de mayor tamaño se estrelló contra Venus, ello podría explicar por qué el planeta rota en sentido contrario al resto, por qué cambió su superficie por esa época y por qué la Tierra, con las capas superiores de su atmósfera alimentadas por el polvo del cometa, brilló fugazmente como un diamante mientras reflejaba la luz solar hacia el espacio y su superficie se congelaba. Tres rompecabezas resueltos con un solo supercometa. Los destinos del Venus invernadero y la Tierra bola de nieve estaban unidos de forma inextricable mientras se disponía el escenario para la explosión cámbrica. Y la rareza de semejante suceso apenas pone de manifiesto lo especial que fue esa explosión y lo afortunados que somos de estar aquí.

Así pues, ¿qué tiene de especial nuestra especie?

Capítulo 8

¿Por qué somos tan especiales?

Contenido:

- §. El azar, la necesidad y el sistema decimal*
- §. El reloj molecular*
- §. El desencadenante del cambio*
- §. El marcapasos de la evolución humana*
- §. El destino de la civilización tecnológica*
- §. El destino de la tierra*
- §. No hay segundas oportunidades*

Resulta obvio que lo que nos hace especiales es nuestra inteligencia o, para ser más concretos y teniendo en cuenta a los delfines y otros animales, nuestro tipo de inteligencia (aunque sea bastante difícil definir con exactitud lo que entendemos por inteligencia). Si bien la inteligencia no depende solamente del tamaño del cerebro, como puede demostrarnos cualquier mujer, está claro que en cierto sentido los delfines son inteligentes y que ello está relacionado con el hecho de que tienen cerebros grandes en relación con el tamaño de sus cuerpos (en algunas especies, más grande que el cerebro de los chimpancés o los gorilas).

De hecho, hasta hace un millón y medio de años aproximadamente, los delfines eran las criaturas de la Tierra que tenían el cerebro más grande de acuerdo con ese criterio y, por tanto, quizá fueran también las más inteligentes. Fue entonces cuando se desarrolló el

cerebro de *Homo erectus* y superó al de los delfines. Pero fue el linaje *Homo* el que descubrió o inventó la tecnología, y no (en parte por evidentes razones ambientales) el del delfín.

Parafraseando a San Agustín: ¿Qué es entonces la inteligencia? Si nadie me pregunta, lo sé. Si quiero explicárselo a quien me pregunta, no lo sé. Lo que sabemos es que la inteligencia humana al parecer es un producto único de la evolución en el planeta Tierra. Y, con todo, existen indicios de que podría haber nacido algo muy similar a ella de haber tenido la oportunidad. Desde nuestra perspectiva, este podría ser el ejemplo más importante de la interacción entre contingencia y convergencia o, como diría con mayor elegancia el biólogo francés y ganador del premio Nobel Jacques Monod, entre el azar y la necesidad.

§. El azar, la necesidad y el sistema decimal

En esta terminología, es el azar el que decide qué especies sobreviven a una catástrofe como la ocurrida en el Cretácico tardío, mientras que la necesidad es la que determina cómo evolucionan los supervivientes a medida que se adaptan a las condiciones en las que viven. Si ser un bípedo erguido e inteligente provisto de visión binocular y manos con las cuales manipular cosas constituye en la actualidad una ventaja evolutiva tan enorme, ¿por qué entonces las presiones de la selección natural, ejerciendo su función a lo largo de más de 150 millones de años, mientras los dinosaurios dominaban la Tierra, no produjeron un dinosaurio inteligente y erguido?

Una respuesta es que durante ese largo intervalo del tiempo geológico las presiones evolutivas eran, en muchos sentidos, menos apremiantes que en tiempos recientes. En términos generales, fue una época de estabilidad ambiental. En particular, debido a la disposición geográfica de los continentes, no hubo grandes glaciaciones que eliminaran especies y premiaran la inteligencia y la capacidad de adaptación. (Más sobre esto en breve). Pero la otra respuesta a nuestra pregunta es que aunque los molinos de la evolución muelen lentamente, lo hacen con eficacia, y hacia el final del Cretácico nació un tipo de dinosaurio muy interesante.

Los dinosaurios no eran solo bestias enormes y torpes con cerebros minúsculos. El término «dinosaurio» abarca una variedad de criaturas tan grande como el término «mamífero» en la actualidad. Había entre ellos equivalentes de carnívoros como los leones y los tigres, equivalentes de rumiantes como los ciervos y las ovejas, e incluso parientes acuáticos y voladores (no dinosaurios en un sentido estricto). Entre esta variedad surgió una familia particularmente relevante para comprender por qué estamos aquí. El miembro arquetípico de esa familia es una especie conocida como *Troodon*, que da nombre al género y a la familia misma, los *Troodontidae*. Antes se los llamaba *Stenonychosaurus* y tenían un pariente cercano llamado *Sauromithoides*; en el contexto actual no especializado, los tres nombres son equivalentes, pero voy a quedarme con *Troodon*.

El *Troodon* era un dinosaurio relativamente pequeño, de entre dos y tres metros de largo de la cabeza a la cola, que se sostenía sobre dos

patas y tenía sendos brazos, cada uno de los cuales terminaba en tres dedos delgados; uno de ellos era parcialmente oponible, como nuestros pulgares. Pesaba alrededor de 50 o 60 kilos y tenía ojos grandes (lo cual, a juicio de algunos expertos, significa que era nocturno) ubicados hacia la parte anterior de la cabeza, de modo que poseía una visión binocular. Los dientes indican que era omnívoro, aunque su dieta era principalmente carnívora. Tenía una complexión ligera y era un cazador ágil, con una buena visión y manos apropiadas para agarrar cosas; es muy probable que entre sus presas hubiera no solo reptiles pequeños, sino también mamíferos, incluidas las especies de nuestros ancestros. Más significativo aún es el hecho de que era el dinosaurio que tenía el cerebro más grande en relación con su cuerpo, con una proporción no muy distinta de la de los babuinos modernos. Todos estos indicios sugieren que el Troodon estaba en buena posición para desarrollar el tipo de inteligencia que nosotros poseemos. Pero tuvo la desgracia de vivir exactamente al final del periodo Cretácico.

La extinción del Cretácico tardío acabó con todos los animales terrestres de más de 40 kilos de masa, incluido el Troodon y otros miembros de su género y familia. Ahora bien, ¿qué habría ocurrido si ese desastre nunca hubiera llegado a producirse? Este interesante escenario ha animado a varios científicos, entre quienes destacan el paleontólogo Dale Russell y el astrónomo Carl Sagan, a intentar extrapolar la evolución futura del Troodon en caso de que no se hubiera extinguido. Russell y su colega Ron Seguin llegaron incluso a construir un modelo «a tamaño natural» de lo que

denominaron el «dinosaurioide», un reptil bípedo de gran cerebro, ojos grandes y manos de tres dedos con pulgares oponibles.

Russell calculó que, dado el ritmo del cambio evolutivo a finales del Cretácico, una criatura con una masa corporal similar a la de los seres humanos modernos y un cerebro acorde habría tardado unos 25 millones de años en evolucionar, con lo que habría aparecido hace 40 millones de años. Parece probable que un dinosaurioide inteligente habría podido desarrollar un sistema aritmético de base seis, por la misma razón (en apariencia lógica, pero en realidad arbitraria) que los seres humanos empleamos la base diez. En 40 millones de años de evolución más, ¿qué podría haber logrado una especie semejante? Como señalaba Sagan, acaso con excesiva cautela (lo escribió antes de que se conociera la causa de la extinción del Cretácico tardío):

En el supuesto de que los dinosaurios no se hubiesen extinguido misteriosamente hace unos 65 millones de años, ¿habría continuado el Sauromithoides su progreso hacia formas cada vez más inteligentes? ¿Habría aprendido a cazar en grupo a los grandes mamíferos impidiendo con ello la gran proliferación de esta clase animal que siguió al término de la era mesozoica? De no haber sido por la extinción de los dinosaurios, ¿serían las formas hoy dominantes en la Tierra descendientes de los Sauromithoides, autores y lectores de libros, entregados a reflexiones acerca del

rumbo que habrían tomado las cosas si los mamíferos hubiesen ganado la batalla³?

Los entusiastas de la SETI sostienen que si el Troodon estuvo tan cerca de desarrollar inteligencia hace tanto tiempo, ello incrementa las probabilidades de que exista vida inteligente en alguna otra parte de la galaxia. Pero la paradoja de Fermi reaparece aquí con fuerza renovada, pues el enigma no es ya solo por qué las civilizaciones de otros planetas no han dejado sus tarjetas de visita en el Sistema Solar, sino por qué no ha habido anteriores civilizaciones de exploradores del espacio en la Tierra que dejaran su huella en la órbita terrestre o en la Luna o en Marte. El punto de vista pesimista es que fueron necesarios 150 millones de años de evolución para que los dinosaurios pusieran el primer peldaño de la escalera que conduce a nuestra clase de inteligencia, y entonces el desastre cayó sobre ellos. Dada la frecuencia con que los desastres han golpeado la vida sobre la Tierra, la cuestión es cómo pudo tener tiempo la inteligencia para evolucionar. Al menos en nuestro caso, la respuesta parece ser que las convulsiones climáticas aceleraron el ritmo de la evolución.

§. El reloj molecular

Sabemos la rapidez con que evolucionó el *Homo sapiens* a partir del equivalente mamífero del Troodon gracias a una combinación de pruebas fósiles y moleculares. Las pruebas de ADN son hoy una técnica conocida debido a su uso en las investigaciones forenses.

³ Carl Sagan, *Los dragones del Edén: especulaciones sobre la evolución de la inteligencia humana*, traducción de Rafael Andreu, Crítica, Barcelona, 1993, p. 141.

Por ejemplo, en la identificación de las víctimas de desastres en las que no es posible dilucidar los restos humanos por otros medios, el uso de ADN de hermanos de las víctimas es algo habitual. Los hermanos, o bien los padres o los hijos, tienen un ADN muy similar. El ADN de los primos es algo más diferente que el de los hermanos, el ADN de parientes aún más lejanos es todavía más desigual, y así sucesivamente. Si tenemos un grupo de personas de edades diferentes, todas ellas parientes entre sí, sería fácil elaborar el árbol genealógico del grupo empleando únicamente pruebas de ADN para, digamos, mostrar que todas descienden de la persona de más edad allí presente, su ancestro común. Es posible hacer lo mismo con las especies. Analizando su ADN, es posible establecer qué especies están estrechamente emparentadas (como los hermanos), cuáles tienen un parentesco más lejano (como los primos), etc. Como en las familias humanas, las especies hermanas tienen ancestros comunes recientes (el equivalente a los padres), las especies primas tienen ancestros comunes más distantes (el equivalente a los abuelos), etc. Mediante este tipo de análisis se demostró, por ejemplo, que el panda gigante es un oso (hasta que la técnica no estuvo disponible, los zoólogos dudaban entre clasificarlo como un oso o como un mapache). Estudios similares resolvieron un debate entre los expertos acerca del ancestro del perro. Antes del uso de las pruebas de ADN, los expertos se dividían en dos escuelas. Una pensaba que los primeros perros descendían exclusivamente de lobos domesticados; la otra sospechaba que los chacales y los coyotes también estaban entre los ancestros del perro. Las pruebas

descartaron cualquier posibilidad de que el perro tuviera antepasados diferentes del lobo. Tales estudios han permitido determinar muchas otras relaciones que habría sido difícil establecer solo a partir de las pruebas anatómicas. Pero, ¿qué nos dicen de nuestra propia especie?

Decir que compartimos el 99% de nuestro material genético con los chimpancés se ha convertido en una especie de tópico, pero ello no lo hace menos cierto. Para ser más precisos, nuestra herencia genética común asciende a alrededor del 98,6% de nuestro ADN, una cifra extraordinaria en vista de las diferencias superficiales entre nosotros y ellos. Existen en la actualidad dos especies de chimpancé, el chimpancé común (*Pan troglodytes*) y el chimpancé pigmeo (*Pan paniscus*). La técnica del ADN es lo suficientemente precisa como para decirnos que el chimpancé pigmeo es nuestro pariente vivo más cercano, y que el chimpancé común es un pariente ligeramente más distante. Pero solo ligeramente. De acuerdo con las reglas usuales de la biología, los seres humanos también deberíamos ser clasificados como chimpancés (*Pan sapiens*), y es solo nuestra inclinación natural a vernos como algo especial la que nos lleva a clasificarnos como un género distinto, el *Homo*. Nuestros siguientes parientes más cercanos son, como cabría esperar, el gorila y el orangután. Pero si estos son nuestros primos, por decirlo de algún modo, ¿quiénes fueron nuestros abuelos, el ancestro común de los humanos, los chimpancés, los gorilas y los orangutanes, y cuándo vivieron? En otras palabras, ¿con qué velocidad avanza el reloj molecular?

El primer paso es determinar que el reloj avanza al mismo ritmo en todas las especies que nos interesan (en especial nosotros mismos, los chimpancés y los gorilas). Los cambios en el ADN se acumulan como consecuencia de las mutaciones que han tenido lugar desde la separación de un ancestro común, y sería erróneo dar por sentado que, sencillamente, las mutaciones se producen al mismo ritmo en todas las especies, sin importar lo verosímil que pueda ser ese supuesto. Es necesario comprobar la exactitud del reloj molecular (o los relojes, pues es posible utilizar también moléculas distantes del ADN) y calibrarlo a partir de otras pruebas, como los registros fósiles, antes de usarlo para elaborar cualquier árbol genealógico.

En la práctica, este es un proceso largo que implica una investigación minuciosa de muchas especies, sus moléculas y otros testimonios. Los detalles de esas investigaciones no son relevantes aquí, pero un ejemplo nos permitirá hacernos una idea del funcionamiento de la técnica. Los simios (incluidos los seres humanos), el babuino y el mono ardilla comparten un antepasado común en el pasado evolutivo; en esta fase inicial no nos preocupa hasta qué punto es lejano. La distancia «molecular» entre los seres humanos y el mono ardilla es del 15%, y esta es exactamente la distancia entre el mono ardilla y el babuino, y entre el mono ardilla y los demás simios. Por tanto, podemos decir que en todas estas especies se ha acumulado la misma cantidad de cambios en el mismo tiempo. Esto demuestra que el reloj molecular ha estado avanzando al mismo ritmo en los seres humanos y los demás simios al menos desde la época en que nos separamos de nuestro ancestro

común con el mono ardilla. Esto constituye una prueba adicional de que en términos evolutivos no hay nada especial en el linaje humano; no somos más que una variedad de simio africano que ha evolucionado del mismo modo que lo han hecho otros simios.

Aunque no existen fósiles que podamos emplear para datar con precisión el momento en que nos separamos de nuestros primos simios, existen fósiles que nos proporcionan las fechas de anteriores separaciones, fechas que es posible usar para calibrar el reloj. En pocas palabras: la combinación de testimonios fósiles y pruebas moleculares nos dice que los seres humanos y los chimpancés nos separamos hace algo menos de cuatro millones de años, y que los gorilas justo antes se habían separado del linaje de nuestro ancestro común.

La pregunta que esto nos plantea es: ¿Qué causó la separación? ¿Qué hizo que una población de simios del bosque se escindiera en varios linajes, la mayoría de los cuales permanecieron en los bosques africanos, mientras que uno inició un camino que lo llevaría a convertirse en la especie dominante del planeta, construir radiotelescopios y sondas espaciales y preguntarse por la posibilidad de que exista vida inteligente en otro lugar del universo? Sabemos, gracias a los registros fósiles, dónde se produjo esa separación, esto es, en la región del gran valle del Rift, en África; sabemos cuándo ocurrió; y tenemos un candidato prometedor para explicar por qué ocurrió y por qué sucedió de forma tan rápida en comparación con el ritmo de la evolución al final del Cretácico.

§. El desencadenante del cambio

¿Qué nos diferencia de otras especies de simios africanos? La capacidad de adaptación y la inteligencia. ¿Qué ventaja brindaban la capacidad de adaptación y la inteligencia a un simio de los bosques africanos hace algo menos de cuatro millones de años? La capacidad de responder a una serie de cambios ambientales que afectaron de forma espectacular los bosques y que tuvieron su origen en la disposición cambiante de los continentes.

Hace unos cinco millones de años, las condiciones de la Tierra cambiaron lo suficiente como para que los geólogos consideraran la fecha como el fin de una época, el Mioceno, y el comienzo de una nueva, el Plioceno (las épocas son las subdivisiones de los periodos geológicos). Fue durante el Plioceno cuando aparecieron los primeros homínidos auténticos y la primera especie clasificada como *Homo*. Por esta época se produjeron muy pocos cambios en el extremo sur del planeta, con excepción de Australia y Sudamérica, que estaban moviéndose hacia el norte y alejándose de la Antártida, ya establecida en el Polo Sur. Esto permitió que una fuerte corriente oceánica circulara alrededor de la Antártida y la separara de las cálidas corrientes tropicales, de modo que hace unos seis millones de años empezó a hacer tanto frío que en el casquete meridional se acumuló incluso más hielo del que existe allí en la actualidad. Con tanta agua congelada, el nivel del mar era 50 metros inferior al de nuestros días. Entre otras cosas, esto causó que la cuenca del Mediterráneo se secara por completo, no una sino varias veces de acuerdo con las variaciones del casquete polar meridional.

Con el sur encerrado en una pauta bastante estable con fluctuaciones relativamente menores, fue la cambiante geografía del hemisferio norte la que dominó la historia de nuestros orígenes. A medida que los continentes se movían hacia el norte, rodeando y encerrando la región ártica, el medio ambiente cambió por dos razones. En primer lugar, habiendo tierra firme en zonas más septentrionales era más fácil que la nieve se asentara y formara capas de hielo y glaciares. En segundo lugar, aunque el océano Ártico se mantuvo en el Polo Norte, fue quedándose cada vez más encerrado, de modo que las corrientes cálidas tropicales no pudieron penetrar en él y se enfrió. Llegado el momento, esto permitió la formación de una capa de hielo sobre el océano, y una vez que esta se forma, su superficie reluciente refleja la energía solar que recibe, lo que contribuye a mantener bajas las temperaturas. Hasta donde sabemos, esta pauta, un océano rodeado de tierra y cubierto de hielo en el norte y, simultáneamente, un continente cubierto de hielo en el Polo Sur, nunca antes se había producido en la historia de nuestro planeta. Es tan única como lo somos nosotros.

El primer efecto del desplazamiento de los continentes hacia el polo en el hemisferio norte fue que produjo una gran variedad de entornos climáticos diferentes. Cuando toda la tierra se encontraba cerca del Ecuador, el clima de gran parte de ella era lo que llamamos tropical. Esta situación, que persistió durante decenas de millones de años, resultaba muy conveniente para las especies que se habían adaptado a ese entorno, pero no brindaba muchas

oportunidades para el tipo de presiones medioambientales que estimulan la evolución. Sin embargo, por la época en que el mar Mediterráneo estaba secándose, la región ártica tenía un clima fresco, templado, y los bosques de coníferas se extendían hasta los límites septentrionales de tierra firme. Aunque había nevadas estacionales, las latitudes altas se mantuvieron libres de hielo durante cierto tiempo debido a la intensificación de la corriente del Golfo, que traía el agua cálida desde el sur. Esto ocurrió mientras la brecha entre Sudamérica y Norteamérica se cerraba lentamente entre cinco y tres millones de años atrás, lo que dejó al agua sin ruta de escape hacia el Pacífico. Pero cuando Groenlandia bloqueó el paso hacia el extremo norte, la corriente se desvió hacia el este, donde su efecto fue que Europa septentrional mantuvo temperaturas más altas que la actual Terranova, y llegado el momento el Ártico se congeló. Para entonces, la brecha entre la península Ibérica y África se había ampliado ligeramente como resultado de la actividad tectónica, y la cuenca del Mediterráneo se había llenado de agua por última vez: con velocidades de hasta 300 kilómetros por hora, el torrente de agua que fluía a través del estrecho de Gibraltar completó esta labor en menos de dos años, hace 5,3 millones de años. El nivel del mar aumentaba hasta 10 metros por día.

Al existir una mayor variedad de climas, había más diversidad de entornos para la vida tanto vegetal como animal. En cambio, cuando gran parte de la tierra firme estaba cubierta por bosques tropicales, había muchas posibilidades para las especies tropicales,

pero poco más para algo diferente. Cuando el mundo pasó a estar dividido en zonas tropicales, templadas y demás, el cambio afectó negativamente a muchas especies tropicales, al menos aquellas que estaban situadas en los límites del bosque y tuvieron que competir unas con otras por unos recursos cada vez más reducidos; pero ello ejerció un efecto positivo para aquellas especies capaces de salir del bosque y adaptarse a un estilo de vida diferente. Por tanto, la variedad de la vida en la Tierra realmente aumentó después de los cambios que tuvieron lugar hace unos seis millones de años. Los ancestros de los perros modernos surgieron en esa época, y a estos les siguieron con rapidez los linajes de, entre otros, los osos, los camellos y los cerdos de la actualidad. Y en África oriental, como hemos señalado, el linaje de los simios se dividió en tres; una de esas ramificaciones conduciría llegado el momento al *Homo sapiens*.

§. El marcapasos de la evolución humana

Las condiciones geológicas de África oriental hace unos cinco millones de años supusieron que la región fuera particularmente sensible a los cambios climáticos que estaba experimentando la Tierra. Por la época en que la línea que daría lugar a los simios africanos se escindió en tres, la actividad tectónica estaba elevando un bloque de la corteza terrestre que unas fuerzas laterales resquebrajarían más tarde para crear el gran sistema del valle del Rift. En lugar de estar cubierta de bosque tropical y tener un clima húmedo todo el año, la región se secó y las extensiones boscosas se hicieron más limitadas. El clima se volvió ligeramente estacional

como parte de la pauta global de cambios climáticos, y las islas de bosque tropical estaban ahora rodeadas de praderas y bosques más abiertos.

En lo que respecta a la temperatura, la región no se vio extremadamente afectada, ni siquiera cuando las capas de hielo se propagaron más al norte, aunque ciertamente hacía frío. Más importante para la flora y fauna del gran valle del Rift fue el cambio de la pluviosidad. Cuando el mundo se enfria, el agua de los océanos se evapora menos, de modo que la humedad del aire es menor y las precipitaciones se reducen de forma generalizada. Y cuando la capa de hielo crece, el nivel del mar desciende y grandes áreas de la plataforma continental quedan al descubierto, de modo que los sistemas que portan la lluvia tienen que viajar más lejos para llegar a una región como el gran valle del Rift y vierten buena parte de su humedad antes de llegar allí. La clave, desde la perspectiva de la evolución de nuestros ancestros, es que una glaciación en latitudes altas es una sequía en África oriental. Y una sequía es mala para los bosques.

Hace unos tres millones de años, el Ártico era casi tan frío como lo es hoy, y aunque la nieve y el hielo no se habían extendido demasiado, las regiones ecuatoriales se enfriaron y secaron, algo que revelan varios tipos de pruebas geológicas. El hielo apareció en el continente europeo y en las montañas de California hace unos 2,5 millones de años. En la actualidad, el hielo cubre unos 15 millones de kilómetros cuadrados de la superficie terrestre; pero hace unos dos millones de años, el área cubierta de hielo llegaba a los 45

millones de kilómetros cuadrados, y el volumen de agua atrapado en el hielo, a juzgar por el descenso del nivel del mar en esa época, a los 56 millones de kilómetros cúbicos. «Casualmente» (yo no creo que fuera una mera casualidad), fue por esa época cuando el primer miembro de la línea *Homo* que salió de África empezó a propagarse primero por su continente de origen y, finalmente, por Europa y Asia. Esta era una especie conocida como *Homo erectus*, que del cuello para abajo era prácticamente humana y tenía una capacidad cerebral aproximada de 900 centímetros cúbicos cuando empezó a propagarse, una capacidad que con el paso del tiempo aumentaría hasta los 1.100 centímetros cúbicos; el cerebro humano moderno tiene una capacidad cerebral de 1.360 centímetros cúbicos. Está claro que un cerebro grande y todo lo que conlleva —inteligencia y capacidad de adaptación— fue clave para el éxito del *Homo erectus* y las posteriores variaciones de su evolución. La razón es fácil de hallar en la pulsación regular del cambio climático que se desarrolló en aquella época.

Aunque hay varios ciclos que intervienen en una compleja interacción de ritmos climáticos, la pulsación principal, según los estudios geológicos, es un ciclo en el que las glaciaciones completas, cada una de aproximadamente 100 000 años de duración, están separadas por intervalos menos fríos llamados interglaciares que se prolongan unos 10 000 años. Actualmente vivimos en un interglaciar que empezó hace algo más de 10 000 años; toda la civilización humana está contenida en una pulsación climática. Pero, por supuesto, la «próxima» glaciación podría no llegar a tiempo

debido al impacto que nuestra civilización tecnológica está teniendo en el clima de la Tierra.

Esta pauta se conoce bastante bien. Es consecuencia de la forma en que la inclinación y el movimiento de la Tierra cambian ligeramente a lo largo de los milenios (a pesar de la influencia estabilizadora de la Luna) y el hecho de que la órbita de la Tierra pasa, también ligeramente, de una forma más circular a una forma más elíptica y viceversa debido a la influencia gravitacional de los demás planetas, en particular Júpiter. La descripción teórica sobre el cambio climático a menudo recibe el nombre de modelo de Milanković, por el astrónomo serbio Milutin Milanković, el estudioso que resolvió los detalles. Existen en realidad tres ciclos «Milanković» principales, uno de aproximadamente 100.000 años de duración, otro de 43.000 y otro de 23.000. El aspecto importante es que, si bien la cantidad total de calor que recibe la Tierra del Sol a lo largo del año no varía, la forma en que ese calor se distribuye a través de las estaciones sí lo hace. Y la inusual distribución de los continentes durante los últimos millones de años ha hecho que la Antártida permanezca totalmente congelada, mientras que el hemisferio norte es muy sensible a esos cambios. Esta es una situación única en la historia de la Tierra, y a ella le debemos nuestra existencia.

En ocasiones, los inviernos septentrionales son muy fríos y los veranos muy calientes; a veces, los inviernos son suaves y los veranos frescos (la pauta, por supuesto, se invierte en el hemisferio sur). Hoy, con tanta tierra en latitudes elevadas rodeando el océano helado del norte, el estado natural de nuestro planeta es el dominio

de una glaciación total. Según el modelo de Milanković, la Tierra solo puede evitar verse arrastrada a una glaciación total durante unos pocos milenios cuando las condiciones son las apropiadas para propiciar veranos calientes en el hemisferio norte, cosa necesaria para derretir gran parte del hielo. Mientras los veranos siguen siendo calientes, cuando se derrite un poco de hielo se acelera el proceso, ya que la tierra oscura resultante absorbe más calor del Sol que el hielo reluciente. Sin embargo, cuando los veranos se atemperan el proceso se invierte, dado que siempre hace suficiente frío para que nieve en invierno, y el planeta regresa a una glaciación completa. El registro geológico coincide exactamente con esta predicción.

Más al sur, en los bosques en los que vivían nuestros ancestros, el resultado fue una pauta reiterada de periodos de sequía y fases de abundancia. El hecho de que el Polo Sur esté permanentemente cubierto de hielo implica menos humedad y hace que los bosques sean más sensibles a los ritmos de los ciclos de Milanković. En tiempos difíciles, cuando los bosques se reducían, los protosimios que vivían en ellos tenían dos opciones. Podían retroceder hacia el interior del bosque y competir por unos recursos escasos con otros moradores de los árboles y, a consecuencia de ello, evolucionar en tres simios arbóreos más eficaces, incluidos el chimpancé y el gorila. O podían intentar sobrevivir en los límites del bosque aprendiendo una nueva forma de vivir y saliendo a la llanura. Fueron los moradores de los árboles menos prósperos los que

fueron empujados a los márgenes y se vieron obligados a adaptarse o morir.

Si la sequía hubiera continuado, es probable que todos hubieran muerto. Y fueron muchos los que lo hicieron. Pero después de unos 100 000 años, las lluvias volvieron, el bosque se extendió y la vida se hizo más fácil. Los supervivientes de la criba fueron los protosimios más fuertes y adaptables, los más aptos en el sentido evolutivo, los más capacitados para la nueva forma de vida. Debió de producirse entonces una explosión demográfica que propagó los genes responsables de su éxito, antes de que la sequía volviera y las tuercas se apretaran una vez más. Esta pauta se repitió a lo largo de millones de años, y cada vuelta de tuerca seleccionaba primero a los ejemplares más inteligentes y con mayor capacidad de adaptación y luego les proporcionaba un respiro durante el cual los supervivientes podían prosperar y multiplicarse. No es de extrañar que nuestros antepasados evolucionaran más rápido que el Troodon.

El marcapasos de las glaciaciones fue el marcapasos de la evolución humana. Si hace tres o cuatro millones de años el hielo hubiera llegado con toda su fuerza para quedarse, la mayoría de África oriental podría haberse convertido en un desierto y solo los simios arbóreos mejor adaptados habrían podido sobrevivir en los últimos vestigios del bosque. Asimismo, si no hubieran existido sequías, no habría habido presión evolutiva que seleccionara la clase de inteligencia que poseemos, como demuestra el caso de Sudamérica, donde el bosque tropical sobrevivió y los primates moradores de los

árboles continuaron prosperando sin necesidad de abandonar su antiguo modo de vida. Nuestros ancestros sobrevivieron y evolucionaron, y es por ello que estamos aquí: debido a una pauta inusual de cambios climáticos. Pero solo sobrevivieron: las pruebas de ADN nos dicen que existen más diferencias genéticas en un único grupo de chimpancés de África occidental que entre todos los seres humanos vivos del planeta; se calcula que todos los seres humanos que hoy poblamos la Tierra descendemos de una población de menos de un millar de humanos primitivos. Así de cerca estuvo la Tierra, después de haber sobrevivido a todos los obstáculos previos, de no tener una civilización tecnológica. Pero no es coincidencia que, una vez que nuestros ancestros alcanzaron cierto nivel de inteligencia y capacidad de adaptación, la civilización surgiera durante un periodo interglacial, con explosiones demográficas en tiempos de abundancia, desarrollo de la agricultura y todo lo demás. Ahora bien, ¿cuál es nuestro futuro?

§. El destino de la civilización tecnológica

Por mucho que desearan hacerlo los aficionados a la ecuación de Drake, es imposible cuantificar todos los eslabones de la cadena de circunstancias que condujo a nuestra existencia. Pero está claro que las probabilidades de muchos de esos eslabones, por no hablar de la totalidad de la cadena, son pequeñas. Los planetas son comunes, pero no los planetas como la Tierra. Es factible que nazca vida en los océanos de un planeta similar a la Tierra, pero es improbable que evolucione hasta formar criaturas multicelulares

complejas. Y así sucesivamente. Algunos lectores podrán pensar que peco de pesimista. Pero la cuestión es que, independientemente de con qué optimismo calculemos las probabilidades de llegar a algo como el Troodon o un mono sudamericano, el golpe de gracia a la esperanza de que criaturas inteligentes como nosotros sean algo habitual en la Vía Láctea es la serie de coincidencias que, por decirlo en términos simples, convirtieron al mono en hombre. Para ello se necesitó que el hielo cubriera al mismo tiempo los polos Norte y Sur, que surgieran zonas climáticas variadas, los cambios geológicos que produjeron el sistema del valle del Rift en África oriental y un planeta que oscilara lo suficiente para producir el ritmo de las glaciaciones de Milanković. Somos una especie extremadamente inverosímil.

Esto debería infundirnos un sentido de responsabilidad. Pero, por supuesto, no lo ha hecho. La concepción de la Tierra como un único sistema vivo, Gea, propuesto por Lovelock, nos ayuda a explicar por qué las condiciones adecuadas para la vida compleja se han mantenido durante tanto tiempo en nuestro planeta, pero también subraya lo vulnerable que es el sistema terráqueo a los súbitos impactos que nuestra civilización tecnológica le propina. En la actualidad, la mayor preocupación relacionada con el clima es el calentamiento global causado por las actividades humanas. Esa preocupación se manifiesta la mayoría de las veces en términos de las consecuencias que tendría un aumento de la temperatura media global de dos (o tres, o cuatro) grados centígrados para mediados (o finales) del siglo XXI y, por lo general, pensando que este aumento

será suave y gradual. Pero los testimonios geológicos revelan que en muchas ocasiones la temperatura de la Tierra ha cambiado de forma abrupta, ya sea aumentando o descendiendo, una vez alcanzado un punto crítico. La forma más sencilla de hacernos una idea de lo que esto implica es pensar en la capa de hielo del océano Ártico. Cuando el Ártico está cubierto de hielo, refleja la energía solar al espacio, e incluso si la cantidad de radiación entrante consiguiera elevar la temperatura, esta solo aumentaría lentamente. Pero una vez que el hielo empieza a derretirse, el océano oscuro absorbe mucha más energía y la temperatura asciende de forma súbita. Cuando la cantidad de energía que llega a la superficie empieza a reducirse, la realimentación se invierte, y el océano se enfría lentamente hasta que alcanza el punto en que se forma el hielo, momento en el que se produce un descenso repentino de la temperatura. Lovelock calcula que otros procesos de realimentación, en los que participan componentes vivos e inertes del sistema Tierra, podrían hacer que la temperatura de nuestro planeta aumentara entre cuatro y seis grados centígrados una vez se alcance un punto crítico a mediados del presente siglo. En términos geológicos, un cambio semejante a lo largo de 10.000 años sería súbito y causaría extinciones masivas; nosotros podríamos provocar un cambio de semejantes proporciones en el curso de una vida humana. La vida sobrevivirá; pero la supervivencia de la civilización tecnológica es una pregunta abierta.

El calentamiento global no es la única amenaza planteada por la acumulación de dióxido de carbono y otros residuos resultantes de

nuestras actividades. Un peligro igualmente importante, que apenas está empezando a recibir la atención que merece, es la acidificación de los océanos, algo que ocurre cuando el dióxido de carbono de la atmósfera se disuelve y reacciona con el agua para crear ácido carbónico. El efecto más obvio es la disolución de los arrecifes de coral, pero el ácido ataca las conchas de muchas criaturas marinas, incluido el plancton que está en la base de la cadena alimenticia. Una acidificación extrema podría conducir a una desertización generalizada de los océanos, con consecuencias inimaginables para el resto de la vida en la Tierra, y al aumento de la temperatura a medida que los océanos moribundos liberan más dióxido de carbono a la atmósfera.

A corto plazo, la mayor amenaza para la civilización tecnológica parece ser la civilización tecnológica en sí misma, y ello sin considerar la posibilidad de una guerra a escala mundial. En un plazo ligeramente más largo, la mayor amenaza parece ser la misma que acabó con los dinosaurios: un impacto procedente del espacio.

Un impacto de esa índole no debe tener la magnitud del que acabó con los dinosaurios, por no hablar de aquellos con magnitudes suficientes para causar glaciaciones globales como la Tierra bola de nieve, para suponer una mala noticia para la especie humana. Y la clase de impactos que serían una mala noticia para nosotros no son en absoluto infrecuentes. Buena parte del problema es que no todos los objetos de la miríada que conforman el cinturón de asteroides se mantienen quietos en sus órbitas entre Marte y Júpiter. Gracias a los cientos de miles de asteroides que han sido identificados y a la

capacidad de calcular sus órbitas tanto retroactivamente como de cara al futuro, los astrónomos han descubierto que el impacto que causó la extinción masiva del Cretácico tardío fue consecuencia directa de una colisión entre dos asteroides de gran envergadura acaecida unos 100 millones de años antes de que los dinosaurios perecieran. Este encuentro aleatorio entre dos objetos de 170 y 60 kilómetros de diámetro, que chocaron entre sí a una velocidad de 11 000 kilómetros por segundo, dio lugar a unos 150 000 fragmentos de distintos tamaños con órbitas nuevas, buena parte de los cuales se desperdigaron a través del Sistema Solar debido a la influencia gravitacional de Júpiter como un disparo de escopeta, una lluvia de guijarros que cayó sobre los planetas interiores y nuestra Luna; uno de esos fragmentos fue el que aniquiló a los dinosaurios; otro, el que produjo el cráter Tycho en la Luna, que es relativamente joven.

En una escala más pequeña, hace apenas un centenar de años, en el verano de 1908, un fragmento de escombros cósmicos ardió al entrar en contacto con la atmósfera de la Tierra y explotó sobre la región de Tunguska, en Siberia. La explosión arrasó una región de 2000 kilómetros cuadrados y derribó 80 millones de árboles, que quedaron dispuestos como cerillas alrededor del centro de la explosión. Se calculó que la roca llegada del espacio tenía una velocidad de 15 kilómetros por segundo (más de 50 000 km por hora) y que alcanzó una temperatura de 25 000 °C antes de saltar en pedazos a una altura de unos 10 kilómetros. La energía liberada fue equivalente a una bomba nuclear de diez megatones. Pero la roca que causó todo ese daño solo tenía 30 metros de diámetro. Por

casualidad, esto ocurrió en una de las regiones más desoladas y prácticamente deshabitadas del planeta. Si el meteorito de Tunguska hubiera seguido la misma trayectoria pero hubiera llegado tan solo unas horas después, cuando la Tierra hubiese girado un poco más sobre su eje, la explosión se habría producido directamente sobre San Petersburgo y habría destruido la ciudad y acabado con todos sus habitantes.

Entre estos extremos —la muerte de una ciudad y la muerte de los dinosaurios— ocurrió algo dramático con los mamíferos hace poco menos de 13.000 años. En esa época, las temperaturas en algunas regiones del mundo cayeron hasta 15 °C en poco tiempo, y se extinguieron al menos 35 especies de mamíferos, incluidos los mamuts. En esta ocasión, los seres humanos se vieron afectados: la cultura Clovis de Norteamérica desapareció junto con los mamuts. La explicación más probable para todo esto es que un objeto, significativamente más grande que el meteorito de Tunguska, explotó en la atmósfera sobre Norteamérica y una lluvia de detritos cayó sobre el continente. El polvo y el humo de los incendios causados por este acontecimiento envolvieron el planeta y enfriaron la superficie, de la misma forma, pero en una escala menor, que el enfriamiento consecuencia del impacto ocurrido a finales del Cretácico. Lo que muchos expertos consideran que es la prueba fehaciente de que el desastre fue causado por un impacto son unos diamantes minúsculos, apenas visibles bajo el microscopio, hallados en yacimientos del periodo indicado en Norteamérica y Europa. Estos «nanodiamantes» solo pueden producirse como consecuencia

del calor y la presión extremos asociados con un impacto. El cometa responsable de un desastre tan generalizado debía de tener unos cinco kilómetros de diámetro, pero probablemente se había roto en fragmentos más pequeños antes de golpear la Tierra, igual que el cometa Shoemaker-Levy 9 se disgregó antes de chocar contra Júpiter en 1994.

A la luz de las pruebas de que tales acontecimientos son normales y de que sin duda se producirán tarde o temprano, siendo nuestro único consuelo que los mayores impactos probablemente se producirán tarde, en la actualidad está realizándose un esfuerzo serio (si bien modesto) para construir telescopios a fin de identificar y vigilar miles de asteroides y cometas cuyas órbitas los sitúan incómodamente cerca de la Tierra (los llamados «objetos próximos a la Tierra», conocidos por sus siglas en inglés NEO). El satélite WISE, un telescopio espacial de la NASA (el nombre es un acrónimo de Widefield Infrared Survey Explorer) lanzado a finales de 2009, detectó diariamente centenares de asteroides «nuevos» durante sus primeros tres meses de operación, incluidos cinco NEO. Pero una cosa es identificar estos NEO y otra muy diferente hacer algo al respecto si descubrimos que uno se dirige hacia la Tierra. El cálculo oficial es que hay una posibilidad entre cien de que un meteorito de al menos 140 metros de diámetro, un tamaño suficiente para causar grandes daños en todo un estado de EE. UU. o a lo largo de la costa europea, impacte en nuestro planeta en los próximos 50 años, y en la situación actual no podríamos hacer nada para detenerlo. Un impacto desde el espacio es sin duda alguna la mayor

amenaza natural para la civilización y constituye una explicación verosímil de por qué estamos solos, si damos por sentado que en otros sistemas planetarios se producen impactos similares.

Una amenaza menos cuantificable, pero no menos real, es la actividad volcánica. A lo largo de la historia del planeta han existido varios «super volcanes» devastadores, incluso en el pasado geológico relativamente reciente, incluida la erupción que tuvo lugar en el lago Toba, en Indonesia, hace unos 70.000 años. Esta fue la erupción más grande conocida de los últimos 25 millones de años. Para hacernos una idea de su magnitud, cubrió todo el subcontinente indio con una capa de cenizas de aproximadamente 15 centímetros de grosor. Algunos investigadores afirman que el impacto ambiental de la erupción prácticamente aniquiló a las poblaciones humanas de Africa centro-oriental y la India de la época. En la actualidad, se ha descubierto que toda la región situada bajo el parque de Yellowstone, en Estados Unidos, es un super volcán de este tipo. En este momento se encuentra en un estado inactivo, pero podría entrar en erupción en cualquier momento y sin previo aviso. Y en una escala todavía mayor, sucesos como el que forma las Trampas del Deccan pueden volver a producirse. Miremos donde miremos, ya sean desastres procedentes del espacio exterior o de nuestro propio planeta, nuestra civilización está condenada, y la única pregunta real es cuándo sobrevendrá el fin. Entre un desastre y otro, ha habido tiempo para que surja una civilización tecnológica en la Tierra, pero eso no es garantía de que otros lugares de la Vía Láctea gocen de oportunidades similares. Sin

embargo, incluso en nuestro caso, es posible que la civilización haya nacido justo en el momento previo a que la Tierra deje de ser un hogar cómodo para la vida.

§. El destino de la tierra

El destino último de la Tierra es arder en cenizas cuando el Sol crezca para convertirse en una gigante roja al acercarse al fin de sus días. Cuándo sucederá exactamente es en cierto modo una cuestión de conjeturas. A medida que el Sol envejece, pierde masa en el espacio, de modo que su atracción gravitacional se debilita, y la órbita de la Tierra (así como las órbitas de todos los demás planetas) se ampliará, lo que quizá retrase lo inevitable. Pero el gas tenue de la dilatada atmósfera del Sol arrastrará a la Tierra por fricción, lo que probablemente la lance antes a conocer su destino que si se mantiene en la misma órbita y espera a que el Sol la engulla. No obstante, en uno u otro caso, el fin llegará aproximadamente en 5000 millones de años, dado que el Sol se encuentra más o menos a la mitad de su evolución como una estrella de la Secuencia Principal.

A primera vista, esto parecería una buena noticia para las personas que esperan hallar otras civilizaciones tecnológicas en nuestra galaxia. Parece como si, aunque tuviéramos que empezar de cero, hubiera tiempo suficiente para que se desarrollara una segunda civilización de este tipo en la Tierra y, por tanto, es de suponer, en otros planetas similares a la Tierra en órbitas alrededor de estrellas parecidas al Sol. Las posibilidades de que una civilización como la

nuestra surja parecieran haberse duplicado... Pensémoslo de nuevo. Si la vida compleja en la Tierra fuera destruida mañana, las perspectivas no serían las mismas que en el Precámbrico. Mucho antes de ser engullida por el Sol, la Tierra probablemente perderá buena parte de su aire y toda su agua y se convertirá en un planeta ardiente y desértico. Las partículas de gas escaparán desde la cima de la atmósfera, pero solo si se desplazan más rápido que la velocidad de escape desde la Tierra, que a esa altitud es un poco menos de 11 kilómetros por segundo. Muy pocas partículas viajan a esa velocidad en la actualidad; pero sí se da un goteo de átomos de hidrógeno producidos por la ruptura de las moléculas de agua en la parte alta de la atmósfera. Ese goteo se convertirá en un torrente dentro de 1.000 millones de años, pues a medida que el Sol envejezca se volverá un 10% más brillante cada 1.000 millones de años. Un Sol más brillante hará que la Tierra sea más caliente, con lo que se evaporará más agua de los océanos y enriquecerá la parte alta de la atmósfera con moléculas de agua que pueden liberar hidrógeno al espacio. Dentro de 3,000 millones de años, todo el agua se habrá evaporado.

Sin embargo, este cálculo astronómico da por sentado que nada más cambiará. Cuando se tienen en cuenta otros factores, vemos que quizá no se necesite tanto tiempo para que la Tierra se convierta en un mundo inerte. Así como el Sol se volverá más caliente a medida que envejezca, en sus años de juventud era más frío. A pesar de esto, los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera de la Tierra, como el dióxido de carbono, mantuvieron al

joven planeta lo bastante caliente como para que existiera agua líquida. Pero a medida que el Sol se fue calentando, los mecanismos de Gea han reducido la cantidad de esos gases en la atmósfera, de manera que la temperatura de la Tierra se ha mantenido en un rango que permite la existencia de agua líquida. Lovelock ha señalado que este proceso no puede continuar durante mucho tiempo, porque queda muy poco dióxido de carbono en la atmósfera que eliminar. Incluso si ignoramos el problema pasajero causado por las actividades humanas, si nuestra civilización tecnológica no existiera, la Tierra se sobrecalentaría y perdería toda su agua, pero en un periodo de cientos de millones de años, no de miles de millones de años.

Con todo, 100 millones de años es mucho tiempo, más de lo que ha transcurrido desde la muerte de los dinosaurios. Es tiempo suficiente para que se desarrolle otra civilización si la nuestra fracasa. Por desgracia, parece que la Tierra será bastante afortunada si logra rebasar el millón de años como hogar para la vida.

En su libro *Extinction*, David Raup, paleontólogo de la Universidad de Chicago, se ocupó de la pauta de extinciones masivas a lo largo de la historia de la Tierra. Uno de los frutos de esta investigación es que le permitió medir el ritmo al que se producen extinciones de diferentes dimensiones y, por tanto, calcular cuánto tiempo pasará antes de que se produzca la siguiente extinción de una dimensión en particular. Animado por la curiosidad, Raup llevó esta técnica al límite al utilizarla para calcular el intervalo entre extinciones lo

bastante grandes como para destruir toda la vida sobre la Tierra; al presentar sus conclusiones, se muestra sorprendentemente optimista:

En una ocasión realicé una estadística de valores extremos con los datos de las extinciones para saber con qué frecuencia debemos esperar extinciones de todas las especies en la Tierra. No tengo demasiada confianza en los resultados, pero al menos son reconfortantes. Las extinciones lo bastante grandes como para exterminar toda la vida deberían producirse a intervalos de más de 2000 millones de años.

¿Reconfortantes? Quizá si empezamos a contar esos 2.000 millones de años desde ahora. Pero no si recordamos que ha habido vida en la Tierra durante casi 4.000 millones de años. Según las estadísticas de Raup, hemos superado con creces el plazo de extinción total.

Como suele decirse, «hay mentiras, malditas mentiras y estadísticas», y el cálculo de Raup no parece haber molestado a nadie. Sin embargo, en 2010 se hallaron pruebas de que, a fin de cuentas, sus estadísticas pueden decirnos algo a lo que vale la pena prestar atención.

Vadim Bobylev, investigador del Observatorio Astronómico de Pulkovo, en San Petersburgo, estaba analizando datos proporcionados por un satélite europeo llamado Hipparcos cuando descubrió que una estrella cercana, conocida como Gliese 710, se encuentra en una trayectoria de colisión con nuestro Sistema Solar. Gliese 710 tiene alrededor de la mitad de la masa de nuestro Sol y

actualmente se encuentra a unos 63 años luz de nosotros, camino de la constelación de la Serpiente. Avanza en nuestra dirección a una velocidad aproximada de 50 000 km por hora, y está destinada a pasar por los cometas de la Nube de Oort, en los márgenes exteriores del Sistema Solar antes de 1,5 millones de años; incluso es posible que llegue a estar tan cerca del Sol como el Cinturón de Kuiper. La perturbación de la Nube de Oort resultante de este encuentro cercano lanzará detritos al Sistema Solar interior en una escala desconocida desde el Gran Bombardeo Tardío. Si Gliese 710 tiene su propia nube de cometas, como parece probable, el bombardeo será todavía más intenso. Sin duda, esto tendrá como consecuencia el exterminio de toda la vida en la Tierra y enviará nuestro planeta de regreso al estado en el que se encontraba justo después de la formación de la Luna. Así de cerca llegó a estar la Tierra de no tener una civilización tecnológica: un millón de años, después de casi 4.000 millones de años de evolución.

Con todo, eso nos da más o menos un millón de años para jugar. Y si nuestra civilización se desmorona, puede que no haya tiempo suficiente para que otra especie inteligente evolucione, pero sí para que los supervivientes de la humanidad construyan una nueva civilización tecnológica... Por desgracia, hay una pega. Quizá tengan tiempo, pero no recursos.

§. No hay segundas oportunidades

A juzgar por el ejemplo de la vida en la Tierra, el desarrollo a gran escala de una civilización tecnológica de cualquier clase podría no

ser viable hasta que se hayan acumulado grandes reservas de combustibles fósiles bajo la corteza del planeta. No es coincidencia que nuestro tipo de civilización se desarrollara primero en una parte del mundo en la que había reservas de carbón cerca de la superficie terrestre, donde podía accederse a ellas con facilidad, y minerales como el hierro y el cobre que podían extraerse sin equipos más avanzados que picas hechas con cuernos de ciervo. Sin embargo, fueron necesarios miles de millones de años de actividad tectónica para disponer esos depósitos minerales, deformar los estratos y llevarlos cerca de la superficie para que la erosión hiciera su labor y los dejara al descubierto. Incluso los depósitos de carbón sobre los cuales se edificó nuestra civilización tecnológica se depositaron hace entre 280 y 360 millones de años en el entorno fresco y húmedo del periodo que con razón recibe el nombre de Carbonífero. Si estas condiciones ambientales no hubieran persistido por decenas de millones de años, ¿podría haberse desarrollado una civilización tecnológica en la Tierra? El Carbonífero tardío también fue testigo de la formación de importantes depósitos de petróleo. El petróleo de fácil acceso alimentó el crecimiento espectacular que experimentó la civilización tecnológica en el siglo XX.

Sin embargo, en la actualidad todos estos recursos se han reducido de manera considerable. Todavía podemos extraer minerales, carbón y petróleo en grandes cantidades, pero solo empleando tecnología, metales y combustibles fósiles para ello. No hay mejor ejemplo que las plataformas petrolíferas del mar del Norte o el golfo de México. Si alguna catástrofe devolviera a la humanidad a la Edad

de Piedra, o si fuéramos aniquilados por completo y alguna otra especie evolucionara hasta desarrollar inteligencia, esos recursos seguirían estando allí, pero cualquier civilización nueva que surgiera no contaría con las herramientas ni los materiales para construir las máquinas necesarias para extraerlos, y tampoco tendría el combustible necesario para hacer funcionar esas máquinas.

En un planeta como la Tierra, la vida puede tener solo una oportunidad de desarrollar tecnología. Dado que hemos agotado las reservas de materias primas de fácil acceso, si somos destruidos, la próxima especie inteligente (en caso de que llegue a existir una) no contará con las materias primas necesarias para desarrollarse. No hay segundas oportunidades. Y esa es la última prueba que completa la paradoja de Fermi. No están aquí, porque no existen. Las razones por las que estamos aquí forman una cadena tan inverosímil que la posibilidad de que alguna otra civilización tecnológica exista en la Vía Láctea en la actualidad es remotísima. Estamos solos, y lo mejor es que nos hagamos a la idea.

Otras lecturas

- Aczel, Amir, *Probablity 1*, Harcourt Brace &Co, Nueva York, 1998.
- Akerblom, K., *Astronomy and Navigation in Polynesia and Micronesia*, Ethnogratiska Museet, Estocolmo, 1968.
- Álvarez, Walter, *T. Rex and the Crater of Doom*, Princeton University Press, 1997. [Trad. cast.: *Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte*, Critica, Barcelona, 1998].
- Arrhenius, Svante, *Worlds in the Making*, Harper, Nueva York, 1908.
- Bakker, Robert, *The Dinosaur Heresies*, Longman, Londres, 1987.
- Barrow, John, y Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986.
- Benner, Steven, *Life, the Universe and the Scientific Method*, Fame Press, Gainsville, 2009.
- Bennett, Jeffrey, *Beyond UFOs*, Princeton University Press, 2008.
- Bernal, J. D., *The Origin of Life*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1967. [Trad. cast.: *El origen de la vida*, Destino, Barcelona, 1978.]
- Boss, Alan, *The Crowded Universe*, Basic Books, Nueva York, 2009.
- Bracewell, Ronald, *The Galactic Club*, Freeman, San Francisco, 1974.

- Broecker, Wallace, *How to Build a Habitable Planet*, Eldigio Press, Palisades, 1985.
- Cairns-Smith, A. G., *The Life Puzzle*, Oliver & Boyd, Londres, 1971.
- Cameron, A. G. W., ed., *Interstellar Communication*, Benjamin, Nueva York, 1963.
- Canup, R. M., y K. Righter, *Origin of the Earth and Moon*, University of Arizona Press, 2000.
- Cloud, Preston, *Oasis in Space*, Norton, Nueva York, 1987.
- Clube, Victor, y Bill Napier, *The Cosmic Winter*, Blackwell, Oxford, 1990. [Trad. cast.: *El invierno cósmico*, Alianza, Madrid, 1998.]
- Comins, Neil, *What if the Moon Didn't Exist?*, Harper Perennial, Nueva York, 1993.
- Courtillot, Vincent, *Evolutionary Catastrophes*, Cambridge University Press, 1999.
- Crick, Francis, *Life Itself* Simon & Schuster, Nueva York, 1981. [Trad. cast.: *La vida misma, su origen y su naturaleza*, FCE, Buenos Aires, 1989.] —, *The Astonishing Hypothesis*, Simon & Schuster, Nueva York, 1994. [Trad. cast.: *La búsqueda científica del alma: una hipótesis revolucionaria*, Debate, Barcelona, 1994.]
- Croswell, Ken, *The Alchemy of the Heavens*, Anchor, Nueva York, 1995. —, *Planet Quest*, Free Press, Nueva York, 1997.
- Crowe, Michael, *The Extraterrestrial Life Debate, 1750-1900*, Dover, Nueva York, 1999.

- Darling, David, *Life Everywhere*, Basic Books, Nueva York, 2001.
- Darwin, Charles, *On the Origin of Species*, John Murray, Londres, 1859. [Trad. cast.: *El origen de las especies por medio de la selección natural*, Alianza, Madrid, 2010.]
- Davies, Paul, *The Goldilocks Enigma*, Allen Lane, Londres, 2006. —, *The Eerie Silence*, Allen Lane, Londres, 2010. [Trad. cast.: *Un silencio inquietante: la nueva búsqueda de inteligencia extraterrestre*, Crítica, Barcelona, 2011.]
- Dawkins, Richard, *The Ancestor's Tale*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 2004. [Trad. cast.: *El cuento del antepasado: un viaje a los albores de la evolución*, Bosch, Barcelona, 2004.]
- Diamond, Jared, *The Rise and Fall of the Third Chimpanzee*, Radius, Londres, 1991. [Trad. cast.: *El tercer chimpancé: origen y futuro del animal humano*, Debate, Barcelona, 2007.] —, *Guns, Germs and Steel*, Vintage, Londres, 2005. [Trad. cast.: *Armas, gérmenes y acero: breve historia de la humanidad en los últimos trece mil años*, Debate, Barcelona, 2004.]
- Dick, Steven, *The Biological Universe*, Cambridge Un. Press, 1996. —, *Life on Other Worlds*, Cambridge University Press, 1998 (versión ampliada y actualizada de *The Biological Universe*).
- Dixon, Dougal, *After Man*, Granada, Londres, 1981. [Trad. cast.: *Después del hombre*, Blume, Barcelona, 1982.]

- Dole, S., *Habitable Planets for Man*, Blaisdell, Nueva York, 1964. [Trad. cast.: *Planetas habitables*, Labor, Barcelona, 1972.]
- Drake, Frank, y Dava Sobel, *Is Anyone Out There?*, Delacorte, Nueva York, 1992. [Trad. cast.: *¿Hay alguien más en el universo?*, Javier Vergara, Buenos Aires, 1993.]
- Drury, Stephen, *Stepping Stones*, Oxford University Press, 1999.
- De Duve, Christian, *Vital Dust*, Basic Books, Nueva York, 1995. —, *Molecules, Mind, and Meaning*, Oxford University Press, 2002. [Trad. cast.: *La vida en evolución: moléculas, mente y significado*, Critica, Barcelona, 2004.]
- Dyson, Freeman, *Disturbing the Universe*, Harper & Row, Nueva York, 1979. —, *Origins of Life*, Cambridge University Press, 1986. [Trad. cast.: *Los orígenes de la vida*, Cambridge University Press, Madrid, 1999*] Edey, Maitland, y Donald Johnson, *Blueprints*, Oxford University Press, 1990. [Trad. cast.: *La cuestión esencial: preguntas y respuestas sobre la evolución*, Planeta, Barcelona, 1990.]
- Ehrlich, Paul, y Anne Ehrlich, *The Population Explosion*, Simon & Schuster, Nueva York, 1990. [Trad. cast.: *La explosión demográfica. El principal problema ecológico*, Salvat, Barcelona, 1993-1
- Feinberg, Gerald, y Robert Shapiro, *Life Beyond Earth*, Morrow, Nueva York, 1980.

- Fermi, Enrico, *Atoms in the Family*, University of Chicago Press, 1954. Finney, Ben, y Eric Jones, *Interstellar Migration and the Human Experience*, University of California Press, Berkeley, 1984. Fortey, Richard, *Life*, HarperCollins, Londres, 1997. [Trad. cast.: *La vida: una biografía no autorizada*, Taurus, Madrid, 1999.] —, *The Earth*, HarperCollins, Londres, 2004.
- Forward, Robert, y Joel Davis, *Mirror Matter*, Wiley, Nueva York, 1988. [Trad. cast.: *Explorando el mundo de la antimateria*, Gedisa, Buenos Aires, 1990.]
- Frankel, Charles, *The End of the Dinosaurs*, Cambridge University Press, 1999.
- Friedman, Louis, *Starsailing*, Wiley, Nueva York, 1988.
- Gerhart, John, y Marc Kirshner, *Cells, Embryos and Evolution*, Blackwell, Boston, 1997.
- Goldsmith, Donald, ed., *The Quest for Extraterrestrial Life*, University Science Books, Mill Valley (California), 1980. —, *Worlds Unnumbered*, University Science Books, Sausalito (California), 1997. —, y Tobias Owen, *The Search for Life in the Universe*, University Science Books, 2002³.
- Goodwin, Simon, y John Gribbin, *XTL*, Cassell, Londres, 2001.
- Gould, Stephen Jay, *Wonderful Life*, Vintage, Nueva York, 2000. [Trad. cast.: *La vida maravillosa: Burgess Shale y la naturaleza de la historia*, Crítica, Barcelona, 1995.]
- Gribbin, John, *In Search of the Multiverse*, Allen Lane, Londres, 2009. —, y Jeremy Cherfas, *The First Chimpanzee*, Penguin,

Londres, 2001. —, y Mary Gribbin, *From Here to Infinity*, Royal Observatory, Greenwich/National Maritime Museum, 2008. —, y Mary Gribbin, James Lovelock: *In Search of Gea*, Princeton University Press, 2009. —, y Mary Gribbin, *Home Planet, One World*, Londres, 2011.

- Grinspoon, David, *Venus Revealed*, Addison Wesley, Reading, 1997. —, *Lonely Planets*, HarperCollins, Nueva York, 2003.
- Harland, David, *The Earth in Context*, Springer-Praxis, Chichester, 2001.
- Henbest, Nigel, y Heather Couper, *The Guide to the Galaxy*, Cambridge University Press, 1994.
- Heppenheimer, T. A., *Colonies in Space*, Stackpole Books, Harrisburg (Pensilvania), 1977. —, *Toward Distant Suns*, Stackpole Books, Harrisburg (Pensilvania), 1979.
- Hodge, Paul, *Meteorite Craters and Impact Structures of the Earth*, Cambridge University Press, 1994.
- Hoyle, Fred, *Ice*, Hutchinson, Londres, 1981. —, y Chandra Wickramasinghe, *Evolution from Space*, Dent, Londres, 1981. [Trad. cast.: *La evolución de la vida desde el espacio exterior*, FCE, México, 1992.]
- Imbrie, John, y Katherine Palmer Imbrie, *Ice Ages: Solving the Mystery*, Macmillan, Londres, 1979.
- Jennings, J., ed., *The Prehistory of Polynesia*, Harvard University Press, 1979.
- Kaler, James, *Cosmic Clouds*, Scientific American Library, Nueva York, 1997.

- Kasting, James, *How to Find a Habitable Planet*, Princeton University Press, 2010.
- Koerner, David, y Simon LeVay, *Here Be Dragons*, Oxford University Press, 2000.
- Lahav, N., *Biogenesis*, Oxford University Press, 1999.
- Leakey, Richard, y Roger Lewin, *The Sixth Extinction*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1996. [Trad. cast.: *La sexta extinción: el futuro de la vida y de la humanidad*, Tusquets, Barcelona, 1997.]
- Lemonick, Michael, *Other Worlds*, Simon & Schuster, Nueva York, 1998. [Trad. cast.: *Otros mundos: la búsqueda de vida en el universo*, Paidós, Barcelona, 1999.]
- Lewin, Roger, *Human Evolution*, Blackwell, Oxford, 1984. [Trad. cast.: *Evolución humana*, Salvat, Barcelona, 1989.]
- Lovelock, James, *Gea: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, 2000 (edición revisada). [Trad. cast.: *Gea, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Blume, Barcelona, 1993.] —, *The Ages of Gea*, Oxford University Press, 2000 (edición revisada). [Trad. cast.: *Las edades de Gea*, Tusquets, Barcelona, 1993.] —, *Gea: The Practical Science of Planetary Medicine*, Gea Books, Londres, 1991.
- Lunine, Jonathan, *Earth: Evolution of a Habitable World*, Cambridge University Press, 1998.
- McDonough, Thomas, *The Search for Extraterrestrial Intelligence*, Wiley, Nueva York, 1987.

- Mallove, Eugene, y Gregory Matloff, *The Starflight Handbook*, Wiley, Nueva York, 1989.
- Margulis, Lynn, y Dorion Sagan, *Microcosmos*, Simon & Schuster, Nueva York, 1986. [Trad. cast.: *Microcosmos*, Tusquets, Barcelona, 1995.] —, *What is Life?*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1995. [Trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1997.]
- Monod, Jacques, *Chance and Necessity*, traducción de Austryn Wainhouse, Collins, Londres, 1972. [Trad. cast.: Hay traducción castellana del original francés: *El azar y la necesidad*, Tusquets, Barcelona, 1989.]
- Morris, Simon Conway, *The Crucible of Creation*, Oxford University Press, 1998. —, *Life's Solution*, Cambridge University Press, 2004.
- Muller, R., *Nemesis: The Death Star*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1988.
- Nisbet, E. G., *The Young Earth*, Allen & Unwin, Boston, 1987. O'Neill, Gerard, *The High Frontier*, Morrow, Nueva York, 1977. [Trad. cast.: *Ciudades del espacio*, Bruguera, Barcelona, 1979.]
- Olson, Steve, *Mapping Human History*, Houghton Mifflin, Nueva York, 2002.
- Pinker, Steven, *The Language Instinct*, Morrow, Nueva York, 1994. [Trad. cast.: *El instinto del lenguaje: cómo crea el lenguaje la mente*, Alianza, Madrid, 1996.]
- Raff, Rudolf, *The Shape of Life*, University of Chicago Press, 1996.

- Raup, David, *Extinction*, Norton, Nueva York, 1990.
- Restak, Richard, *Brainscapes*, Hyperion, Nueva York, 1995.
- Rees, Martin, *Just Six Numbers*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1999. [Trad. cast.: *Seis números nada más*, Debate, Barcelona, 2001.] —, *Our Final Century*, Heinemann, Londres, 2003. [Trad. cast.: *Nuestra hora final: ¿será el siglo XXI el último de la humanidad?*, Crítica, Barcelona, 2004.] Sagan, Carl, ed., *Communication with Extraterrestrial Intelligence*, MIT Press, Cambridge (Massachusetts), 1973. —, *The Cosmic Connection*, Dell, Nueva York, 1975. [Trad. cast.: *La conexión cósmica*, Plaza & Janés, Barcelona, 1978.] —, *The Dragons of Eden*, Random House, Nueva York, 1977. [Trad. cast.: *Los dragones del Edén: especulaciones sobre la evolución de la inteligencia humana*, Crítica, Barcelona, 1993.]
- Schrödinger, Erwin, *What is Life?*, Cambridge University Press, 1967 (publicado originalmente en 1944; esta edición incluye en un mismo volumen otra obra del autor, *Mind and Matter*, 1958). [Trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984, y *Mente y materia*, Tusquets, Barcelona, 1985.]
- Shapiro, Robert, *Origins*, Bantam, Nueva York, 1987. [Trad. cast.: *Orígenes*, Salvat, Barcelona, 1994.] —, *Planetary Dreams*, Wiley, Nueva York, 1999. Shermer, Michael, *Why People Believe Weird Things*, Freeman, San Francisco, 1997. [Trad. cast.: *Por qué creemos en cosas raras: pseudociencia, superstición y otras confusiones de nuestro tiempo*, Alba, Barcelona, 2008.]

- Shklovskii, Iosif, *Five Billion Vodka Bottles to the Moon*, Norton, Nueva York, 1991. —, y Carl Sagan, *Intelligent Life in the Universe*, Holden-Day, San Francisco, 1966. [Trad. cast.: *Vida inteligente en el universo*, Reverté, Barcelona, 2011.]
- Shostak, Seth, *Sharing the Universe*, Berkeley Hills Books, Albany, 1998. — y Alex Barnett, *Cosmic Company*, Cambridge University Press, 2003.
- Simon, J. L., *The Ultimate Resource*, Princeton University Press, 1981. [Trad. cast.: *El último recurso*, Dossat, Madrid, 1986.]
- Simpson, George Gaylord, *The Meaning of Evolution*, Yale University Press, 1967.
- Smith, John Maynard, y Eors Szathmary, *The Major Transitions in Evolution*, Freeman, Oxford University Press, 1995. [Trad. cast.: *Ocho hitos de la evolución; del origen de la vida a la aparición del lenguaje*, Tusquets, Barcelona, 2001.] —, y Eors Szathmary, *The Origins of Life*, Oxford University Press, 1999 (esta es una versión más «popular» de *The Major Transitions in Evolution*).
- Stanley, Steven, *Extinction*, Freeman, Nueva York, 1987.
- Stringer, Christopher, y Robin McKie, *African Exodus*, Cape, Londres, 1996.
- Sullivan, Walter, *We Are Not Alone*, McGraw-Hill, Nueva York, 1966. [Trad. cast.: *No estamos solos: la búsqueda de vida inteligente en otros mundos*, Noguer, Barcelona, 1967.]

- Taylor, Smart Ross, *Destiny or Chance?*, Cambridge University Press, 1998. Thomas, Lewis, *The Lives of a Cell*, Viking, Nueva York, 1974. [Trad. cast.: *Las vidas de la célula*, Ultramar, Barcelona, 1977.]
- Trefil, James, *Are We Unique?*, Wiley, Nueva York, 1997.
- Turner, Alan, y Mauricio Antón, *The Big Cats and Their Fossil Relatives*, Columbia University Press, 1997.
- Vrba, E. S., G. H. Denton, T. C. Partridge y L. H. Burckle, eds., *Paleoclimate and Evolution*, Yale University Press, 1995.
- Walker, Gabrielle, *Snowball Earth*, Bloomsbury, Londres, 2003. [Trad. cast.: *Cataclismo climático: hace setecientos millones de años la Tierra sufrió una catástrofe climática y sobrevivió*, Bosch, Barcelona, 2007.]
- Ward, Peter, y Donald Brownlee, *Rare Earth*, Copernicus, Nueva York, 2004.
- Webb, Stephen, *Where Is Everybody?*, Copernicus, Nueva York, 2002.
- Whipple, Fred, *The Mystery of Comets*, Smithsonian Institution, Washington, 1985.
- Whittington, H. B., *The Burgess Shale*, Yale University Press, 1985.
- Wilson, E. O., *The Diversity of Life*, Harvard University Press, 1992. [Trad. cast.: *La diversidad de la vida*, Crítica, Barcelona, 1994.]
- Zuckerman, Ben, y Michael Hart, eds., *Extraterrestrials: Where Are They?*, Cambridge University Press, 1995².

Índice alfabético⁴

acidificación, 273

ácido desoxirribonucleico, *véase* ADN

ácido ribonucleico, *véase* moléculas RNA

ácido sulfúrico, 243-244

Aczel, Amir, 65

ADN, 35-36, 38, 51-52, 55, 75, 82, 143, 213, 259-261, 270

agua: disposición única sobre la Tierra, 186; en discos alrededor de las estrellas, 32; en los júpiteres calientes, 40; en los océanos de la Tierra, 206; esencial para la vida, 117-118; esencial para las placas tectónicas, 189; orígenes de la Tierra, 172-176; vapor de la energía solar, 250-251; y las placas tectónicas, 184-185, 203-204

agujeros negros, 21, 88-89, 111

alanina, 50

ALH 84001 (roca marciana), 74

Allen, Array, 68

Allen, Paul, 67, 84

aluminio-26, 130-131, 159

Ames Center de la NASA, experimentos del, 52-53

amino acetonitrilo, 39

aminoácidos, 37-38, 50, 54

amonitas, 244

⁴ La numeración de las páginas no guarda relación con la edición digital de la presente obra. Se ha conservado el presente índice por tratarse de términos importantes a la obra. Para ubicar los mismos, utilizar la herramienta de búsqueda de su lector de libros electrónicos. (*N. del E. D.*)

Amor, asteroides, 246-247
análogos solares, 134-135
Andrómeda, constelación de (M31), 91
Antártida, 263, 268
Apolo, asteroide, 246-247
«árbol de la vida», 219
Arrhenius, Gustaf, 72
Arrhenius, Svante, 72-73
Ártico, 265, 267, 272
asteroides: amenaza de, 274-275; captar energía de los, 140; escombros restantes de un planeta, 169; identificar y vigilar las órbitas de los, 275-276; parte de un objeto mayor, 153; y colisión con la Tierra, 165-166; y el final del Cretácico, 240-242, 246; y la extinción de los dinosaurios, 88
Atlántico, océano, 180-181
Atón, asteroide, 246-247
Australia, 263
azúcares, 50,54
basalto, 184-185
Beta Pictoris, 31-32
Big Bang: definición, 17; primeras estrellas, 87-88; elementos producidos en, 19, 30
biogénesis, 57
Bobylev, Vadim, 280
bombardeos tempranos, 49,51-52
Bracewell, Ronald, 79, 82

Brazo Local, 105
brazos espirales, 20, 103-109, 115
Broecker, Wallace, 206
Brownlee, Donald, 203
Burgess, esquiato de, 214-217, 218-220, 222-223
Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre, *véase* SETI
calentamiento global, 129, 245, 272-273
Caloris, cuenca de (Mercurio), 150
Cámbrico, periodo, 212-231, 240, 254
carbono: ardiendo en el Sol, 136-137; gran parecido con el
 oxígeno, 177-180; propiedades especiales del, 34
canguros, 226
caos, teoría del, 13
Carbonífero, periodo, 281
carbono-12, 49
carbono-13, 49
carburo de silicio, 39, 178-179
carnívoros, pájaros, 221-222
C₅ azúcar, *véase* ribosa 5
Cenozoica, era, 212
Ceres, 152, 158, 254
CETI, 58
Chandrasekhar, límite, 95-96
Chandrasekhar, Subrahmanyan, 95
Chicxulub, impacto, 241, 242
chimpancés, 225, 261-262, 269-270

«CHON», elementos, 34

«cinco grandes» (casos de extinciones masivas), 228-229

51 Pegaso, 24

clima global, 243-244

Clovis, cultura, 275

club galáctico, 77

Clube, Victor, 248-250

combustibles fósiles, 281-282

cometa Shoemaker-Levy 9, 172-173, 275

cometa Wild 2, 50

cometas: amenaza para la vida en la Tierra, 114-115; impactos, 113, 114; órbitas marcadamente elípticas, 147-148; orígenes de, 15 5; y el Sistema Solar, 114-115 Comunicación con Inteligencia Extraterrestre, *véase* CETI

cóndrulos, 159

cono invertido de la vida, 218-219, 223-224

continentales, desplazamientos, *véase* placas tectónicas

convergencia, 222-227

Conway Morris, Simon, 212, 215-217, 222-227

Copernicano, principio, 62-68

COROT-7, 27

COROT-7b, 27-28

corteza oceánica y continental, 182-183; *véase también* júpiteres calientes; planetas extrasolares

Cretácico, acontecimiento final del, 229-230, 240-242, 246, 251, 256-258, 263, 274-275

Cretácico, periodo, 228-229, 240-242, 246, 251, 256-258, 263, 274-275

Crick, Francis, 75

Criptón, 176

Crucible of Creation, The (Conway Morris), 223

Cuaternario, periodo, 226

Darwin, Charles, 52, 55, 207-208, 216

Darwin/proyecto TPF (Terrestrial Planet Finder), 45, 48

darwiniana, evolución, 220

Davies, Joel, 78

Deamer, David, 53

Deccan, Trampas de, India, 241-242, 277

Devónico, periodo, 229

Diagrama de Hertzsprung-Russell, 122, 136

dientes de sable, felinos, 226

dinosaurios: dominación del planeta, 221; el Troodon, 257-259, 270-271; impacto cometario, 113-114, 140, 173, 188; muerte de los, 227-228, 245; y la era Paleozoica, 212

dióxido de carbono: efecto invernadero, 43, 72, 120-121, 139, 150-151, 169-170, 175, 184, 195, 203-205, 234-235, 244, 254, 278; efecto sobre la glaciación terrestre, 234-238; en Marte y Venus, 42-43; regulando la temperatura de la Tierra, 120-121, 184, 204-206

dióxido de silicio, 184

Doppler, efecto, 22, 24, 26

Drake, ecuación de, 526-62, 68, 271

Drake, Frank, 58-62

Edades de Hielo, 107-108, 118, 180, 198, 230

ediacáricos, 214, 217, 223, 230-231

encimas, 51-52

Encke, cometa, 248-250

Encke, Johann, 248

equilibrio, 51

Eros, asteroide, 247

estrellas: con compañeras, 125, 127-128; en la Vía Láctea, 100-105; formación de alteraciones, 106; metalicidad de, 98-100, 102, 109-111, 115-116; neutrones, 23-24, 96-97; «núcleos preestelares», 126; Population I, 91, 101; Population II, 87-88, 101; «Secuencia Principal» de estrellas, 93; supernovas, *véase* supernovas; y el momento angular, 126-127; y nucleosíntesis, 177

estrellas, tipos de: A, 124; D (enanas blancas), 94-97, 137-138; F, 27; G (amarillas-naranjas), 27, 123, 125; gigantes rojas, 136-138; K, 27; M (enanas rojas), 29, 122-124; O y B, 124, 146-149

estromatolitos, 50-51

eucariotas, células, 213, 223, 236

exoplanetas, *véase* planetas extrasolares

Extinction (David Raup), 279

Fermi, Enrico, 68-71, 77, 80, 84

Fermi, paradoja de, 68-70, 75, 101, 116, 259, 282

«Fermi, preguntas de», 69

filo cnidario, *véase* ediacáricos

filo / filos (*phyla*), 214, 219-220, 222-223, 225, 228, 250

formiato de etil, 34, 38

Forward, Robert, 78

fósiles, 50, 66, 193, 213-215, 217, 222-223, 225, 228, 259, 261-263, 281-282

Frail, Dale, 23

Gaia (Gea), 14-15, 41, 44, 47-48, 120, 143, 229, 271, 278

galaxia, la, *véase* Vía Láctea

galaxias: formación de patrones de espiral, 105; formaciones tempranas, 88-91; otros, 18-19

gamma, rayos, 112

genético, código, 35

glicina, 38, 50

glicolaldehído, 36

Gliese 581, 29

Gliese 710, 280

Glikson, Andrew, 188

gorilas, 255, 261-262, 269

Gott, Richard, 65-68

Gould, Stephen Jay, 211, 214-215, 218-224, 227, 230

grafito, 33, 179

Gran Nube de Magallanes, 131

gravedad, 33, 72, 83, 86, 92, 95-96, 103, 125-127, 132, 148, 152, 160, 198

«guarderías» estelares, 126

Hallucigenia, 216, 223

Hart, Michael, 71, 79

HD 189733, 29, 40

Hefestos, 249

helio, 19-20, 30, 32, 86, 91-95, 122, 130, 135-137, 153, 158, 177

heliosismología, 133-13

Herschel, telescopio de infrarrojos, 164

hidrógeno, 19, 30, 32-36, 86, 91-94, 98, 102, 122, 130, 135-137,
153, 158, 174, 177, 179, 245-246, 278

hierro, 94-97, 98

hierro-60, 159

Hipparcos, satélite, 280

HL Tauri, 32

Homo erectus, 66, 255, 267

Homo sapiens, 65-66, 229, 259, 266

How to Build a Habitable Planet (Broecker), 206

Hoyle, Fred, 55, 250-251

HR 4796A, 40

Hubble, Telescopio Espacial, 18, 40, 89

ictiosaurio, 225-226, 228

infrarroja, radiación, 26, 31, 42, 44-45, 47, 87, 101, 126, 144, 178

inspección, paradoja de la, 62, 64

Integral, telescopio espacial, 102

inteligencia: desarrollo en la Tierra, 93, 151-152, 173, 176, 185;
difícil de definir, 256; emergencia de la, 18-19, 25; interferencia
de los cometas, 113-115; rareza de la, 14-16, 115, 120, 123,
135; suceso abrumadoramente improbable, 221; y

convergencia, 227; y Drake, 60; y los primates, 77; y Von Neumann, 81

interferometría, 45

invernadero, efecto, 43, 72, 120-121, 139, 150-151, 169-170, 175, 184, 195, 203-205, 234-235, 244,254, 278

invierno cósmico, El (Clube/Napier), 250

Ipsilon Andrómeda, 91

iridio, capa de, 240-242

Islandia, 181

isótopos radioactivos: aluminio-26,130-131,159; hierro-60, 130-131, 159; níquel-60, 130-131

Jones, Eric, 70

Júpiter: descripción/claves de la vida, 153-157, 162-163; efecto sobre la órbita de la Tierra, 268; efectos beneficiosos de, 169-176, 178; momento angular de, 144-145; tamaño de, 25; *véase también* júpiteres calientes; y un encuentro a corta distancia, 147 jupíteres calientes, 22, 25, 27-29, 40, 145, 157, 163; *véase también* planetas extrasolares

Jurásico, periodo, 225-226

Kasting, James, 254

KBO, *véase* Kuiper, Cinturón de Kepler, observatorio espacial, 26

Konacki, Maciej, 23

Kuiper, Cinturón de, 140-141,154-155, 157, 163, 172, 247-248, 254,280

Lagrange, puntos de, 164-166

Leakey, Richard, 230

Lepock, James, 73

Life Itself (Crick), 75

Life's Solution (Conway Morris), 226

Lin, Douglas, 160-162

«línea de nieve», 161-162

Lineweaver, Charles, 56-57, 60-61, 110, 113

lípidos, 54

Lovelock, James, 14-15, 41-44, 47, 120, 139, 143, 206, 271-272, 279

Luna, la: beneficios de ser grandes, 197-198; efecto sobre la Tierra, 198-203; estabilizando los efectos sobre la Tierra, 197-203, 208, 239; formación de, 13, 56-57, 165; función de dar vida, 194-195; pruebas de impacto como medida, 187-188; unicidad de, 208-209

luz zodiacal, 250

magnetosfera, véase Tierra, campos magnéticos de la

mamíferos, 219, 221-222, 228, 257-259, 275

Margulis, Lynn, 51, 213

mariposa, efecto, 171

Marte: falta de biología, 143-144, 151-152; falta de características geológicas similares a la Tierra, 195-197; orígenes, 163-164; problemas de tamaño, 169-170; temperatura de, 119; y el Sol, 137-138; y Lovelock, 41-43

materia oscura, 86

Mayor, Michel, 24

Mediterráneo, mar, 264-265

Meert, Joseph, 237

Melosh, Jay, 74, 188, 243

Mercurio, 25, 46, 123, 137, 149-153, 163-164, 167-168, 171, 195, 252

Mesozoica, era, 212

metano, 34, 37-40, 53, 55, 114, 117, 154, 179

meteoritos: de Marte, 74; escombros cósmicos, 152-153; impactando en Venus, 195; presencia de calcio y aluminio, 134; presencia de cóndrulos, 158-159; presencia de níquel-60, 130-131; y aminoácidos, 38, 50, 54, 72; y la muerte de los dinosaurios, 227-228

Milanković, Milutin, 268

Milanković, modelo, 268-269, 271

Mioceno, época, 263

Mirror Matter (Forward/Davies), 78

moluscos, 225

momento angular, 144-145

mono ardilla, 262

Monod, Jacques, 256

monóxido de carbono, 178-179

Morgan, Joanna, 242

Murchison, meteorito, 53

M13, cluster, 59

Napier, Bill, 248-250

NASA, 41, 43-45, 50, 52, 54, 84, 276

Nebulosas de: Orión, 146-147; Roseta, 216

Nectocaris, 216

Neptuno, 146-148, 154, 156-157, 163, 169

neutrones, 23-24, 92, 95-97, 144

nitrógeno, 19, 32, 34, 36-37, 41-42, 184, 204

Nix Olympica (Marte), 197

n-propil cianido, 33,38

nubes moleculares, 78

objeto volante no identificado (OVNI), 76

Observatorio Gemini de Hawai, 30

ondas de densidad espiral, 106-107

Oort, Jan, 113

Oort, Nube de, 113-115, 155, 172, 247, 280

Opabinia, 216

órbitas retrógradas, 145

Ordovícico, periodo, 229

Orgel, Leslie, 75

Orión, Brazo de, *véase* Brazo Local; Nebulosa de Orión

Orión, Nebulosa de, 30

oxígeno, 19-20, 32-40, 42, 44, 47, 93, 95-96, 143, 151, 173-174, 177-179, 232, 246

ozono, 44, 47, 107, 112, 174, 244, 246

Pacífico, océano, 181

Palas, 152, 254

Paleozoica, era, 108,112

Pangea, 229

panespermia, 58, 68, 71,73; dirigida, 58, 75

«paradoja del joven Sol tenue», 43

Pasteur, Louis, 71

pentadáctilo, miembro, 225

Pérmico, extinción del, 228-229, 241

placas tectónicas, 180-181, 187, 195, 205, 207-208, 236-237

planetas: en otros sistemas, 148-149; formación de los, 155-160; órbitas de los, 147-148; rocosos, 143-144

planetas extrasolares: alrededor de los pulsares, 23-24; alrededor del Sol, como estrellas, 24-25, 29-30; búsqueda de evidencias de vida en, 45; descripción, 22-26; detección de, 4142, 44-47; donde el carbono prevalece sobre el oxígeno, 178-179; formación de, 32-33; *véase también* júpiteres calientes

planetesimales, 31-32

Plioceno, 263

Polinesia, 78

«Pompeya, gusanos de», 119

PPD, *véase* discos protoplanetarios Precámbrico, periodo, 212-213, 216, 230, 240, 278

Principio de la Mediocridad Terrestre, *véase* principio Copernicano

probabilidad, teoría de la, 63

procariotas, 213, 216, 233

proteína, 36-37

protones, 92-93, 95-96, 144, 192

protoplanetarios, discos (PPD), 31, 145-147

Próxima Centauri, 147

púlsares, 23-24

Queloz, Didier, 24
Quirón, 249-250
radical hidróxilo, 173
Raup, David, 279-280
R136, grupo, 131
realimentación negativa, 235
Rees, sir Martin, 63, 77
regiones de formación de estrellas, 30-31
ribosa, 35-36
Rift, gran valle del, Africa, 263, 266-267, 271
RNA, moléculas, 35-36, 51-52
Roseta, Nebulosa de, 146-147
Russell, Dale, 258
Sagan, Carl, 258-259
Saturno, 28, 40, 154-157, 163, 171, 249
Secker, Jeff, 73-74
Secuencia Principal, *véase* Diagrama de Hertzsprung-Russell
Seguin, Ron, 258
semidesintegración, escala de tiempo, 130
semipermeables, membranas, 52
serina, 50
SETI, 59, 67-68, 259
Shale, Burgess, 237
Shermer, Michael, 61-62, 64-65
Shoemaker-Levy 9, cometa, 172-173, 275
silicio, 19, 96, 177-178

Sistema Solar: circularidad de las órbitas de los planetas, 147; efectos del paso de una nube de gas, 107-108; en otros lugares, 140-141; explosión cercana de una supernova, 131; formación de los planetas rocosos, 157-158; formación del, 19, 99-100, 104-105, 132, 144-145, 160-163; geografía/planetas del, 24-25, 149-155; presencia de carbono en, 178; un lugar especial, 149, 168-176; y «la Zona Ricitos de Oro», 120; y cometas, 114-115; y nubes cósmicas, 245-248

Smith, John Maynard, 226

sodio, 98

Sol: amarillo-naranja, tipo G de estrellas, 27, 123, 125; destino de, 95, 227-228; eclipses solares, 200; elementos radioactivos de, 130-131; encuentro con una estrella, 148-149; estrella bastante corriente, 18; estructura de, 92-93; explosión de una supernova cerca, 131; fuerza gravitatoria de, 138; lugar en la Vía Láctea, 104-105, 115-116; mareas en la Tierra, 200-202; metalicidad de, 99-100, 133-135; muerte de, 135-138; no es una estrella media, 122-125, 129-130; rotación de, 144-145; vapor de agua, de energía de, 250-251; y nucleosíntesis estelar, 19; y tormentas solares, 192-193; Zona Estelar Habitable (ZEH), 117-119; Zona Habitable Continua (ZHC), 120-121

supernovas: descripción de, 95-97; en brazos espirales, 107; en la Vía Láctea, 111; explosión cerca del Sol, 131, 159; pulsares, 23; y nubes moleculares gigantes, 126

Spitzer, telescopio espacial, 29, 40, 144, 146-147, 209

Stanley, Steven, 229-230

Stardust, sonda espacial, 50

Stevenson, David, 208

Sturtian, glaciación, 237-239

Sudamérica, 61, 79, 263, 265, 270

Táuridas Beta, 249; lluvia de meteoritos, 249

Tea (protoplaneta), 165

termostato global, 184, 204

Thomson, William, 71-73

Tierra: agarre temprano de la vida, 49, 51, 58; amenaza a la vida de los cometas, 113-114; bombardeada desde el espacio, 187-188; campos magnéticos de la, 189-197; carbono muy pequeño, 178; destino de, 277-281; disposición única del agua, 186; Edades de Hielo, 107-108, 118, 180, 198, 230; efectos de la Luna, 197-203; efectos de un impacto masivo, 254; equilibrio climático de la, 250-251; estabilizando los efectos lunares, 197-203, 208, 239-240; formación de, 163-168; inseminado con moléculas orgánicas, 54-55; interglaciales, 268; muerte de la, 138; nacimiento de la, 100-101; nubes cósmicas, 245-249; orígenes del agua, 174-176; patrón de calor del Sol, 268-269; posponiendo el día del juicio final, 139-141; presencia de oxígeno, 42; primeras catástrofes, 13; temperatura regulada por el dióxido de carbono, 120-121, 184, 204-206; un planeta donde vivir, 143-144, 151; único planeta inteligente, 15, 115-116; vulnerabilidad a las crisis repentinas, 271-273; y «la Zona Ricitos de Oro», 120; y la alta oblicuidad, 239; y placas

tectónicas, 180-181, 187, 195, 205, 207-208, 236-237; y
vulcanismo, 276 tierras húmedas, 30
«tiempo regresivo», 85
Tipler, Frank, 82
Tipo I, supernovas, 95-96
Tipo II, supernovas, 96-97
Tiranosaurio Rex, 221-222
Titán, 40
Toba, lago, 276
tolinas, 40
tomotianos, 214
topos marsupiales, 226
Torsvik, Trond, 237
Trampas Siberianas, 241
Triásico, periodo, 229, 251
Trigo-Rodríguez, Josep M., 159
Tunguska, meteorito de, 274-275
Turing, Alan, 80
Turing, máquina universal de, 81
Último Bombardeo Intenso, 56-57, 172, 175, 178, 187, 195
ultravioleta, radiación, 174, 244
unidad astronómica (UA), 25
Urano, 154, 156-157, 163, 249, 253
23 Lib, 169
Venus: falta de características geológicas similares a la tierra, 195-
197; formación de, 163-164; demasiado caliente para tener

agua líquida, 119; destino de, 137; dióxido de carbono en la atmósfera, 43; efecto de las interacciones gravitatorias, 171; efecto invernadero, 169-170, 204; rotación a la inversa de, 253-254; sin vida, 143-144, 150; suceso catastrófico, 13; superficie de, 252-253

vesículas, 53-55

Vesta, 152,153

Vía Láctea: agujero negro en el centro de la, 89, 102, 111; carbono-oxígeno, 177-180; como un almacén gigante, 41; cuatro categorías de estrellas, 101-103; disturbios de formación estelar, 105-106; el lugar del Sol en la, 103-104, 108-109,149; estrellas con discos polvorientos, 146-147; estrellas distintas del Sol, 122-123; estructura espiral, 20; futura colonización de, 79-80, 82-83; nubes moleculares gigantes en, 125-128; perspectiva de tecnología de otras civilizaciones dentro de la, 282; planetas habitables, 13, 15, 59-62; por qué existe la vida inteligente, 85; tamaño de, 18-19, 30; y canibalismo cósmico, 90-91; y ráfagas de rayos gamma, 112; Zona Habitable de la Galaxia, 109-113,124,129

vida maravillosa, La (Gould), 215, 218, 223

Viewing, David, 70-71

Von Neumann, John, 81-82

Von Neumann, máquina de, 82, 84, 140-141

Ward, Peter, 203

Webb, Stephen, 75

Wesson, Paul, 73

Where is Everybody? (Webb), 76
Whipple, Fred, 249
Whittington, Harry, 216
Wickramasinghe, Chandra, 55
Wild 2, cometa, 50
WISE, satélite, 276
Wolszczan, Alex, 23
X, rayos, 102, 111, 124, 190
xenón, 176
Yellowstone Park, Estados Unidos, 276
Yucatán, península de, 241, 243
Zwart, Simon, 132-133
ZGH, *véase* Zona Galáctica Habitable
Zona de Habitabilidad Continua (ZHC), 120-121
Zona de Habitabilidad, 14; *véase también* Zona de Habitabilidad Continua (ZHC)
Zona Estelar Habitable (ZEH), 117-119
Zona Galáctica Habitable (ZGH), 109-113, 124-125

El autor



JOHN GRIBBIN, se doctoró en astrofísica por la Universidad de Cambridge y en la actualidad es visiting fellow en astronomía en la Universidad de Sussex. Es, además, asesor del *New Scientist*. Entre sus obras, grandes éxitos de ventas, destacan *En busca del gato de Schrödinger*, *El Punto Omega*, *En busca del big bang*, *Cegados por la luz: la vida secreta del Sol*, *En el principio*, *Diccionario del cosmos* (1997), *En busca de Susy* (2001), *Introducción a la ciencia* (2001) e *Historia de la ciencia* (2005).