

FRANCIS CRICK



La

vida
misma

su origen y naturaleza



1934 - 2009

50 aniversario
COLECCION POPULAR

277

LA VIDA MISMA

COLECCIÓN POPULAR

Traducción de
PEDRO TORRES AGUILAR

FRANCIS CRICK

La vida misma
SU ORIGEN Y NATURALEZA



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Primera edición en inglés, 1981
Primera edición en español, 1985
Tercera reimpresión conmemorativa
del 50 aniversario de Colección Popular, 2009

Crick, Francis

La vida misma: su origen y naturaleza / Francis Crick ; trad. de Pedro Torres Aguilar. — México : FCE, 1985.

206 p. ; 17 × 11 cm — (Colec. Popular ; 277)

Título original *Life Itself. Its Origin and Nature*

ISBN 978-968-16-1447-8

I. Vida — Origen I. Torres Aguilar, Pedro, tr. II. Ser. III. t.

LCQH325

Dewey 577 C928v

Distribución mundial

Título original: *Life Itself. Its Origin and Nature*

© 1981, Francis Crick

Publicado por Futura Publications, Londres

ISBN 0-7088-2235-5

Diseño de portada: Laura Esponda Aguilar

D. R. © 1985, Fondo de Cultura Económica

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738, México, D. F.

Empresa certificada ISO 9001: 2000

Comentarios: editorial@fondodeculturaeconomica.com

www.fondodeculturaeconomica.com

Tel. (55) 5227-4672 Fax (55) 5227-4694

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio, sin la anuencia por escrito del titular de los derechos.

ISBN 978-968-16-1447-8

Impreso en México • *Printed in Mexico*

ÍNDICE

<i>Agradecimientos</i>	11
<i>Prefacio. Y entonces, ¿dónde están ellos?</i>	15
I. <i>Tiempos y distancias, grandes y pequeños</i>	21
II. <i>El escenario cósmico</i>	33
III. <i>La uniformidad de la bioquímica</i>	43
IV. <i>La naturaleza general de la vida</i>	57
V. <i>Los ácidos nucleicos y la duplicación molecular</i>	74
VI. <i>La Tierra primitiva</i>	86
VII. <i>Una falacia estadística</i>	105
VIII. <i>Otros planetas habitables</i>	111
IX. <i>Civilizaciones superiores</i>	125
X. <i>¿Cuán pronto pudo comenzar la vida en la Tierra?</i>	131
XI. <i>¿Qué habrían enviado ellos?</i>	136
XII. <i>El diseño del cohete</i>	152
XIII. <i>Las dos teorías opuestas</i>	164
XIV. <i>Reconsideración de la pregunta de Fermi</i>	180
XV. <i>¿Por qué hemos de preocuparnos?</i>	187

<i>Epílogo. ¿Contaminaremos la galaxia?</i>	195
<i>Apéndice.</i>	199
El código genético	199
El ARN y el código genético	202
<i>Otras lecturas.</i>	205

A ODILE

AGRADECIMIENTOS

ESCRIBÍ ESTE libro después de haberme trasladado al Instituto Salk, en el sur de California. Agradezco a la Fundación Kieckhefer el haber creado para mí una Cátedra de Investigación y a las Fundaciones Ferkhauf y Nobel por su contribución adicional. Especial agradecimiento debo al presidente del Instituto Salk, doctor Frederick de Hoffmann, que me proveyó de un ambiente ideal para el trabajo de científico creador.

Dudo de que hubiera llegado a verme involucrado en el problema del origen de la vida, a no ser por mi larga amistad con el doctor Leslie Orgel. La idea de una panspermia dirigida, que constituye el esqueleto de este libro, tuvo su origen en un artículo que él y yo escribimos conjuntamente, pero su influencia ha sido más profunda. Su grupo en el Instituto Salk efectúa trabajo experimental sobre la química prebiótica y nosotros discutimos aspectos del problema casi cada semana. También leyó él un primer borrador sobre el que hizo provechosos comentarios. Este borrador lo vio asimismo el doctor Gustav Arrhenius (nieto de Svante August Arrhenius, el primer proponente de la hipótesis de la panspermia).

Como resultado de sus numerosos comentarios, reescribí varias secciones, especialmente las relativas a la atmósfera primitiva de la Tierra, pero Arrhenius no es en modo alguno responsable del resultado final. El doctor Tom Jukes y mi hijo Michael Crick también me ayudaron de diversas maneras.

Siendo, como soy, un autor bastante inexperto, recibí valiosa ayuda del personal editorial de Simon and Schuster. Los comentarios y sugerencias de Alice Mayhew han dado a este libro mejor aspecto del que tuvo en su origen. Su entusiasmo me ayudó a vencer mis dudas iniciales. Fue ella asimismo quien sugirió el título. Ann Godoff fue siempre reservada en su eficiencia y muy paciente con las confusiones y retardos postales. Nancy Schiffmann, ordenadora y correctora editorial, se las arregló de la más grata manera para mejorar mi inglés y eliminar errores y ambigüedades. Mi secretaria en el Instituto Salk, Betty Lars, batalló heroicamente con mi casi ininteligible escritura y sobre todo con los muchos términos técnicos poco conocidos. A todas estas personas, mi agradecimiento por sus esfuerzos.

Vaya nuestro agradecimiento para las siguientes personas por permitirnos utilizar sus dibujos:

De *Chemistry*, de Linus Pauling y Peter Pauling, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1975.

De *Molecular Genetics: An Introductory Narrative*, de Gunter S. Stent y Richard Calendar, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 2a. ed., 1981.

- De *Biochemistry*, de Lubert Stryer, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 2a. ed., 1976.
- De la revista *Science*, "Left-Handed Double Helical DNA: Variations in the Backbone Conformation", del doctor Gary Guigley, del Departamento de Biología, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, MIT, *Science*, vol. 211, pp. 171-176, portada, 9 de enero de 1981.
- De la revista *Science*, "Left-Handed Double Helical DNA: Variations in the Backbone Conformation", de A. H. J. Wang, *Science*, vol. 211, pp. 171-176, portada, 9 de enero de 1981.
- De *Molecular Biology of the Gene*, de James D. Watson, W. A. Benjamin, Inc., Nueva York, 3a. ed., 1976.

PREFACIO

Y ENTONCES, ¿DÓNDE ESTÁN ELLOS?

EL FÍSICO italiano Enrico Fermi fue hombre de talento sobresaliente. Su esposa creía que era un genio y son muchos los científicos que opinan lo mismo. Fue no sólo un físico teórico excepcionalmente bueno, sino también extraordinario experimentador. Fermi, junto con su amigo el científico húngaro Leo Szilard, dirigió el proyecto y construcción del primer reactor atómico, que construyeron en una cancha de *squash* abandonada, situada bajo la gradería del estadio deportivo de Chicago, durante la segunda Guerra Mundial. Fue en este ambiente poco favorable donde por primera vez en este planeta se logró dominar el peligroso poder de la fisión nuclear.

Al igual que casi todos los grandes científicos, Fermi tenía múltiples intereses aparte de su propio campo particular. Se le atribuye haber hecho una famosa pregunta. A la pregunta de Fermi precede un largo preámbulo, más que un chiste largo y pesado. El universo es inmenso, contiene miradas de estrellas, muchas de ellas no diferentes de nuestro Sol. Nuestra propia galaxia contiene quizá 10^{11} estrellas* y existen por lo menos 10^{10} galaxias

* Esta notación es tan conveniente que la voy a utilizar a lo largo

y probablemente más. Es posible que muchas de estas estrellas tengan planetas girando en torno suyo. Quizá buena parte de tales planetas tiene agua líquida en la superficie y, además, una atmósfera gaseosa constituida por compuestos sencillos del carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. El torrente de energía que emana de la estrella —la luz solar en nuestro caso— e incide sobre la superficie del planeta podría haber causado la síntesis de numerosos compuestos orgánicos pequeños que convertirían los océanos en ligero caldo caliente. Estos compuestos químicos podrían llegar a juntarse unos con otros y reaccionar entre sí de intrincada manera para originar un sistema capaz de autorreproducirse, una forma primitiva de vida. Estos sencillos seres vivos se multiplicarían, evolucionarían por selección natural y se harían más complicados, hasta que, en último término, aparecieran criaturas activas y pensantes. Seguirían la civilización, la ciencia y la tecnología y, antes de mucho tiempo, habrían dominado todo el ambiente de su planeta. Entonces, ansiosos por conquistar nuevos mundos, aprenderían a viajar a los planetas vecinos y más tarde a los de las estrellas más próximas, de los cuales elegirían para colonizar los que ofrecieran un ambiente más favorable. Finalmente, podrían extenderse por toda la galaxia y explorarla. Esta gente, inteligentísima y dotada de inmenso talento, difícilmente pasaría sin advertirlo un lugar tan bello como nuestra Tierra, con su abundante provisión de agua y compuestos orgánicos, su favorable temperatura y todas sus demás ventajas. “Pero entonces

de todo este libro sin ulterior explicación; 10^{11} significa simplemente un número consistente en un 1 seguido de 11 ceros, es decir, 100 000 millones.

—diría Fermi, llegando a su abrumadora pregunta—, si todo esto hubiese sucedido, ellos ya habrían llegado aquí, *de modo que ¿dónde están?*” Fue Leo Szilard, hombre con un malicioso sentido del humor, quien daría réplica perfecta a la retórica pregunta de Fermi. “Están entre nosotros —dijo—, pero se llaman a sí mismos húngaros.”

Casi todo el mundo aceptaría la tendencia del argumento de Fermi. Las dificultades surgen cuando uno trata de calcular la probabilidad de cada paso, de ponerlo en números. En realidad, no tenemos pruebas irrefutables de que otras estrellas tengan planetas, si bien parece probable que así sea. Si existen planetas, por lo menos unos cuantos han de tener un ambiente favorable para la producción de buen caldo: una mezcla de compuestos orgánicos simples con agua. Es el paso siguiente, el que por ahora nos es tan misterioso: la formación, a partir de ese caldo, de un primitivo sistema químico capaz de autorreproducirse.

Aun si esto sucediera, no sabemos cuál sería la probabilidad de que este largo proceso de evolución culminara en una civilización superior ni exactamente cuánto tiempo pudiera tardar, tampoco si tales estructuras explorarían el universo ni cuán lejos podrían viajar. Todos los acontecimientos del escenario de Fermi podrían sin duda ocurrir; pero algunos pasos pueden ser muy raros y algunas etapas quizá bastante lentas. Esto explicaría con cierta facilidad por qué, hasta ahora, no parece que hayamos tenido visitantes provenientes del espacio exterior.

Hace mucho tiempo, desde fines del siglo pasado, que el físico sueco Svante Arrhenius sugirió una idea diferente acerca del origen de la vida sobre la Tierra. De acuerdo con su hipótesis, la vida no había comenzado

por sí misma en nuestro planeta, sino que había sido sembrada por microorganismos que llegaron flotando del espacio. Se suponía que estas primitivas esporas, originarias de algún otro lugar, llegaron a la Tierra suavemente impulsadas por la presión de la luz que incidía en ellas. Arrhenius llamó *panspermia* a su hipótesis, con el significado de "siembra por doquier". En nuestros días esta idea no goza de favor, dado que es difícil que pudieran llegar a nuestro planeta esporas viables, tras un larguísimo viaje a través del espacio, sin ser dañadas por la radiación cósmica.

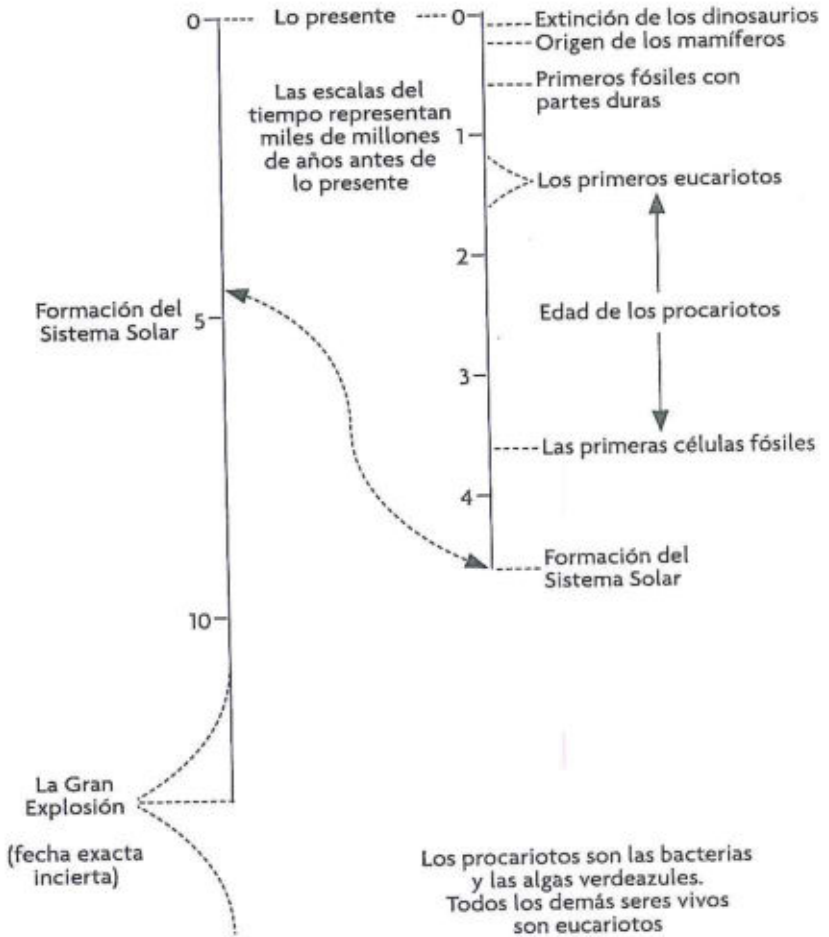
En este libro exploro una variante de la panspermia que Leslie Orgel y yo sugerimos hace unos años. Para evitar el daño, se supone que los microorganismos viajaron en la cabeza de una nave espacial no tripulada enviada a la Tierra por una civilización superior que se habría desarrollado en algún lugar lejano hace algunos miles de millones de años. Se supone que la nave espacial no venía tripulada para que, de este modo, su alcance fuera el mayor posible. La vida comenzó a desarrollarse en nuestro planeta cuando los organismos fueron dejados caer en nuestro océano primitivo y comenzaron a multiplicarse. Orgel y yo denominamos nuestra hipótesis *panspermia dirigida* y la publicamos discretamente en *Icarus*, revista de temas espaciales editada por Carl Sagan. No era nada nuevo. J. B. S. Haldane ya había hecho de paso una referencia a ella en 1954 y otros la habían tomado en cuenta desde entonces, aunque no con tanto detalle como nosotros.

En el capítulo XIII discutimos la cuestión de si la panspermia dirigida debería ser considerada ciencia genuina o si se trata de una mera forma poco imaginativa de ciencia ficción. La mayor parte del libro está dedicada

a detallar cada uno de los pasos del argumento de Fermi. Mantiene su adhesión a los principios científicos hoy vigentes con bastante firmeza a pesar de lo insustanciales que a menudo son. Más que resolver el problema del origen de la vida en la Tierra, quiero esbozar el fondo contra el cual cualquier solución debe mantenerse. ¡Y qué fondo! Desde la pequeñez de los átomos y moléculas hasta el vasto panorama del universo entero; desde los acontecimientos que transcurren en una fracción infinitesimal de segundo hasta los que ocupan todo el lapso del tiempo mismo; desde la Gran Explosión hasta lo presente; desde la intrincada interacción de las macromoléculas orgánicas hasta las ilimitadas complejidades de las civilizaciones superiores y las más avanzadas tecnologías. Éste es uno de los encantos del tema, por otra parte decepcionante, que para comprenderlo resulta necesario saber algo acerca de los muchos aspectos de este asombroso universo en que nos encontramos.

El Universo

El Sistema Solar



I. TIEMPOS Y DISTANCIAS, GRANDES Y PEQUEÑOS

HAY UN hecho relativo al origen de la vida razonablemente cierto. Cuándo y dónde sucedió fue hace mucho tiempo, tanto que es en extremo difícil formarse una idea realista acerca de la extensión del tiempo. Nuestra experiencia personal abarca decenas de años en retrospectiva, y sin embargo, aun para un tiempo tan corto, olvidamos precisamente cómo era el mundo en nuestra juventud. Hace 100 años la Tierra estaba también repleta de personas dedicadas a sus negocios, comían y dormían, caminaban y hablaban, hacían el amor y se ganaban la vida, cada una se ocupaba normalmente en sus propios asuntos, y no obstante (salvo muy raras excepciones) ninguna de ellas vive en nuestros días. En su lugar, un conjunto de personas por completo diferentes habita la Tierra en torno nuestro. La brevedad de la vida humana limita por fuerza el alcance de nuestro recuerdo personal.

La cultura humana nos da la ilusión de que nuestra memoria llega mucho más allá. Antes de que se inventara la escritura, la experiencia de las generaciones anteriores, incorporada en leyendas, mitos y preceptos morales para guiar nuestra conducta, íbase transmitiendo verbalmente

o, con menos frecuencia, por medio de pinturas, dibujos, grabados y esculturas. La escritura ha hecho mucho más precisa y extensa la información por ella transmitida y, en tiempos recientes, la fotografía ha conferido mayor claridad a nuestras imágenes del pasado inmediato. La cinematografía proporcionará a las futuras generaciones una impresión más vívida y directa de sus antecesoras que la que ahora llega a nosotros por medio de la palabra escrita. ¡Lástima que no tengamos un filme sonoro de Cleopatra! No sólo nos revelaría el verdadero tamaño de su nariz, sino que haría más explícita la razón de su encanto.

Con algún esfuerzo, nos es posible proyectarnos en retrospectiva a la época de Platón y Aristóteles y aún más allá de los héroes homéricos de la Edad del Bronce. Podemos aprender algo acerca de las sumamente organizadas civilizaciones de Egipto, Medio Oriente, América Central y China, y un poco respecto a otras colectividades más primitivas y dispersas. Aun así, nos es difícil entrever con cierta constancia la marcha de la historia desde los comienzos de la civilización hasta lo presente, de tal modo que podamos experimentar en realidad el lento paso del tiempo. Nuestra mente no está estructurada para tratar cómodamente con espacios de tiempo de cientos o millares de años.

Por lo tanto, cuando nos proponemos considerar el origen de la vida las escalas de tiempo con que hemos de enfrentarnos hacen que toda la duración de la historia humana nos parezca apenas simple parpadeo. No es fácil ajustar nuestro pensamiento a tan inmensos lapsos. La inmensidad del tiempo transcurrido queda lejos del alcance de nuestra capacidad de comprensión. Apenas es posible

formarnos una vaga idea de tal proporción por descripciones indirectas e incompletas, en forma muy parecida a como un ciego con dificultad puede lograr una imagen de su ambiente por medio del oído y el tacto.

El modo acostumbrado de proporcionar un adecuado marco de referencia a nuestro pensamiento consiste en comparar la edad del universo con la duración del día terrestre. Quizá una mejor comparación sería, siguiendo las mismas líneas, equiparar la edad de la Tierra con la duración de una semana. Con tal escala, la edad del universo, contada desde la Gran Explosión, sería de unas dos o tres semanas. Los más antiguos fósiles macroscópicos (los del comienzo del cámbrico) tendrían apenas un día de vida. El hombre moderno habría aparecido en los últimos 10 segundos, y la agricultura en los últimos uno o dos segundos. Ulises habría vivido hace apenas medio segundo.

Aun esta comparación difícilmente nos hace comprensible tan dilatada escala temporal. Otra alternativa sería dibujar un mapa lineal del tiempo en el que se marcaran todos los acontecimientos. En este caso, el problema consistiría en dibujar la línea lo suficientemente larga para dar cabida en ella a nuestra experiencia en escala razonable, pero lo bastante corta para su conveniente reproducción y examen. Para facilitar la referencia, una gráfica como la descrita va impresa al comienzo de este libro. Pero quizá el método más vívido sea comparar el tiempo con las líneas en ella impresas. Supongamos que el tamaño de este libro sea igual al tiempo transcurrido desde el comienzo del cámbrico hasta el presente, es decir, unos 600 millones de años. Entonces, cada página vendría a representar unos tres millones de años, cada línea unos 90 000 años y cada letra o pequeño espacio

entre una y otra alrededor de 1 500 años. El origen de nuestro planeta habría tenido lugar hace unos siete libros y el del universo (fechado sólo aproximadamente) unos 10 libros antes. Casi la totalidad de la historia humana registrada abarcaría las dos o tres últimas letras de este libro.

Si uno fuera volviendo las páginas de este libro, leyendo lentamente *letra por letra* —recuérdese que cada una de ellas vale por 1 500 años—, esto daría una idea aproximada de los inmensos espacios de tiempo que habremos de considerar. En esta escala, la duración de una vida humana sería menor que el ancho de una coma.

Si en realidad la vida comenzó en la Tierra, poquísimos sería lo que haya de interesarnos el resto del universo; pero si hubiese comenzado en otro lugar del mismo, habremos de tomar seriamente en cuenta la magnitud de largas distancias. Aun cuando es difícil transmitir una vívida y precisa impresión de la edad del universo, darse una idea de su tamaño es algo que se halla casi fuera de la comprensión humana; sin embargo, trataremos de expresarla. El principal obstáculo con que tropezaremos es la extrema vacuidad del espacio; no meramente los pocos átomos entre las estrellas, sino la inmensa distancia entre una estrella y otra. El mundo visible próximo a nosotros está abarrotado de objetos, y nuestro cálculo intuitivo de su distancia depende sobre todo de las varias claves provistas por su tamaño aparente y sus interrelaciones visuales. Es mucho más difícil juzgar respecto a la distancia de un objeto no conocido que flota en la vacuidad de un cielo azul y transparente. Oí una vez a un entrevistado en una estación de radio canadiense contestar, cuando se le preguntó cuál creía que sería el tamaño de

la Luna, que “sería algo así como el de un globo”, aunque debemos confesar que esto ocurrió antes de que hubiese viajes espaciales.

Así es como dos astrónomos, Jastrow y Thompson, intentan describir, por analogía, el tamaño y la distancia de objetos en el espacio:

Sea el Sol del tamaño de una naranja; en tal escala, la Tierra sería como un grano de arena girando en una órbita alrededor del Sol distante de éste unos nueve metros; Júpiter, 11 veces mayor que la Tierra, sería como un hueso de cereza girando a una distancia de 60 metros o una cuadra del Sol. En esta escala, la galaxia vendría a ser como unas 100 000 millones de naranjas, y cada naranja estaría separada de su vecina por una distancia media de unos 1 609 kilómetros.¹

La dificultad con analogías de esta índole es que resulta casi imposible para nosotros calcular distancias en un espacio vacío. La comparación con una manzana de casas es desacertada, pues nos es fácil ver los edificios que la componen, y entonces se pierde la idea de la vacuidad. Si uno trata de imaginar una naranja flotando en el espacio a la distancia de un kilómetro, le parecerá que tal distancia se vuelve indefinida. Una “naranja” a 1 609 kilómetros resultaría demasiado pequeña para que se viera, salvo que fuera incandescente.

Otro posible método consiste en convertir las distancias en tiempo. Supóngase que nos hallamos a bordo de un vehículo espacial que viaja mucho más rápido que cualquiera de los actuales. Por muchas razones, que queda-

¹ Más información sobre el libro de Jastrow y Thompson se encontrará en la sección “Otras lecturas”, al final de este volumen.

rán en claro más adelante, supóngase que su velocidad es 100 veces menor que la de la luz, o sea, unos 3 000 kilómetros por segundo. A esta velocidad es posible trasladarse de Nueva York a Europa en unos tres segundos (el *Concorde* tarda unas tres horas). Indudablemente, uno viajaría entonces a velocidad mucho mayor que las habituales hoy día. Tardaría unos dos minutos en llegar a la Luna y 15 horas en alcanzar el Sol. Para cruzar en línea recta el Sistema Solar de un lado a otro —tomemos esta distancia de manera un tanto arbitraria como el diámetro de una órbita de Neptuno— tardaría uno tres semanas y media. El punto principal que debe tomarse en cuenta es que este viaje no es igual que un largo viaje en tren, mayor que el recorrido de ida y vuelta entre Moscú y Vladivostok. Tal viaje sería quizá bastante monótono, aunque a través de la ventanilla veríamos cambiar en forma constante el paisaje. En cambio, durante el viaje por el Sistema Solar nada se vería a través de la ventanilla del vehículo espacial. Muy lentamente, día tras día, el Sol cambiaría de tamaño y posición. Al irnos alejando de él, decrecería su diámetro aparente, hasta que, llegados a la órbita de Neptuno, parecería “un poco mayor que la cabeza de un alfiler”, tal como lo describí antes, suponiendo que su tamaño aparente, visto desde la Tierra, correspondería más o menos al de un disco de 2.5 centímetros. A pesar de viajar con tanta rapidez —recuérdese que a esta velocidad podríamos ir de un punto de nuestro planeta a cualquier otro del mismo en menos de siete segundos— este viaje sería aburridísimo. Nuestra principal impresión sería casi la de una total vacuidad del espacio. A esta distancia, un planeta parecería ser poco más que una ocasional partícula en un inmenso desierto.

Esta sensación de un vacío tridimensional inmenso resulta ya suficientemente mala aun sin salirnos del Sistema Solar. (Casi todos los modelos a escala del sistema planetario que vemos en los museos son sumamente engañosos. El Sol y los planetas son casi siempre demasiado grandes en comparación con las distancias que guardan entre sí.) Cuando tratamos de ir más lejos a través del campo es cuando realmente nos sorprende la enormidad del espacio. Para llegar a la estrella más próxima (en realidad, un grupo de tres estrellas al parecer muy próximas) nuestra nave espacial tardaría 430 años, y lo más seguro es que no encontraríamos nada importante en nuestro camino hacia ella. Toda una vida de 100 años viajando a esta alta velocidad nos llevaría a menos de un cuarto de la distancia que habríamos de recorrer. Viajaríamos constantemente de un vacío a otro sin encontrar nada, salvo una que otra molécula de gas y alguna ocasional minúscula partícula de polvo que nos hicieran darnos cuenta de que no permanecíamos siempre en el mismo lugar. Con mucha, mucha lentitud veríamos algunas de las estrellas más cercanas cambiar ligeramente de posición, mientras que el Sol iría desvaneciéndose de manera lenta e imperceptible hasta parecernos sólo otra estrella más entre las muchas que tachonarían el fondo negro del espacio que rodearía la nave espacial. Por muy largo que nos parezca este viaje a la estrella más próxima, juzgado por las normas astronómicas sería cortísimo. Atravesar de lado a lado nuestra galaxia nos llevaría no menos de 10 millones de años. Tales distancias sobrepasan todo lo que podamos concebir, excepto de la manera más abstracta. Y aún más, en escala cósmica, la distancia a través de la galaxia apenas puede considerarse como tal. Se sabe

con certeza que es sólo la vigésima parte de la distancia que nos separa de Andrómeda, la más cercana de las galaxias grandes; pero para alcanzar los límites del espacio que nos permiten ver los telescopios gigantes, habríamos de viajar durante un tiempo 1 000 veces mayor que aquél. Para mí es notable que este asombroso descubrimiento, la inmensa vastedad y vacuidad del espacio, no haya atraído la atención de los poetas y de los pensadores religiosos. La gente se siente feliz al considerar la omnipotencia de Dios —cuando más, una proposición dudosa—, pero no está dispuesta en realidad a meditar en forma creativa sobre el tamaño de este extraordinario universo en el cual, y no por su propia virtud, se halla. Ingenuamente, cabría pensar que tanto poetas como sacerdotes se encuentran por completo tan perplejos por estas revelaciones de la ciencia que estarían tratando con ardiente celo de incorporarlas a los fundamentos de nuestra cultura. El salmista que dijo: “Al ver tu cielo, hechura de tus dedos, / la Luna y las estrellas, que fijaste tú, / ¿qué es el hombre para que de él te acuerdes, / el hijo de Adán para que de él te cuides?” (Salmo 8), intentaba por lo menos, en los límites de sus creencias, expresar su maravilla ante el universo visible a simple vista y la insignificancia del hombre en comparación. Y, sin embargo, *su* universo era pequeño, casi íntimo comparado con el que nos ofrece la ciencia moderna. Es casi como si la total insignificancia de la Tierra y la delgada película de su biosfera hubiesen paralizado por completo su imaginación, como si fuera demasiado temible contemplarlo y, por consiguiente, mejor desdeñarlo.

No analizaré aquí cómo se han calculado estas grandes distancias. La distancia de los principales objetos del

Sistema Solar puede obtenerse ahora con mucha exactitud mediante una combinación de la teoría de la mecánica solar y los datos proporcionados por el radar; la distancia a las estrellas más próximas por la manera en que cambia ligeramente su posición relativa, vistas desde diferentes puntos de la Tierra en su órbita anual en torno del Sol. Después de esto, los argumentos son más técnicos y menos precisos. Pero no cabe duda de que las distancias pertenecen al orden de magnitud que los astrónomos han calculado.

Hasta ahora hemos considerado magnitudes muy grandes. Por fortuna, cuando regresamos a distancias y tiempos muy pequeños, las cosas no son tan malas. Necesitamos saber el tamaño de los átomos —el tamaño y el contenido del minúsculo núcleo atómico nos interesa menos—, comparado con las cosas de nuestra vida social cotidiana. Esto podemos resolverlo en dos pasos relativamente pequeños. Comencemos con un milímetro. Esta distancia es fácil observarla a simple vista. A la milésima parte de un milímetro se le denomina micra. Una célula bacteriana mide unas dos micras de longitud. La longitud de onda de la luz visible (que limita lo que puede verse con un microscopio luminoso de gran aumento) es de alrededor de media micra.

Descendamos ahora a una longitud igual a una milésima de micra y tendremos el nanómetro (10^{-9} m). La distancia típica entre átomos contiguos fuertemente ligados entre sí en un compuesto orgánico varía entre un décimo y un quinto de nanómetro. En las más favorables condiciones, podemos ver distancias de un nanómetro o un poco menos usando el microscopio electrónico, siempre que el espécimen esté bien preparado. Además, es

posible exhibir imágenes de una serie completa de objetos naturales en cualquier escala, desde un pequeño grupo de átomos hasta una pulga, de modo que, con un poco de práctica, podemos percibir cómo de una escala se pasa a otra. En contraste con la vacuidad del espacio, el mundo vivo está repleto de detalles en cada nivel. La facilidad con que podemos pasar de una escala a otra no debe cegarnos al hecho de que el número de objetos en determinado *volumen* puede ser incómodamente grande. Por ejemplo, una gota de agua contiene más de un trillón de moléculas.

El tiempo corto que nos interesa aquí rara vez será menor de un picosegundo, es decir, una billonésima parte de un segundo, aunque tiempos mucho más cortos se necesitan en las reacciones nucleares y en el desplazamiento de las partículas subatómicas. Este minúsculo intervalo pertenece a la escala temporal en que vibran las moléculas, pero considerado de otra manera no parece extraordinario. Consideremos la velocidad del sonido. En el aire es relativamente lenta —un poco más veloz que la mayor parte de los aviones de reacción—, pues no difiere mucho de unos 300 metros por segundo. Si vemos un relámpago a una distancia de 1 600 metros, su sonido nos llegará al cabo de cinco segundos. Incidentemente, esta velocidad es más o menos igual a la velocidad media de las moléculas de gas en el aire y entre las colisiones de unas con otras. La velocidad del sonido a través de cuerpos sólidos suele ser un poco mayor.

Nos preguntamos ahora: ¿cuánto tardará una onda sonora en atravesar una molécula pequeña? Un sencillo cálculo nos dirá que este tiempo es del orden del picosegundo. Eso es lo que uno esperaría, puesto que es aproxi-

madamente la escala de tiempo en que los átomos de las moléculas vibran unos contra otros. Lo importante radica en que esto es, en términos aproximados, la velocidad de pulsación de las reacciones químicas *subyacentes*. Una enzima (catalizador orgánico) puede reaccionar un millar de veces por segundo o más. Esto puede parecer rápido para nosotros, pero de hecho es una velocidad bastante lenta en la escala temporal de la vibración atómica.

Desgraciadamente, no es tan fácil expresar las escalas temporales entre un segundo y un picosegundo, aunque un físico-químico puede aprender a sentirse a sus anchas en estos intervalos tan grandes. Por fortuna, no estamos interesados directamente en estos tiempos tan breves, aun cuando habremos de percibir sus efectos en forma indirecta. La mayor parte de las reacciones químicas son en realidad acontecimientos muy raros. Por lo regular, las moléculas giran intermitentemente y chocan unas contra otras muchas veces antes de que un encuentro feliz les permita chocar entre sí fuertemente y en la dirección adecuada para salvar sus barreras protectoras y ocasionar una reacción química. Como suele haber muchas moléculas en un pequeño volumen, todas chocando al mismo tiempo, parece que la velocidad de una reacción química continúa siendo bastante uniforme. Las variaciones aleatorias son uniformadas debido al gran número de moléculas que participan.

Cuando volvemos la vista y examinamos una vez más estas escalas tan diferentes —el diminuto tamaño de un átomo y el casi inimaginable tamaño del universo; el índice de pulsación de una reacción química comparada con los desiertos de vasta eternidad desde la Gran Explosión— veremos que, en todos estos casos, es probable

que nuestras intuiciones, basadas en la experiencia de la vida cotidiana, sean sumamente erróneas. Por sí mismas, las grandes cifras significan poco para nosotros. Hay una sola manera de superar este inconveniente, tan natural a nuestra condición humana. Hemos de calcular y recalcular, aun cuando sólo sea aproximadamente, verificar y re verificar nuestras impresiones iniciales, hasta que lentamente, con tiempo y dedicación constante, el mundo real, el mundo de lo inmensamente pequeño y lo inmensamente grande se nos haga familiar, tanto como la simple cuna de nuestra común experiencia terrestre.

II. EL ESCENARIO CÓSMICO

AHORA QUE nos hemos familiarizado con las magnitudes de que trataremos, grandes y pequeñas, para el espacio y el tiempo, debemos esbozar lo que sabemos sobre el origen del universo, junto con la formación de las galaxias y las estrellas y, finalmente, sobre los planetas que constituyen nuestro Sistema Solar, de modo que podamos describir en líneas generales las condiciones en que se originó la vida, en la Tierra o en algún otro lugar del cosmos.

Si resulta difícil averiguar cuál fue el origen de la vida, en razón de haber sucedido hace tanto tiempo, cabría pensar que el origen del universo, que tuvo que haber ocurrido mucho antes, sería aún más difícil. Esto no es del todo cierto, pues las interacciones necesarias para dar comienzo a un sistema vivo constituyen un pequeño e intrincado subconjunto de muchas otras posibles interacciones en un ambiente muy heterogéneo, mientras que durante las primeras etapas del *Big Bang* todo estaba tan íntimamente unido que fueron los grandes lineamientos de las reacciones los que en gran parte dominaron el proceso. Por lo tanto, resulta más fácil enfrentarse a ellas.

Casi todas las discusiones recientes sobre el origen del universo se basan en la teoría de la Gran Explosión. Esta teoría supone que en la primera fase, acerca de la cual podemos pensar útilmente, la totalidad de la sustancia del universo podría haber ocupado un volumen bastante pequeño a una temperatura inmensamente elevada. Este primigenio meteoro se expandió con muchísima rapidez, al mismo tiempo que se enfriaba. Steven Weinberg ha escrito un libro excelente, en el que esboza para el lector común la clase de reacciones que con toda probabilidad ocurrieron en los primeros tres minutos.¹

El cuadro está formado a partir de nuestros conocimientos actuales sobre las partículas fundamentales de la materia y la radiación, junto con un número bastante pequeño de hechos experimentales, como el fondo de la radiación cósmica que ahora se esparce por todo el espacio: el débil susurro de la Creación apenas audible en los radiotelescopios. Esta síntesis imaginativa no es forzosamente segura por completo. Weinberg confiesa algún ocasional sentimiento de irrealidad al escribir sobre el tema. Los demás hechos importantes observables necesarios para elaborar la teoría son la expansión del universo, demostrada por el famoso desplazamiento de la banda roja del espectro, y el enorme exceso en el actual universo de partículas de radiación electromagnética (fotones), en comparación con las partículas de materia (bariones) —la razón es de unas 10^9 (1 000 millones) a una— más la escasez relativa de los elementos más pesados. Aun en el universo de nuestros días, 99% de los átomos corresponde a los dos elementos más ligeros, hidrógeno y he-

¹ Steven Weinberg, *The First Three Minutes*, Nueva York, Basic Books, Inc., 1977.

lio, de los cuales el primero es el más común. De todos estos hechos, los físicos teóricos pueden inferir que tras la primera centésima de segundo (lo que es todavía más incierto) el meteoro fue una compleja mezcla de radiación y materia, interactuando de manera conjunta, de manera rápida y potente, a una temperatura inmensamente elevada —unos 10^{11}°F — y expandiéndose con extrema rapidez. La temperatura era tan excesivamente elevada para permitir la existencia de átomos, y aun tan alta que impedía la unión de núcleos complejos (los densos centros de los átomos). Al expandirse el meteoro, fue enfriándose, pasando en rápida sucesión a través de varias etapas, en las cuales, en virtud de que en cada una de ellas la temperatura era menor, ciertos procesos ocurrían cada vez menos y otros se hacían más comunes. Finalmente, pasados unos tres minutos, la temperatura había descendido al nivel de 10^9°F , de modo que pudieran formarse ciertos núcleos ligeros, como los del tritio y el helio, y mantenerse íntegros. Al cabo de media hora o algo así, la temperatura había descendido a $3 \times 10^8^{\circ}\text{F}$ (300 millones) —sólo 20 veces más elevada que la del interior del Sol—, y se detuvo la formación de nuevos núcleos. Durante casi un millón de años más el universo siguió expandiéndose y enfriándose, hasta hacer posible que los núcleos capturaran electrones para formar átomos estables. Pudo entonces la materia condensarse para formar estrellas y galaxias.

Debido a esta enorme explosión cósmica, el universo ha seguido expandiéndose desde entonces. El que continúe expandiéndose por tiempo indefinido o acabe por lentificarse hasta detenerse por completo y volver sobre sí mismo depende de su masa. Igual que una piedra lan-

zada al aire acabará cayendo a tierra, a menos que el lanzamiento haya sido hecho con tanta rapidez como para sustraerse por completo a la gravedad, así el universo seguirá expandiéndose a no ser que su masa sea tan grande que finalmente la gravedad detenga su expansión y comience un proceso de retracción. Si sucediera esto, en algún momento de un futuro remotísimo el universo se desplomaría en otro acontecimiento catastrófico. Solía pensarse que la densidad estimada del universo era tan pequeña que tal suceso sería imposible; la densidad crítica corresponde a unos tres átomos de hidrógeno por cada litro de espacio. Se sospecha que esas pequeñas partículas neutras, los neutrinos, que invaden todo el espacio y de las cuales se pensaba que, al igual que la luz, carecían de peso, tienen quizá una masa finita y muy pequeña. De ser así, habría las suficientes para impedir que el universo siguiera expandiéndose eternamente.

Quizá la conclusión más importante, desde nuestro limitado punto de vista, es que, en las primeras fases del universo, a pesar de ser tan altas su densidad y su temperatura, sólo se habrían formado en cantidades apreciables algunos de los elementos realmente muy ligeros. En consecuencia, con excepción del hidrógeno, todos los elementos esenciales para la vida, en particular carbono, oxígeno, nitrógeno y fósforo, no habrían llegado aún a formarse. Confirman esta suposición las observaciones espectroscópicas, las cuales muestran que las estrellas más viejas poseen mucho menos de estos elementos que las jóvenes.

Después del primer millón de años, los detalles del cuadro se enturbian un poco. De qué manera el meteoro cada vez mayor, que se supone era espacialmente bastan-

te uniforme, se expandió aún más para formar las grandes y heterogéneas concreciones de materia que llamamos galaxias, y exactamente cómo se formaron las varias clases de estrellas, son cuestiones que no han sido todavía resueltas en detalle, aunque podemos vislumbrar algunos de los procesos en líneas generales.

Si bien la gravedad tuvo exigua participación en las primeras fases de la formación del universo, ha comenzado a asumir una función más dominante. En términos generales, vemos que, debido a la gravedad, es probable que la materia haya formado conglomerados, los cuales, a su vez, atraerán otros conglomerados, hasta formar otros cada vez más grandes. Los resultados implicados en esta unión y condensación elevarán la temperatura local hasta calentar la masa tanto que la volverán luminosa. Por último, los enormes conglomerados de materia alcanzarán tan elevada temperatura que se iniciarán reacciones nucleares; se habrá formado una estrella.

A partir de entonces, el calor generado por la fusión nuclear impedirá que la estrella se desintegre, pues si tal proceso se iniciara, la estrella se calentaría aún más, se acelerarían las reacciones nucleares y el consiguiente aumento de la presión haría que la estrella se dilatara un poco para corregir la incipiente desintegración. Este mecanismo obra como regulador que permite a la estrella "arder" uniformemente durante millones o aun miles de millones de años.

A la larga, la estrella agotará su combustible nuclear. Se ha calculado que las estrellas gigantes arden con gran rapidez, las de tamaño medio (como nuestro Sol) más lentamente y, sin duda, las de pequeño tamaño con gran lentitud. Una estrella cuya masa sea 10 veces mayor que

la de nuestro Sol agotará su combustible con rapidez 100 veces mayor que éste. Lo que sucede cuando el combustible nuclear comienza a agotarse es algo muy complicado y depende en gran parte de cuán grande sea la masa de la estrella. El proceso de fusión nuclear puede producir elementos tales como carbono y nitrógeno a partir del hidrógeno o del helio. En tal caso, es posible que la estrella aproveche esos elementos más pesados como combustible para producir otros todavía más pesados, pero por fin habrá de llegar a un estado en que ya no queden elementos cuya transmutación pueda generar suficiente energía. Alcanzado este punto, la fuerza de gravedad, que todo lo abarca, contenida hasta entonces en virtud del calor generado por el proceso nuclear, predominaría y, en consecuencia, la estrella iniciaría su desintegración. El modo exacto en que esto ocurra dependerá de nuevo del tamaño de la estrella y de la naturaleza de sus componentes. Quizá las estrellas más pequeñas acabarán por convertirse en estrellas enanas y con muchísima lentitud irán perdiéndose de vista. Para las estrellas más grandes, la retracción puede ser tan rápida que las haga estallar literalmente, dispersando en el espacio tanto como la mitad de su masa y lanzando materia en todas direcciones a muy alta velocidad. Muchos de los elementos más pesados que el hierro (que no abundan mucho) se producen en el acto mismo de la explosión.

A tan catastrófica explosión se le llama supernova. En cosa de días, la estrella fulge con extraordinario brillo. Cuando una estrella de nuestra galaxia experimentó tal fenómeno, en el año 1604, causó sensación. Todavía nos es posible percibir los residuos de una supernova anterior vista por los astrónomos chinos en 1054. Esta gran

nube de gas luminoso, a la que llamamos nebulosa del Cangrejo, todavía se halla en rápida expansión, y es posible aún ver los restos de la estrella, ahora una pulsar (estrella giratoria de neutrones) en su centro.

Explosiones semejantes a éstas fueron la principal fuente de la mayor parte de los elementos de nuestro cuerpo (con excepción del hidrógeno). Produce una extraña sensación el darse cuenta de que muchos de los átomos de los que nuestro cuerpo está formado no nacieron al comienzo de las cosas, sino que debieron de ser cocinados dentro de una estrella y dispersados en el espacio.

Entonces, ¿cómo se formaron los planetas? Este tema se trata con algo más de detalle en el capítulo VIII. Aquí solamente esbozaremos el fondo. Al escrutar con nuestros telescopios las complejidades de nuestra galaxia vemos que gran parte de ella está oscurecida por grandes nubes de gas y polvo, muy difusas algunas, otras menos, pero todas muy tenues juzgadas por las normas terrestres. Las partículas de polvo, algunas del mismo tamaño que las del humo de un cigarrillo, están quizá constituidas por minúsculos trocitos de hierro, roca, hielo y compuestos del carbono, mezclados unos con otros. Es bastante sorprendente el que se hayan descubierto más de cincuenta especies de pequeñas moléculas orgánicas flotantes en estas nubes de gas, sobre todo en las más densas (en las que hay poco peligro de que las dañen los rayos ultravioleta), aunque en masa su número total es sólo de uno por un millón. Son moléculas químicamente reactivas, como el cianuro de hidrógeno (ácido cianhídrico = HCN) y el formaldehído (aldehído fórmico = HCOH). No se sabe qué participación tuvo esta vasta cantidad de muy diluidas moléculas, diseminadas en el espa-

cio en el origen de la vida, pero es improbable que su función haya sido importante. Las pequeñas moléculas que constituyen la base de la vida (véanse los capítulos III y V) —los aminoácidos, los azúcares, las bases, etc.— no se han descubierto en el espacio, aun cuando en realidad algunas de ellas podrían fácilmente haberse sintetizado a partir de las que se encuentran en él. Se conjetura un poco acerca de las reacciones que pueden haber ocurrido en los cometas y otros pequeños cuerpos del Sistema Solar.

Se supone que nuestro Sol y sus planetas se formaron por la condensación, causada por la gravedad, de una nube giratoria de la especie mencionada. No se sabe exactamente cómo ha sucedido esto y todavía es motivo de controversia. Hablando en términos aproximados, cabría decir que, a medida que la nube se iba retrayendo, aumentaba la velocidad de rotación (para conservar el momento angular) hasta convertirla en un disco. Finalmente, el centro de este disco vino a constituirse en el Sol, mientras que los restantes fragmentos de materia se condensaron para formar los planetas y los asteroides. El proceso se trata con mayor amplitud en el capítulo VIII.

Gran parte de la nube en cuestión debió de haber consistido en hidrógeno y helio, pues son éstos los elementos más abundantes en el Sol; pero un planeta como la Tierra está demasiado próximo a él y carece de la suficiente masa para retener elementos tan ligeros por acción de su relativamente débil campo gravitacional, por lo que se supone que dichos gases se perdieron en el espacio. (Los grandes planetas exteriores todavía conservan buena parte de ellos.) Nuestro planeta, con su núcleo central de hierro y su sólida cubierta de elementos más

ligeros cerca de su superficie, se constituyó con la ceniza acumulada de estrellas primitivas. La biosfera en que vivimos es una delgada capa de materia sobre la superficie de un planeta muy pequeño que gira en torno de una estrella bastante ordinaria.

El punto más importante que puede surgir de este breve esbozo es que la vida, tal como la conocemos, es probable que no haya aparecido poco después de la Gran Explosión por cuanto los elementos que la constituyen todavía no existían. Fue necesario un periodo de 1 000 millones o 2 000 millones de años, y tal vez más, antes de que estrellas suficientemente grandes recorrieran su ciclo vital y estallaran y así proporcionaran los átomos requeridos para que surgiera la vida orgánica. Después, éstos habrían de ser recogidos para formar nuevas estrellas y planetas a partir de los residuos. Desgraciadamente no sabemos con exactitud cuán fácil es este proceso, de modo que no cabe fiarse, basados en razones teóricas, de cuál es el número de estrellas que probablemente tengan planetas girando en torno suyo, aun cuando, como veremos en el capítulo VIII, hay algunas pruebas indirectas sobre este punto.

Ahora resumamos las magnitudes y tiempos que nos interesan. El diámetro del Sistema Solar mide más o menos un quinzavo de año luz. La estrella más próxima a nuestro planeta se halla a 4.3 años luz. Hay como un centenar de estrellas en un espacio de veinte años luz. Nuestra galaxia es un disco irregular que gira lentamente, formado de estrellas, polvo y gas, que mide unos 100 000 años luz de un extremo a otro y contiene quizá unas 10^{11} estrellas. La galaxia grande más próxima es la de Andrómeda, algo mayor que la nuestra. La separa de ésta una

distancia aproximada de dos millones de años luz y, aparte de fotones y neutrinos, es muy poco lo que hay entre una y otra, si bien existen algunas galaxias más pequeñas en los alrededores. Más allá de este sistema, el universo se extiende en todas direcciones a una distancia no menor de 3 000 millones de años luz, y contiene en total quizá unas 10^{11} galaxias de diversos tipos y magnitudes.

La edad de la Tierra y del resto del Sistema Solar es de unos 4 500 millones de años. El tiempo que haya transcurrido desde el *Big Bang* se conoce con menos precisión, pero probablemente es de entre 7 000 y 15 000 millones de años. En realidad, poco después de la Gran Explosión no existía ninguno de los elementos más pesados, pero unos 1 000 millones de años más tarde ya había considerable cantidad de ellos.

III. LA UNIFORMIDAD DE LA BIOQUÍMICA

EN EL fondo, el problema del origen de la vida es un problema de química orgánica, es decir, la química de los compuestos del carbono, pero de la química orgánica en un inusitado marco de referencia. Como veremos, los seres vivos están especificados en detalle en el nivel de átomos y moléculas, con increíble delicadeza y precisión. Al principio debió de haber habido moléculas que evolucionaron para formar el primer sistema vivo. Como la vida comenzó en la Tierra hace tanto tiempo—quizá 4000 millones de años— nos resulta difícilísimo imaginar cómo eran los primeros seres vivos. Sin excepción alguna, todos los seres que viven en nuestro planeta son producto de la química orgánica, y los compuestos orgánicos no suelen permanecer estables por largo tiempo dentro de los límites de las temperaturas que prevalecen en la superficie terrestre. El constante azote del mecanismo térmico a lo largo de cientos de millones de años acaba por disgregar los más fuertes enlaces químicos que mantienen a los átomos de las moléculas orgánicas firmemente unidos durante espacios de tiempo más cortos, por ejemplo: la duración de la vida humana. Por

esta razón es casi imposible hallar "fósiles moleculares" de los tiempos muy tempranos.

Los minerales pueden ser mucho más estables, por lo menos en una escala un poco más burda, sobre todo porque sus átomos están unidos por fuertes enlaces para formar estructuras tridimensionales regulares. La rotura de un solo enlace no trastorna mucho la estructura del mineral. Se hallan fósiles en abundancia en rocas depositadas hace poco más de 500 millones de años, en un tiempo en que los organismos habían evolucionado ya lo suficiente para formar partes duras. Por lo regular, tales fósiles no están constituidos por la misma materia de la que estaban hechos los organismos de los que provienen, sino que están formados por depósitos minerales que los infiltraron y tomaron su forma. La forma de las partes blandas casi siempre se perdió, aunque en ocasiones aparecen vestigios conservados como carcomas: huellas en las rocas del tiempo.

¿Existen fósiles muy anteriores a éstos? El minucioso examen microscópico de rocas muy primitivas ha demostrado la presencia en ellas de pequeñas estructuras que parecen vestigios fosilizados de organismos muy sencillos, muy semejantes a algunos de los organismos unicelulares de hoy día. Esto tiene sentido común. En el proceso de la evolución se podría esperar que los organismos multicelulares se desarrollaran a partir de seres unicelulares. Aunque sigue habiendo cierta controversia respecto a los detalles, los más antiguos organismos de este tipo deben de haber vivido hace 2 500 millones a 3 500 millones de años. La edad de la Tierra es de unos 4 500 millones de años. Una vez pasada la confusión inicial de su formación, transcurrió un periodo como de

unos mil millones de años durante el cual pudo haber evolucionado la vida a partir de la compleja composición química de la superficie de nuestro planeta, especialmente en sus océanos, lagos y pantanos. De este periodo no se ha hallado registro fósil alguno, pues no se han encontrado todavía porciones conservadas de las rocas sedimentarias de entonces.

Sólo tenemos dos caminos para abordar este problema. Podemos intentar simular las primitivas condiciones en el laboratorio. Como quizá la vida es resultado de un feliz accidente que, aun en el extenso laboratorio de la superficie del planeta es probable que tardara muchos millones de años en ocurrir, no debe sorprender demasiado el que tal investigación no haya llegado todavía muy lejos, aunque algún progreso se ha realizado. Por otro lado, podemos examinar minuciosamente todos los seres vivos que existen. Como todos descienden de algunos de los primeros organismos sencillos, cabe esperar que sean todavía portadores de algún vestigio de los seres vivos más primitivos.

A primera vista esa esperanza parece absurda. ¿Qué es lo que haría posible unir el lirio con la jirafa? ¿Qué puede compartir el hombre con las bacterias de su intestino? Un cínico podría preguntarse si, debido a que los seres vivos comen a otros o son comidos por otros, esto indica cuando menos algo común entre ellos. Lo notable de esto es que es cierto. La unidad de la bioquímica resulta muchísimo mayor de lo que se suponía hace apenas 100 años. La inmensa variedad de la naturaleza —hombre, animales, vegetales, microorganismos y aun virus— está constituida, en el nivel químico, de acuerdo con un plan básico común. Es la fantástica transformación de este

plan básico, en virtud de la evolución producida por la selección natural a lo largo de incontables generaciones, lo que nos hace difícil, en nuestra vida cotidiana, penetrar la forma externa y percibir la unidad interior. Pese a todas nuestras diferencias, todos los seres vivos utilizamos un solo lenguaje químico o, para ser más precisos, como después veremos, *dos* de tales lenguajes están íntimamente relacionados entre sí.

Para comprender la unidad de la bioquímica primero debemos aprender de un modo muy general qué reacciones químicas ocurren en un organismo. Podemos imaginar la célula viva como una factoría complejísima y bien organizada que toma un conjunto de moléculas orgánicas —su alimento—, las desintegra, si es necesario, en unidades más pequeñas y después reordena y recombina estas unidades más pequeñas, a menudo en varios pasos discretos, para sintetizar muchas otras pequeñas moléculas, algunas de las cuales excreta, mientras otras las utiliza para síntesis posteriores. En particular, ensarta conjuntos especiales de estas pequeñas moléculas para formar largas cadenas, por lo regular no ramificadas, y construir así las macromoléculas de la célula, las tres grandes familias de moléculas gigantes: ácidos nucleicos, proteínas y polisacáridos.

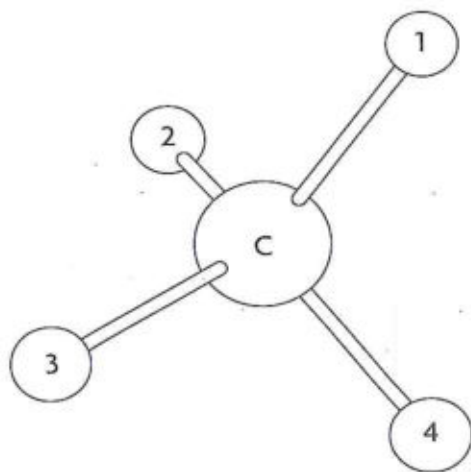
El primer nivel de organización que habremos de tomar en consideración es el más bajo de todos: aquel en el que se enlazan átomos entre sí para formar pequeñas moléculas. Ahora bien, un simple átomo es un objeto bastante simétrico. Su forma es más o menos esférica y si lo viéramos reflejado en un espejo nos parecería exactamente igual, lo mismo que ocurriría con una bola de billar. Estructuras más complicadas pueden tener una si-

metría espectacular: nuestras manos son buen ejemplo de ella. Si observamos una mano derecha reflejada en un espejo, veremos una mano izquierda, y viceversa. Podemos poner enfrentadas nuestras manos, como si orásemos, pero es como si sostuviéramos un espejo entre ellas. No hay manera de colocar una sobre otra en exacta coincidencia, ni siquiera en nuestra imaginación.

Algunas moléculas orgánicas sencillas, como el alcohol, no ofrecen esta simetría especular; tales moléculas son idénticas a sus imágenes especulares. Pero esto no sucede con la mayor parte de las moléculas orgánicas. La molécula del azúcar común, si se observa reflejada en un espejo, aparecerá como un conjunto de átomos unidos en forma muy diferente. Esta diferencia no importa en *ninguna* clase de reacción química. Si pudiéramos calentar una de estas moléculas y observar cómo crece la vibración molecular hasta romperse uno de los enlaces, veríamos, si hubiéramos tenido en mente la imagen especular de este proceso, que los movimientos relativos de todos los átomos fueron idénticos. Las reacciones básicas de la química son simétricas según la reflexión hasta un grado muy alto de aproximación. La diferencia en la simetría especular sólo adquiere importancia cuando dos moléculas han de unirse entre sí. Podríamos observar esto en la confección de un guante. Todos los componentes del guante —la tela, la costura, incluso los botones— vistos individualmente son simétricos, pero pueden unirse de dos maneras parecidas aunque distintas, según se vaya a confeccionar el guante para la mano derecha o para la mano izquierda. Es claro que necesitamos las dos formas, pues tenemos dos clases de manos: un buen guante izquierdo no encajaría en forma adecuada en la mano derecha.

La forma más sencilla de molécula asimétrica de este tipo resulta cuando un solo átomo de carbono se une por medio de sencillos enlaces a otros cuatro átomos o grupos de átomos *diferentes*. Esto es así porque los cuatro enlaces del átomo de carbono se hallan en distinto plano, pero todos están igualmente espaciados en tres dimensiones, apuntando aproximadamente hacia los vértices de un tetraedro regular.

Así, las moléculas orgánicas —moléculas que contienen átomos de carbono— a menudo ejercen influencia aunque sean pequeñas, pero todavía tenemos que explicar por qué esto tiene importancia en una célula. La razón fundamental es que las moléculas bioquímicas no existen en aislamiento, sino que reaccionan unas con otras. Casi todas las reacciones bioquímicas son aceleradas por un catalizador específico. Para reaccionar de esta manera, una molécula pequeña ha de adaptarse a la su-

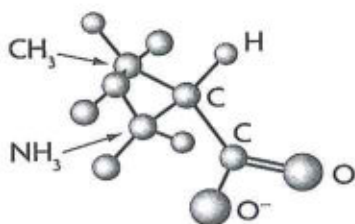


Distribución en el espacio de los cuatro enlaces de un sencillo átomo de carbono.

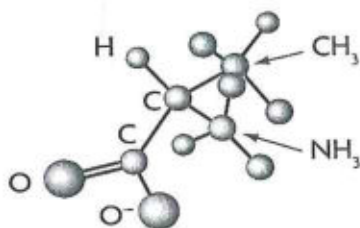
perficie del catalizador, y como la molécula pequeña interviene, la del catalizador ha de hacerlo también. Como en el caso del guante, la reacción no se efectuará como es debido si tratamos de adaptar una molécula de polaridad derecha a una cavidad de polaridad izquierda.

Imagínese que es posible observar esta minúscula factoría química durante su funcionamiento y ver todas las numerosas reacciones mientras se efectúan, con moléculas desplazándose rápidamente de un lugar a otro y encajando en las diversas moléculas catalíticas y romperse, reformarse o reagruparse y reaccionar en muy diferentes formas. Imagínese ahora que se observa una factoría que es la exacta imagen especular de la anterior. Todo sucederá igual que en esta última; pues las leyes de la química son idénticas sin importar la polaridad. La dificultad se presentaría únicamente si tratáramos de combinar las dos, utilizando algunos componentes de un sistema mezclados con otros del mundo reflejo.

Se ve así porque, en un organismo sencillo, la actividad de las muchas moléculas asimétricas, grandes o pequeñas, debe ser concordante. Además, es un hecho experimental el que las moléculas asimétricas de un lado de nuestro cuerpo tienen exactamente la misma influencia que las del otro lado. Pero ¿no podrían existir dos tipos distintos de organismos, uno de ellos fiel imagen del otro, al menos por lo que respecta a sus componentes? Esto no se ha observado jamás. En la naturaleza no existen dos reinos separados, cada uno de ellos con moléculas de lateral opuesto al de las moléculas del otro. La glucosa tiene la misma función en todo ser vivo. Y más significativamente: las pequeñas moléculas que unidas entre sí forman las proteínas —los aminoácidos— todas



l- (S)-Alanina



d- (R)-Alanina

Dos formas del aminoácido alanina. Una de ellas es la imagen especular de la otra. Las figuras superiores utilizan modelos de espacios ocupados; las inferiores, modelos de esfera y rayo. Las letras indican los átomos. La forma de alanina hallada en las proteínas es l-alanina, la de la izquierda.

son *l*-aminoácidos (sus imágenes especulares son los *d*-aminoácidos: *l* = levógiro, *d* = dextrógiro), y los azúcares de los ácidos nucleicos también tienen la misma estructura. El primer gran principio unificador de la bioquímica es que las moléculas clave tienen todas igual función en todos los organismos.

Hay muchos otros rasgos bioquímicos que son asombrosamente semejantes en todas las células. Los caminos metabólicos reales —la manera exacta en que una molé-

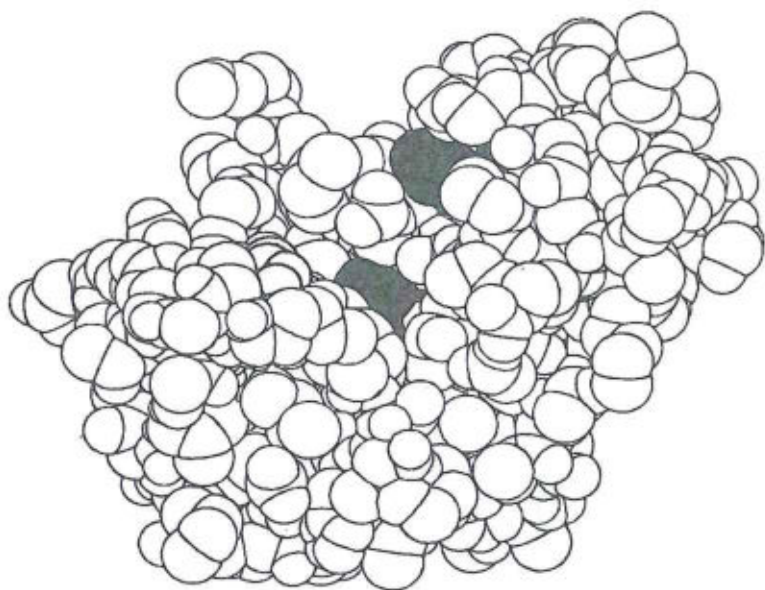
cula pequeña se convierte en otra— suelen ser similares en grado notable, aunque no siempre idénticos. Así son algunos de los caracteres estructurales, pero la uniformidad es aún más notable en los niveles más profundos de organización; notable porque es a la vez arbitraria y completa.

Gran parte de la estructura y del aparato metabólico de la célula se basa en una familia de moléculas, las proteínas. La molécula de una proteína es una macromolécula que contiene a veces varios millares de átomos. Cada proteína está exactamente constituida, con cada uno de sus átomos en el lugar correcto. Cada tipo de proteína forma una intrincada estructura tridimensional, peculiar en sí misma, que le permite realizar su propia función estructural o catalítica. Esta estructura tridimensional está formada por el repliegue de otra unidimensional, cuyos componentes son una o más cadenas de polipéptidos, como se denominan. La secuencia de los átomos a lo largo de esta espina dorsal consiste en una pauta de seis átomos que se repite una y otra vez. La variedad depende de las pequeñísimas cadenas laterales que de ella salen, que se repiten a intervalos. Una columna vertebral típica tiene varios centenares de ellas.

De modo sorprendente, el mecanismo sintetizador de la célula forma estas cadenas de polipéptidos uniendo, extremo con extremo, un conjunto particular de moléculas pequeñas: los aminoácidos. Éstos son todos iguales en uno de sus extremos —la parte que forma el segmento repetido de la espina dorsal— pero diferentes en el otro, la parte que forma las pequeñas cadenas laterales. Lo que sorprende es que sean sólo 20 los aminoácidos que forman las proteínas y que este conjunto de 20 sea

exactamente el mismo en todos los organismos vivos. Sin embargo, existen muchos otros aminoácidos, y varios de ellos pueden encontrarse en otra célula. No obstante, sólo este particular conjunto de 20 aminoácidos utiliza la célula para sintetizar las proteínas.

Una proteína podría equipararse con una frase de un lenguaje que sólo contara con 20 letras para su escritura; la exacta naturaleza de una proteína estaría determinada por el orden exacto en que cada letra estuviere colocada. Con una excepción: esta escritura nunca varía. Animales, vegetales, microorganismos y virus usan todos el mismo conjunto de 20 letras, aunque puede decirse que



Modelo atómico de una pequeña proteína, la enzima ribonucleasa S. Los átomos sombreados forman parte del lugar reactivo de la enzima. Casi siempre la proteína está rodeada completamente por moléculas de agua.

otras letras semejantes podrían fácilmente haber sido utilizadas, como podrían haberse empleado otros símbolos para formar nuestro alfabeto. Algunas de estas "letras" químicas fueron escogidas seguramente porque son pequeñas y fáciles de obtener; la elección de otras es menos clara. Si todo texto impreso en el mundo usara de manera exacta el mismo arbitrario conjunto de letras (lo que, como es sabido, dista de ser el caso), llegaríamos a la conclusión razonable de que todo lo universalmente escrito quizá tuvo su origen en el mismo lugar y se perpetuó mediante copias constantes. Sería difícil no llegar a la misma conclusión en cuanto a los aminoácidos. El conjunto de 20 es tan universal que su elección debe datarse en forma retrospectiva en un tiempo muy próximo al comienzo de todos los seres vivos.

La naturaleza emplea también un segundo lenguaje químico muy diferente, pero que es asimismo muy uniforme. La información genética de todo organismo es conducida por una de dos familias íntimamente relacionadas de cadenas de moléculas gigantes, los ácidos nucleicos, ADN y ARN, que son descritos con más detalle en el capítulo v. Cada molécula posee una columna vertebral inmensamente larga con una estructura regular repetitiva. De nuevo, a intervalos regulares van añadidos grupos laterales, pero en este caso pertenecen solamente a cuatro tipos; el lenguaje genético sólo utiliza cuatro letras. Un característico virus pequeño, como el de la poliomielitis, mide unas 5 000 letras de longitud. El mensajero genético de una célula bacteriana suele constar de unos cuantos millones de letras; el del hombre, de varios millones de millones, condensado en el centro de cada una de nuestras muchas células.

Uno de los mayores descubrimientos de la biología en la década de 1960 fue el desciframiento del código genético, el pequeño diccionario (semejante en principio a la clave Morse) que relaciona el lenguaje de cuatro letras del material genético con las 20 letras del lenguaje proteínico, el lenguaje ejecutivo. Se describe detalladamente en el apéndice.

Para traducir el mensaje genético contenido en cierta porción de ácido nucleico, el mecanismo bioquímico lee la secuencia de grupos laterales en grupos de tres, comenzando por algún punto fijo. Como el lenguaje del ácido nucleico consta de cuatro letras distintas, son posibles 64 tripletas ($4 \times 4 \times 4$), que se denominan codones. Sesenta y uno de estos codones representan uno y otro aminoácido. Las otras tres tripletas representan la "cadena final" (la señal para la "cadena inicial" es algo complicada).

La naturaleza exacta del código genético es tan importante para la biología como la tabla periódica de los elementos de Mendeleiev lo es para la química, pero con una diferencia importante. La tabla periódica de los elementos sería la misma en cualquier lugar del universo, mientras que el código genético parece ser bastante arbitrario o, al menos, lo es en parte. Se ha intentado muchas veces deducir la relación entre los dos lenguajes de principios químicos, pero se ha fracasado. El código presenta unos cuantos rasgos regulares, pero podrían deberse a la casualidad.

Aunque existiera en otro lugar una forma de vida distinta por completo basada en los ácidos nucleicos y las proteínas, no veo ninguna razón para que el código genético sea exactamente el mismo allí que aquí. (En for-

ma incidente, la clave Morse no es arbitraria por entero; a las letras más comunes, como la *e* y la *t* [en la lengua inglesa], se les dio el menor número de puntos y rayas.) Si esta apariencia de arbitrariedad en el código genético se sostiene, sólo podremos concluir, una vez más, que toda la vida en la Tierra proviene de una población muy primitiva que primero lo usó para controlar la información química que va del lenguaje del ácido nucleico al de las proteínas.

Así, todos los seres vivos utilizan el mismo lenguaje de cuatro letras para transportar la información genética. Todos usan el mismo lenguaje de 20 letras para elaborar sus proteínas, y todos emplean el mismo diccionario químico para traducir de un lenguaje al otro. Tan asombroso grado de uniformidad apenas se sospechaba hace apenas 40 años, cuando todavía no me había graduado. Me parece curioso síntoma de nuestra época que los que obtienen gran satisfacción meditando sobre su unión con la naturaleza suelen ser bastante ignorantes de esa misma unión que ellos tratan de examinar. Quizá exista ya en California una iglesia en la que todos los domingos por la mañana se lea el código genético, aunque dudo que alguno de los presentes considere muy alentador tan austero recital.

Vemos, pues, que una de las formas de enfocar el origen de la vida es tratar de imaginar cómo surgió esta notable uniformidad. Casi todas las teorías e investigaciones experimentales modernas sobre el origen de la vida toman como punto de partida la síntesis del ácido nucleico, de la proteína o de ambos. ¿Cómo podría la Tierra primitiva (si en verdad la vida principió en ella) haber producido las primeras macromoléculas adecuadas? He-

mos visto que estas cadenas moleculares están formadas por la unión de pequeñas subunidades en sus extremos. ¿Cómo pudieron sintetizarse las moléculas pequeñas en las primigenias condiciones prebióticas? Y ¿cómo decidiríamos, aun si hubiéramos presenciado en detalle toda la operación en el átomo, cuándo el sistema mereció ser llamado "vivo" por primera vez? Para enfrentarnos a este problema examinaremos a continuación qué atributos cabría esperar que poseyera *cualquier* sistema de vida.

IV. LA NATURALEZA GENERAL DE LA VIDA

NO ES fácil dar una definición condensada de “vida” o de “vivo”. En efecto, “vivo” no significa por fuerza pensar o sentir, pues, para el biólogo, las plantas están, sin duda, vivas, y pocas personas —aparte de unos cuantos individuos crédulos y sin preparación científica— creen que las plantas piensan y sienten como nosotros y otros animales. Las bacterias —y cuán poco deben sentir, aunque sean capaces de “oler” moléculas de alimento y nadar hacia ellas— debemos sin duda considerarlas vivas. Más difícil es el caso de los virus. Con ellos llegamos casi a la frontera entre lo vivo y lo no vivo. Quizá la mejor vía de acceso al problema sea describir lo que sabemos acerca de los procesos fundamentales de la vida, separando una tras otra las capas de la cebolla hasta que quede poco o nada y después generalizar lo que hemos descubierto.

Cuando hacemos esto, no podemos evitar sorprendernos por el altísimo grado de *complejidad organizada* que descubrimos en cada nivel y, sobre todo, en el nivel molecular, pues tenemos toda la razón para creer que las estructuras fácilmente visibles a simple vista, lo mismo que las que sólo son perceptibles con el microscopio, están

construidas gracias a las intrincadas interacciones de sus componentes moleculares. ¿Cuán complicadas son estas macromoléculas y, exactamente, cómo se han formado?

El ejemplo más notable de estructura molecular hallada en organismos vivos es sin duda el de la familia de las proteínas. Aun una proteína hasta cierto punto sencilla puede contener hasta 2 000 átomos, formando una estructura tridimensional muy precisa, con cada átomo en el lugar adecuado, excepto cuando lo perturba el constante choque causado por la agitación térmica.

Por lo demás, esta compleja estructura tridimensional es indispensable para su función. Si esta molécula se calienta en solución acuosa, en muchos casos la elevada temperatura aflojará, primero, y romperá, después, los débiles enlaces que mantienen a la cadena subyacente en su plegadura correcta, de modo que su estructura queda revuelta y desorganizada. Ya no tendrá las adecuadas cavidades, con los grupos químicos apropiados, en su superficie, y en consecuencia será incapaz de cumplir su función original. Si la solución contiene también otras moléculas proteínicas en tal estado desorganizado, pueden adherirse unas a otras y coagular, de modo que, aunque se enfríe la solución, la enmarañada masa ya no puede desenredarse. Hiérvase un huevo y la espesa suspensión de proteínas se mezclará por completo, haciendo automáticamente firme lo que antes fuera blando y fluido.

A primera vista, parecería tarea muy difícil hacer una copia fiel de la estructura tridimensional intacta de una proteína en su organizada plegadura original. Uno puede concebir fabricar un molde molecular de la superficie, como se hace con una escultura, pero ¿cómo se podría copiar el interior de una molécula? La naturaleza ha

resuelto este problema mediante un ingenioso ardid. Se sintetiza la cadena de polipéptidos como una larga estructura unidimensional, la cual, después, *se pliega por sí misma*. El proceso de plegamiento lo dirige la pauta precisa de las cadenas laterales, que interactúan entre sí y con la espina dorsal por medio de múltiples y débiles interacciones. La molécula explora las constantes oportunidades ofrecidas por el movimiento térmico hasta que, por ensayo y error, descubre el mejor pliegue. Después, las diferentes partes de la molécula se deslizan con orden y se unen entre sí, tan bien unidas que un ulterior movimiento térmico deja la molécula un tanto inalterada.

Para producir este milagro de construcción molecular, todo lo que la célula necesita hacer es unir una con otra las hileras de aminoácidos (que formarán las cadenas de los polipéptidos) *en correcto orden*. Es un complicado proceso bioquímico, una banda de ensamble molecular, que sigue las instrucciones contenidas en una cinta de ácido nucleico (el llamado ARN mensajero) que se describirá esquemáticamente en el capítulo v. Aquí bastará preguntar cuántas proteínas puede haber. Si se elige al azar una determinada secuencia de aminoácidos, ¿cuán raro será este acontecimiento?

Es un ejercicio fácil combinatorio. Supongamos que la cadena tiene una longitud aproximada de 200 aminoácidos. Esta cadena será mucho menor que la longitud media de las proteínas de todos los tipos. Como en cada lugar tenemos el número total de 20 posibilidades, ésta será de 20 multiplicado por sí mismo 200 veces. Este número puede escribirse convenientemente en la forma de 20^{200} y es más o menos igual a 10^{260} , es decir, un uno seguido de 260 ceros.

Este número está fuera de nuestra capacidad ordinaria de comprensión. Con fines de comparación, consideremos el número de partículas fundamentales (átomos, hablando en términos generales) que hay en el universo entero; no sólo en nuestra galaxia, que no pasa de 10^{11} estrellas, sino en todos los miles de millones de galaxias, fuera de los límites del espacio observable. Este número, calculado en 10^{80} , es insignificante por completo en comparación con 10^{260} . Además, sólo hemos considerado una cadena polipeptídica de longitud bastante modesta. Si hubiéramos considerado también otras más largas, la cifra hubiera sido aún más inmensa. Es factible demostrar que, desde que la vida comenzó en nuestro planeta, el número diferente de cadenas polipeptídicas que podrían haberse sintetizado durante tan largo tiempo sería sólo una minúscula fracción del número de las que podemos imaginar. La mayor parte de las secuencias posibles jamás fue sintetizada en ningún momento.

Estos cálculos sólo toman en consideración la secuencia del aminoácido y descuidan el hecho de que muchas secuencias quizá no se plegaron adecuadamente para formar una figura estable y compacta. No sabemos qué fracción de todas las secuencias posibles se plegaría, aunque se supone que es bastante pequeña.

Una amplia analogía esclarecería mejor este punto. Consideremos un párrafo escrito en inglés. Estaría compuesto por unos 30 símbolos (las letras y los signos de puntuación, sin contar las mayúsculas). Un párrafo típico tendría aproximadamente tantas letras como aminoácidos contiene una proteína común. Así, un cálculo semejante al indicado demostraría que el número de secuencias de letras sería análogamente inmenso. De he-

cho, hay una pequeña esperanza, que se desvanece cada vez más, de que ni aun 1000 millones de monos, en 1000 millones de máquinas de escribir durante un tiempo tan largo como la vida del universo, llegarían a escribir en forma correcta siquiera uno de los sonetos de Shakespeare. Casi todo lo que escribieran carecería por completo de sentido. Si nos preguntáramos qué *fracción* del número de los párrafos posibles tendría algún sentido, llegaríamos a la conclusión de que también sería *pequeñísima*. Sin embargo, el número de párrafos *significativos* tiene que ser muy grande, aunque carecemos de algún método para calcularlo. De igual manera, la cantidad posible de distintas proteínas compactas y estables tiene que ser muy grande.

Lo que hemos descubierto es que, aun en este nivel tan fundamental, existen estructuras complejas, de las cuales hay muchas reproducciones idénticas, es decir, que tienen complejidad organizada, y que no pueden haberse formado por puro azar. Desde este punto de vista, la vida es un suceso infinitamente raro y, sin embargo, vemos que prolifera en torno nuestro. ¿Cómo pueden ser comunes cosas tan raras?

Privado de sus muchas fascinadoras complejidades, el mecanismo básico es muy sencillo. Lo sugirieron Darwin y Wallace, cada uno de los cuales concibió la idea después de leer a Malthus. Por fuerza, los organismos vivos han de competir por el alimento, la pareja y el espacio vital, principalmente con otros miembros de su misma especie. Deben evitar los depredadores y otros peligros. Por todas estas razones, algunos dejarán prole más numerosa que otros, y son las características genéticas de tales reproductores las que pasarán de preferencia a las

generaciones sucesoras. En términos más técnicos, si un gen confiere a su poseedor mayor aptitud de "adaptación", es más probable encontrar dicho gen en la dotación genética de la siguiente generación. Ésta es la esencia de la selección natural. A primera vista casi parece una tautología; sin embargo, no son las palabras lo que importa sino los mecanismos subyacentes. ¿Podemos decir, en términos muy abstractos, cuáles han de ser éstos?

El primer requisito evidente concierne a la reproducción, a una reproducción muy precisa. Necesitamos portar considerable cantidad de información como instrucciones para formar la complejidad que caracteriza la vida y, a menos que esta información sea copiada con razonable exactitud, el mecanismo decaerá bajo el peso acumulado de los errores. Por otra parte, no es requisito la perfecta exactitud. Sin duda, no todas las reproducciones serán exactamente iguales. Muchos de los errores de la reproducción serán una desventaja, pero otros cuantos serán probablemente una mejora que permitirá al gen funcionar con mayor eficiencia. Necesitamos éstos para que obre la selección natural. Por lo tanto, necesitamos mutaciones, que es el nombre con que se denominan tales errores genéticos, pero no muchas. En la práctica, la proporción de errores necesarios es excepcionalmente baja, tan baja en realidad, que casi siempre la célula ha de tomar precauciones especiales para corregir la mayor parte de los errores, dejando tan sólo unos cuantos para producir la variedad necesaria, si es que la especie ha de mantenerse y evolucionar.

Importa señalar que el mecanismo duplicador también debe copiar las mutaciones. Los errores que no pueden copiarse no tienen uso, pues sólo servirán para hacer

que falle el sistema. De alguna manera hay que eliminarlos. Enfrentado a uno de tales errores, el sistema duplicador puede hacer caso omiso de él y colocar en su lugar al azar una de las letras tipo. Para que se efectúe la selección natural, no importa cuál sea la magnitud del error cometido en tanto el resultado final sea una alteración que pueda reproducirse fielmente en las generaciones sucesoras.

Duplicación y mutación son los dos requisitos esenciales. Se ha supuesto que un gen puede ser más o menos "apto". La más pequeña de las ventajas que puede tener es que pueda duplicarse con mayor rapidez o frecuencia que sus congéneres. Por lo regular, consigue este fin de manera más o menos directa. Podría dirigir la producción de un ARN mensajero que sirva de código para la síntesis de una proteína que posea alguna propiedad especial y conveniente que confiera al organismo portador de ésta alguna ventaja en el esfuerzo por producir más numerosa y mejor descendencia. En términos técnicos, un gen mejorado por lo común no cambia sólo el genotipo (grupo de genes de un organismo) sino también el fenotipo (en términos generales, las propiedades que presenta al ambiente). Esto suele basarse en las propiedades o abundancia de una o más proteínas, pues éstas determinan casi todas las actividades químicas del cuerpo, mientras que el ácido nucleico, sobre todo el ADN, hace muy poco, salvo duplicar y codificar las proteínas y ciertas moléculas estructurales del ARN.

Hay además un último requisito general. Se ha de evitar la "transalimentación". En general, no queremos que un organismo rival se beneficie con los productos de nuestros genes. Queremos que estos productos ayuden

exclusivamente a nuestros genes. Esto significa que se han de mantener un gen y sus productos unidos de alguna manera. En los niveles más inferiores esto se consigue en forma conveniente manteniendo los genes y casi todos sus productos en el mismo saco. Este saco se llama célula y está rodeado por una delgadísima membrana semipermeable que impide a la mayor parte de las moléculas del interior de la célula que salgan de ésta, a menos que haya buenas razones para que alguna necesite estar afuera. En la membrana se hallan puertas y bombas especiales que dejan penetrar en la célula alimento y otras moléculas del exterior o dejan salir productos de desecho y ciertas moléculas seleccionadas.

Con esto hemos esquematizado las principales demandas que actúan sobre el sistema informativo necesario para la vida, pero de ellas se originan requerimientos más inmediatos y mundanos. Como es necesario hacer copias de algunas moléculas, debe haber una buena provisión de materias primas. Salvo en casos muy especiales, estas sustancias químicas necesitarán ser transformadas en otras que tengan afinidad. En las células actuales cada uno de tales pasos suele ser catalizado por una proteína particular —una enzima— específica exclusivamente para cada una de las reacciones que ocurren. En el origen de la vida, la materia prima debió de haberse hallado sobre todo en forma de lista para su uso inmediato, pues en aquel tiempo sólo debió de haber habido unos cuantos catalizadores específicos que hicieran más apetecible el primitivo caldo, si es que los hubo.

Para efectuar una síntesis orgánica se necesita una provisión de energía, que debe ser energía *disponible*. La denominación técnica es *energía libre*, lo cual no implica

meramente obtenerla sin esfuerzo. (Esta denominación tiene un significado termodinámico muy preciso.) Así, el sistema no está en equilibrio, en el sentido estricto del término. Una analogía no muy rigurosa sería comparar un apacible estanque, cuyo equilibrio es estático, con una corriente fluvial que se mantiene constante en gran parte del trayecto. Un sistema vivo se asemeja al río. Materias y energía libre entran en él, mientras que productos de desecho y calor salen. En términos técnicos, es un sistema abierto. Sólo así es posible seguir produciendo las síntesis necesarias para obtener repetidas duplicaciones químicas.

Así pues, éstos son los requisitos básicos para la vida. El sistema debe ser capaz de reproducir directamente sus propias instrucciones y, de manera indirecta, toda la maquinaria necesaria para ejecutarlas. La duplicación del material genético debe ser muy exacta, pero en contadas ocasiones se producen mutaciones —errores que pueden copiarse con fidelidad—. Un gen y su “producto” han de mantenerse razonablemente juntos. El sistema será abierto y deberá tener abasto de materia prima y, de una u otra manera, un aprovisionamiento de energía libre.

Expresados en estos amplios términos, los requisitos no parecen demasiado exigentes, aunque, como veremos, son bastante difíciles de satisfacer si se parte de la nada. Lo que no es muy claro es la maravillosa capacidad de tales sistemas de mejorarse a sí mismos. Un proceso de duplicación que tenga unos cuantos errores, ¿a dónde podría conducir?

Lo primero que debemos aprender es la continua naturaleza del proceso. Para lograr algo importante, el sistema debe proseguir indefinidamente. Pero esto significa

que el número de copias ha de duplicarse en cada "generación". Casi todo el mundo sabe que esta serie de duplicaciones sucesivas conduce pronto a números inconcebibles. Recordemos el cuento de aquel sultán que, deseando recompensar a uno de sus súbditos, le preguntó qué le gustaría que le diera. El hombre (no sabemos si era astuto o ingenuo, sabio o ignorante; a los tiranos no suele gustarles pasar por tontos), según se cuenta, pidió algo que, a primera vista, podría parecer muy modesto. Señalando un tablero de ajedrez, pidió que se le diera un solo grano de trigo por el primer escaque, dos por el segundo, cuatro por el tercero, ocho por el cuarto, y así sucesivamente, siendo lo doble cada vez. Esto podría parecer bastante razonable si se recuerda que el tablero tiene 64 escaques. Un poco de álgebra elemental nos diría que el número de granos de trigo sería nada menos que 2^{64} , lo que es algo más que los 10^{19} , que corresponderían a unos 100 000 millones de toneladas. Con esta cantidad de granos se llenaría un cubo cuyos lados midieran unos seis kilómetros y medio cada uno. Después de todo, la petición no era tan modesta.

Si un sistema vivo siguiera duplicándose de esta manera, y demandara alimento en forma de materias primas y energía, pronto agotaría los recursos a su alcance. Así pues, en tiempo relativamente corto todos los individuos empezarían a disputarse el alimento. Con sólo un abasto constante de alimento y energía todo el sistema no podría continuar expandiéndose indefinidamente, sino que llegaría a un estado de equilibrio. Esto implica que en esta fase cada organismo dejará, *en promedio*, un solo sucesor en cada generación. Como algunos organismos se duplicarán, otros no se reproducirán, lo que puede ocu-

rrir al azar. Un individuo puede encontrar una reserva de alimento, mientras que otro que fuera menos afortunado podría morir de inanición. Sin embargo, si determinado organismo ha adquirido una mutación en uno de sus genes de modo que, por una u otra razón, puede competir más provechosamente y, en promedio, dejar más descendientes, aumentarán sus representantes en la población, y así, por la fuerza, los organismos menos favorecidos procrearán menos descendientes. Si este proceso continuara indefinidamente, los tipos menos favorecidos acabarían por extinguirse por completo, y el poseedor de un gen más eficiente lograría el predominio. Es importante observar que, por este simple proceso, *un raro acontecimiento casual se ha hecho común.*

No es necesario que el proceso ocurra una sola ocasión. Puede suceder una y otra vez, como cuando por casualidad se producen nuevas mutaciones favorables. Además, a una mejora puede añadirse otra hasta que, transcurrido suficiente tiempo, el proceso de la evolución produzca un organismo que se adapte muy bien a su ambiente. Para llegar a tal perfección, bastan las mutaciones producidas al azar. Parece no haber ningún mecanismo, y desde luego ningún mecanismo común, que *dirija* el cambio en el gen de modo que sólo se produzcan cambios favorables. Además, cabría argumentar que tal mecanismo dirigido resultaría a la larga demasiado rígido. Cuando las cosas se ponen difíciles, es necesaria una verdadera innovación —innovación cuyos rasgos importantes no pueden haber sido planeados de antemano— y para ello hemos de confiar en la casualidad. *El azar es la única fuente de verdadera innovación.*

Tanto es el poder de la selección natural que puede

actuar en todos los niveles. En particular, puede producir mejoramientos aun en el mecanismo de la selección —la reproducción sexual sería buen ejemplo de esto—. Si el ambiente —concepto que en sí mismo no es fácil definir con precisión— permanece estable, la selección natural tiende con frecuencia a ser conservadora y mantiene un conjunto de organismos endogámicos dentro de límites muy estrechos, pues, en sentido lato, ya se ha logrado la perfección, y cualquier mejora posterior necesitaría un suceso en extremo raro, pues todos los de índole moderadamente rara ya habrían sido ensayados para entonces. No obstante, si el ambiente se altera o si, en efecto, por una razón o por otra, algunos individuos han quedado aislados de los demás, podría trastornarse el equilibrio y, en tales circunstancias, la selección natural podría hacerse más creadora. Estas complejidades, que son de gran importancia para detallar la teoría de la evolución, no nos van a detener aquí, sobre todo porque lo más interesante para nuestro objeto es el origen de la vida, cuando los procesos aplicables tal vez serían bastante burdos. Lo que ahora importa es captar los amplios rasgos generales del proceso y darnos cuenta con claridad de cómo un conjunto tan simple de suposiciones puede conducirnos a resultados notables e inesperados.

Que sepamos, no existe ningún otro mecanismo en el que confiemos para producir con tanta eficiencia resultados comparables. Una posibilidad sería la herencia de los caracteres adquiridos. Esforzándose, una jirafa podría alargar su cuello y, de esta manera, alcanzar las más altas y tiernas hojas de los árboles. Cabría imaginar que tal estiramiento se transmitiera por herencia a los descendientes, que entonces tendrían cuellos más largos y

serían más aptos para la lucha por la existencia. Que yo sepa, no ha habido quien haya aducido razones teóricas *generales* de acuerdo con las cuales tal mecanismo debería ser menos eficiente que la selección natural, aun cuando cabría sospechar que sería menos flexible que ésta, especialmente cuando fuere necesaria una verdadera innovación para superar una crisis de evolución. En todo caso, exigiría un proceso mediante el cual la información contenida en células del soma (el cuerpo del animal o la planta) se transmitiera a las células germinales (el óvulo y los espermatozoides). Recientemente se ha sugerido la existencia de tal mecanismo, pero la prueba en su favor es complicada y, por ahora, bastante endeble. Es admisible suponer que la herencia de los caracteres adquiridos desempeña una parte muy pequeña en la evolución, pero es muy poco probable que tal parte resulte ser de importancia mayor.

¿Hay otros requisitos muy generales necesarios para un organismo vivo? Cualquier forma de vida que tenga interés para nosotros deberá ser por lo menos moderadamente complicada, y quizá deba serlo mucho. No sabemos de nada, en cualquier nivel de la estructura del universo, que produzca tal grado de complejidad debido a la naturaleza de las cosas. El único mecanismo conocido que pueda hacerlo es la selección natural, cuyos requisitos acabamos de esbozar.

Hemos visto que la selección natural implica almacenamiento y duplicación de gran cantidad de información. La única manera eficiente para hacerlo es utilizando el principio de combinación. Es decir, expresamos la información empleando sólo un pequeño número de tipos de unidades estándar, pero las combinamos de mu-

chas maneras. (La escritura es excelente ejemplo de este principio.) Tal como la conocemos, la vida usa cadenas lineales de unidades estándar, pero es posible imaginar esquemas que utilicen láminas de unidades ordenadas o incluso estructuras tridimensionales, aunque éstas serían más difíciles de duplicar. No sólo deben contener información estas estructuras —es decir, no hay razón para que sean regulares por completo—, sino que su contenido informativo ha de ser fácil de copiar con fidelidad y, algo que es mucho más importante: la información debe permanecer estable mucho más tiempo que el necesario para copiarla, pues de otro modo los errores serían demasiado frecuentes y la selección natural no podría realizarse. Así, la construcción, partiendo de unidades estándar de combinaciones extensas suficientemente estables, sería esencial para evolucionar hacia formas de vida superiores. Si tratamos de evitar el uso de un pequeño número de unidades estándar, el mecanismo de duplicación se iría haciendo cada vez más difícil, como indudablemente lo es la impresión o la escritura de la lengua china, la cual contiene millares de unidades.

Otro requisito general es que el proceso no debe ser demasiado lento. Todavía hoy no podemos calcular el índice de evolución a partir de los principios primigenios, pero un sistema que fuera, por ejemplo, 10 o 100 veces más lento que el nuestro apenas habría tenido tiempo para producir organismos superiores de complejidad semejante a la nuestra, incluso si el sistema se hubiera iniciado poco después de la Gran Explosión. En consecuencia, cualquier sistema basado en el estado sólido, en el que sin duda podrían ocurrir reacciones químicas, pero con tan extrema lentitud, casi con seguridad no sería lo

bastante rápido. Esto nos permite considerar líquidos y gases.

Una objeción al estado puramente gaseoso es que sólo pequeñas moléculas pueden formar gases verdaderos, pues incluso si no actuaran entre ellas fuerzas de atracción específicas, siempre intervienen apreciables fuerzas no específicas (llamadas fuerzas de Van der Waals). Estas fuerzas actúan entre todos los átomos, aunque sólo a cortas distancias, y aumentan de acuerdo con el tamaño molecular. Como hemos visto, debido a que una molécula portadora de información tiene que ser más bien grande (a fin de incorporar instrucciones utilizando el método combinatorio), es improbable que sea gaseosa, salvo en temperaturas elevadas, cuando hay peligro de que el movimiento térmico la desintegre en fragmentos, o a presiones en extremo bajas, que causarían otras dificultades. En particular, las concentraciones de las moléculas formadoras de la fase gaseosa habrían de ser inevitablemente bajas, y esto lentificaría el índice de las reacciones químicas necesarias. Por todas estas razones es muy difícil idear un sistema aceptable basado sólo en una fase puramente gaseosa.

Existen más posibilidades si minúsculas partículas de materia sólida o gotas de líquido (o gotas envueltas por una película especial) fluyen en una fase gaseosa. En tales casos es más difícil afirmar que tales formas de vida son en extremo inverosímiles. Puede considerarse imposible la evolución de grandes organismos si se utiliza tal sistema, pero a este respecto hay que ser muy cuidadosos. La existencia misma de animales y vegetales terrestres demuestra que cuando un sistema ha progresado en cualquier sentido, la selección natural puede ser muy

ingeniosa superando obstáculos de esa clase. Sin embargo, si examinamos el problema, veremos que la solución más fácil es utilizar un sistema basado en grandes combinaciones, parecidas al estado sólido, pero en escala diminuta, flotantes en algún líquido. Cualquiera otra cosa sería en extremo difícil que evolucionara. Como el átomo de carbono supera a cualesquiera otros por su capacidad para ligarse con otros átomos, produce el casi infinito número de diversas moléculas orgánicas, y como la del agua es la molécula más abundante en el planeta que es posible hallar en gran cantidad en estado líquido, no será demasiado sorprendente que la vida, tal como la conocemos, se base en compuestos de carbono disueltos en agua.

Naturalmente, en otros lugares del universo podría existir la vida basada en otras sustancias. A temperaturas más bajas, el amonio líquido podría servir como disolvente, aunque como tal resulta muy inferior al agua, que es un disolvente excepcionalmente bueno. Se ha sugerido que el lugar del carbono podría ocuparlo el silicio, una de cuyas ventajas es la de ser muy abundante en la superficie de la Tierra. El silicio, combinado con el oxígeno para formar silicato, en realidad puede dar lugar a grandes estructuras; algunas de éstas son laminares, unas cuantas lineales, pero la mayor parte más bien son intrincadas estructuras tridimensionales, cristalinas o pseudocristalinas, y parece que no pudieran constituir fácilmente las bases para la selección natural, excepto de manera muy torpe.

Así, una forma de vida basada en otros materiales no es imposible. Algunos sistemas merecen estudio adicional, pero hasta ahora nadie ha logrado proponer uno que

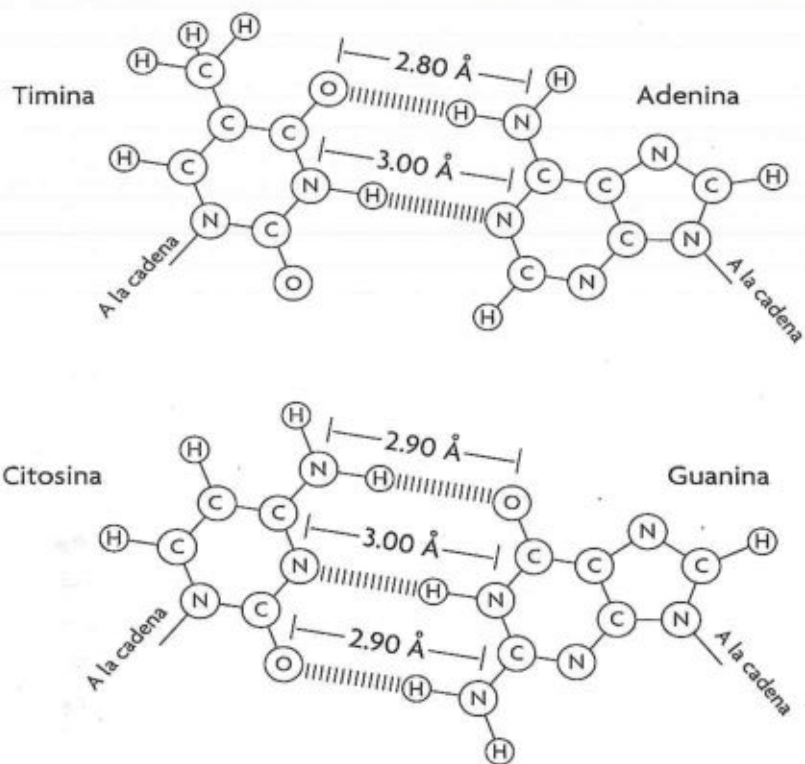
en verdad parezca promisorio. Algunos sistemas, como la vida en un plasma o dentro de una estrella, parecen ser más improbables. Para lograr alguna forma de vida en el interior del Sol sería necesario que hubiera gran cantidad de combinaciones de nucleones que fueran estables durante largo tiempo. No se discute que los acontecimientos que tienen lugar en el interior del Sol deben producirse con enorme rapidez por ser tan alta la temperatura allí. (De hecho, en él las reacciones nucleares se realizan con gran lentitud, lo que explica por qué el Sol ha brillado tan constantemente durante tanto tiempo.) Tal vez cuando hace explosión una estrella las reacciones pudieran considerarse como una forma muy primitiva de la selección natural, pero estas explosiones son tan transitorias que los resultados se congelarían casi antes de que el proceso tuviera tiempo de seguir adelante.

Afortunadamente, estas posibilidades tan remotas no nos interesan aquí. Nuestra forma de vida tiene su base, claramente, en los compuestos del carbono en un medio acuoso. ¿Cuáles son estos cuerpos orgánicos y cómo interactúan unos con otros?

V. LOS ÁCIDOS NUCLEICOS Y LA DUPLICACIÓN MOLECULAR

AHORA QUE ya hemos descrito los requerimientos para un sistema vivo en términos bastante abstractos, debemos: examinar con mayor minuciosidad los diversos procesos que ocurren en los organismos que viven en torno nuestro. Como hemos visto, el requisito absolutamente central es la existencia de algún método bastante preciso para la duplicación y, en particular, para copiar una larga macromolécula lineal integrada a partir de un conjunto tipo de subunidades. En la Tierra realiza esta función una de las dos grandes familias de ácidos nucleicos: la familia de los ácidos desoxirribonucleicos, ADN, o la de los ácidos ribonucleicos, ARN. El plan general de estas moléculas es en extremo sencillo, tan sencillo, en verdad, que indican de manera convincente que su existencia se remonta hasta el principio mismo de la vida.

LOS ADN y los ARN son muy semejantes entre sí —primeros moleculares, podríamos decir—; comencemos por describir los ADN para explicar después en qué difieren de los ARN. Una cadena de ADN consiste en una espina dorsal uniforme, integrada por secuencias de átomos repetidas una y otra vez, con un grupo lateral ligado a cada



Los pares de bases son el secreto de la estructura del ADN. Las bases se mantienen unidas por débiles enlaces de hidrógeno, como se ve en las líneas de rayas. La timina siempre forma parte con la adenina, y la citosina con la guanina.

una de las repeticiones. Químicamente, la espina dorsal sigue la pauta... fosfato-azúcar, fosfato-azúcar... etc., repetidos muchos miles y aun millones de veces. El azúcar no es la que tenemos en la mesa del desayuno sino otra más pequeña llamada desoxirribosa, es decir, ribosa de la que se ha desprendido un grupo "oxi" (de aquí el nombre de ADN, compuesto de las siglas de ácido desoxirribonu-

cleico, "nucleico" por hallarse en el núcleo de las células superiores, y "ácido" a causa de los grupos de fosfato, cada uno de los cuales, en condiciones normales, lleva una carga negativa). Cada azúcar tiene un grupo lateral unido a ella. Los grupos laterales difieren entre sí, pero sólo hay cuatro grupos principales de ellos. Estos cuatro grupos laterales de los ADN (por razones técnicas llamados *bases*) se designan por conveniencia por sus letras iniciales: A, G, T y C (que valen, respectivamente, por adenina, guanina, timina y citosina). En virtud de sus formas y tamaños exactos y de la naturaleza de sus componentes químicos; A hará pareja bien proporcionada con T, y G con C (A y G son grandes, T y C más pequeñas, de modo que cada par consta de una base grande y otra más pequeña).

El ADN y el ARN forman con bastante facilidad estructuras de dos cadenas, situadas juntas, una al lado de la otra; enrollada una alrededor de la otra para formar una doble hélice, y unidas entre sí por sus bases. En cada nivel hay un par de bases formado por una base en una cadena apareada (utilizando las reglas de apareamiento) con la base de la otra cadena. Los enlaces entre estos pares son bastante débiles en lo individual, aunque colectivamente forman una doble hélice con razonable grado de estabilidad. Ahora bien, si se calienta la estructura, la agitación térmica romperá los enlaces entre las cadenas de la doble hélice, de manera que se separarán y se alejarán flotando en el agua circundante.

El mensaje genético lo transmite la exacta secuencia de base a lo largo de la cadena. Dada esta secuencia, puede leerse la de las bases de su compañera complementaria, para lo cual se hace uso de las reglas de apareamiento

(A con T, G con C). La información genética está registrada dos veces, una en cada cadena. Esto puede ser útil si una cadena es dañada, pues ésta puede repararse usando la información —la secuencia de base— de la otra cadena.

Existe una inesperada peculiaridad. En la doble hélice habitual, las respectivas espinas dorsales de ambas cadenas no son aproximadamente paralelas sino antiparalelas. Si la secuencia de los átomos de una de las espinas dorsales es ascendente, la de la otra cadena será descendente. Esto provoca ciertas complicaciones, pero no tantas como cabría esperar. En el fondo es consecuencia de la clase de simetría que posee la doble hélice. Esto es causado por la seudosimetría del emparejamiento de las bases. Y ello resulta ser lo conveniente para que estas sustancias químicas en particular se adapten bien entre sí.

Es fácil ver que una molécula con esta configuración, que consiste en un par de cadenas cuyos elementos irregulares (las bases) se ajustan uno con otro, es ideal para la duplicación molecular, sobre todo por cuanto es bastante fácil separar una de otra las cadenas con procedimientos poco severos. Sucede así porque los enlaces *interiores* de cada cadena, que la mantienen unida, son fuertes ligaduras químicas, casi inmunes a la agitación térmica normal, mientras que los enlaces que unen a una cadena con otra son bastante débiles, de modo que pueden desprenderse sin gran dificultad y sin romper las espinas dorsales. Las dos cadenas de ADN pueden compararse con dos amantes, unidos en íntimo abrazo, pero separables porque, pese a lo íntimamente que están unidos, cada uno forma parte de una gran unidad mucho más fuerte que los enlaces que unen a una cadena con la otra.

En virtud de ajustarse entre sí con tanta precisión, cada cadena puede considerarse como un molde para la otra. Conceptualmente, el mecanismo básico de la duplicación es muy sencillo. Las dos cadenas se separan. Entonces, cada cadena actúa como plantilla para la formación de una nueva cadena compañera, utilizando como materia prima una provisión de cuatro componentes tipo. Una vez completada esta operación, tendremos dos pares de cadenas en lugar de uno, y como para realizar un trabajo limpio la formación debe obedecer a las reglas de apareamiento de las bases (A con T, G con C), la secuencia de éstas se habrá copiado con precisión. Habremos terminado con dos dobles hélices cuando antes teníamos sólo una. Cada doble hélice hija constará de una cadena vieja y de otra recién sintetizada ajustadas exactamente una con otra, y lo más importante: la secuencia de las bases de las dos cadenas hijas será idéntica a la del ADN original.

Es difícil que la idea fundamental pudiera ser más sencilla. El único rasgo en cierto modo inesperado es que las dos cadenas no son idénticas sino complementarias. Cabría imaginar un mecanismo aún más sencillo en el que lo semejante se emparejase con lo semejante, de modo que las dos cadenas apareadas fuesen idénticas, pero la índole de las interacciones químicas facilita un poco más la unión entre moléculas complementarias que entre moléculas idénticas.

¿Cómo se compara tal proceso con los aparatos de copiado de uso común en nuestros días? Una línea de tipos, preparada para imprimir, consiste (o consistía) en un conjunto de símbolos comunes ordenados en una línea o serie de líneas. Cada letra de la fuente tiene una

parte común a todas las letras, que encaja en las ranuras que mantienen los tipos en su lugar, y otra parte que es característica de cada letra. Después de esto, la semejanza acaba. Nada hay en la duplicación del ADN que corresponda a la tinta. Las letras impresas en la página son imágenes especulares de la tipografía, no el complemento (lo que podría sobresalir de la tipografía) y, lo que es más importante: la línea impresa resultante no puede después ponerse en la misma máquina para reproducir la tipografía. Las prensas impresoras producen muchos millares de ejemplares de periódicos, pero éstos no pueden copiarse a la inversa en tipos.

La duplicación del ADN no se parece a eso. Para que se dé la selección natural es indispensable que el duplicado mismo sea reproducido. La duplicación del ADN se asemeja más a la producción de una escultura mediante un molde, ya que es bastante sencillo utilizar la escultura misma para producir otro molde. La principal diferencia radica en que la cadena de ADN está formada por sólo cuatro piezas comunes. Es claro que esto no sucede con la mayor parte de las esculturas.

Si examinamos el proceso de duplicación del ADN veremos que lo rige cierto número de requisitos fundamentales. Si comenzamos con una doble hélice, hay que separar las dos cadenas de alguna manera. Es necesario poder disponer de los cuatro componentes. Cada uno de éstos es una pieza importante de la espina dorsal (una molécula de azúcar unida a otra de fosfato) más una de las cuatro bases ligadas a la molécula del azúcar. A esta molécula tripartita se le llama nucleótido. En la práctica, estos precursores no contienen sólo un fosfato sino tres en fila; los otros dos se desprenden en el proceso de po-

limerización y, al hacerlo, proporcionan la energía para conducir la síntesis en la dirección deseada. Aunque podría pensarse que el proceso se efectúa sin componentes adicionales, se esperaría que en un sistema evolucionado se hallara por lo menos una enzima (es decir, una proteína con actividad catalítica) que acelerara la síntesis y la hiciera más exacta.

Éstos son los requisitos resumidos. Si se analiza un sistema de duplicación real se encontrará que es muchísimo más complicado. Al principio, antes de comenzar la síntesis, las dos cadenas no están separadas completamente. Se produce síntesis de nuevas cadenas durante el proceso de separación, de modo que algunas partes de la doble hélice ya han sido duplicadas antes de que otras más lejanas se hayan separado. Existen proteínas especiales cuya función es desenrollar la doble hélice, junto con otras que pueden poner muescas en la espina dorsal para que ésta gire en torno a la otra, y después unir de nuevo la cadena rota. Como las dos cadenas de doble hélice giran en sentido opuesto y dado que, químicamente hablando, la síntesis se efectúa en una sola dirección, veremos que la síntesis avanza en una cadena y retrocede en la otra, así que el mecanismo ha de permitir esta complicada actividad. Además, un nuevo fragmento de una cadena de ADN suele comenzar como un pequeño trozo de ARN, al que se une después un tramo más largo de ADN. Hay además otras proteínas que cortan este segmento primario de ARN y lo sustituyen con uno equivalente de cadena de ADN y después unen todo sin dejar huellas de unión. Para sintetizar un virus constituido de ADN, particularmente pequeño, sabemos que se necesitan casi 20 proteínas distintas, unas para realizar una función,

otras para efectuar otra. Esto es muy característico de los procesos biológicos. El mecanismo subyacente puede ser sencillo, pero si el proceso es importante en lo biológico, entonces, en el largo transcurso de la evolución, la selección natural lo habrá mejorado y enriquecido, de modo que funcione con rapidez y exactitud mayores. Esta complicada elaboración es la causa de que los mecanismos biológicos suelen ser tan difíciles de descifrar.

Afortunadamente, como hemos observado, estas complicaciones no deben detenernos. Cuando la vida comenzó, la química debió de ser sencilla en cierto grado. El punto importante que debemos comprender es que la ordenada geometría del par de bases que obedece las reglas de apareamiento ofrece la oportunidad de la duplicación específica aun en sistemas no muy perfeccionados. Vemos, pues, que lo esencial del ADN no es la doble hélice. En realidad, virus sencillos tienen una sola cadena de ADN como material genético, que puede ser tan corto (tan sólo unas 5 000 bases de longitud) que no requiera la segunda cadena como un seguro contra posible daño. El rasgo esencial es que el mecanismo de duplicación utilizará la sencillez del par de bases específico para construir una nueva cadena con una complementaria secuencia de sus bases de la que dirigió su formación. Es esta sencillez lo que nos tienta a creer que ya fue utilizada por los primitivos sistemas vivos. Si las dos cadenas —la vieja y la nueva— permanecen juntas después de la duplicación, es asunto de menor importancia.

En este punto debemos decir unas cuantas palabras respecto al ARN, pariente cercano del ADN. (Todos los tipos del ARN se describen con mayor detalle en el apéndice.) Como hemos explicado, la información genética

de cada célula de un organismo superior está codificada en forma de una detallada secuencia de bases de un número muy grande de moléculas de ADN. En cualquier momento, muchas partes más cortas de esa secuencia se duplican en moléculas de ARN de hebra sencilla para que la célula las utilice en la mitosis. Algunas de ellas se usan para fines estructurales, pero la mayor parte se utilizan como ARN mensajeros, que son los portadores de las instrucciones para la síntesis de las proteínas. Esta síntesis se efectúa en estructuras moleculares complejísimas llamadas ribosomas y necesita gran cantidad de aparatos moleculares auxiliares, en particular un conjunto de moléculas de ARNT.

Sin duda, el sistema es muy complejo, pero sobre todo lo es debido a la complicada función que debe desempeñar. El proceso de duplicar la molécula de hebra sencilla de un ARN a partir de un segmento de ADN —la llamada transcripción— hasta cierto punto es sencillo y sólo requiere de una proteína bastante larga para dirigirlo. El proceso de sintetizar una proteína utilizando las instrucciones contenidas en un trozo de ARN mensajero —operación llamada transferencia— por fuerza es más difícil, pues las instrucciones van incorporadas en el lenguaje de cuatro letras del ARN y han de *traducirse* por el mecanismo químico al lenguaje de 20 letras de las proteínas. En verdad, es bastante notable el hecho de que tal mecanismo exista, y aún más notable es que toda célula viva, sea animal, vegetal o microbiana, contiene una versión del mismo. Su elucidación ha sido uno de los triunfos de la biología molecular.

Así pues, la célula es una diminuta y ajetreada fábrica con rápida actividad química organizada. Bajo adecuados

controles moleculares, las atareadas enzimas sintetizan tramos de ARN mensajero. Un ribosoma saltará sobre cada molécula de ARN mensajero, se moverá a lo largo de ella, leerá la secuencia de sus bases y ensartará aminoácidos (llevados a ella por moléculas de ARNT) para formar una cadena polipeptídica que, una vez terminada, se plegará sobre sí misma y se convertirá en proteína. La naturaleza creó la línea de montaje miles de millones de años antes que Henry Ford. Además, esta línea de montaje produce muchas y diferentes proteínas sumamente específicas: las máquinas-herramienta de la célula que forman y reforman las moléculas químicas orgánicas con objeto de proveer materia prima para las líneas de montaje y todas las moléculas necesarias para elaborar la estructura de la factoría, suministrar energía a ésta, eliminar los desechos y ejercer otras funciones más. Dada la complicación del tema, el lector no tiene por qué esforzarse por comprender todos los detalles. El punto principal que debe tomarse en consideración es que, a pesar de ser casi universal el código genético, el mecanismo necesario para incorporarlo es tan complejo que indudablemente no pudo nacer de golpe. Debe de haber evolucionado partiendo de algo mucho más sencillo. En realidad, el mayor problema para comprender el origen de la vida es tratar de suponer cuál pudo haber sido ese sistema más sencillo.

Llegados a este punto, tal vez valdría la pena comparar y contrastar estas tres grandes familias de macromoléculas: proteínas, ARN y ADN. Las moléculas proteínicas, por contener 20 diferentes cadenas laterales, varias de las cuales son bastante activas químicamente, son mucho más variables como clase que las moléculas de los ácidos

nucleicos. Ésta es la razón de que todas las enzimas conocidas estén formadas por proteínas, aunque, en algunos casos, necesitan la colaboración de alguna pequeña molécula orgánica para actuar como coenzimas. Lo que permite funcionar a las células actuales es la capacidad que tiene cada enzima de formar o romper enlaces químicos específicos. Como muchas y diferentes reacciones químicas necesitan ser catalizadas de esta manera, hay muchas diferentes clases de enzimas.

Por contraste, nunca se ha hallado una molécula de ácido nucleico que tenga actividad catalítica. Los ARN y los ADN poseen sólo cuatro tipos de grupos laterales en lugar de 20, y aunque son ideales para la duplicación porque las bases encajan tan bien unas en otras, estos grupos laterales no son muy buenos para realizar la catálisis química. Pero las proteínas no pueden hacer lo mismo que el ARN y el ADN: formar estructuras complementarias del tipo hallado en la doble hélice. No sabemos la forma en que una molécula pudiera hacer esto, desde luego ninguna de las proteínas modernas con sus 20 clases de cadenas laterales.

Casi todos los químicos que investigan el origen de la vida sospechan que, al principio, el ARN surgió primero y que el ADN fue creación posterior. El ARN es químicamente más activo que el ADN, y quizá fue más fácil sintetizarlo en las condiciones primitivas de nuestro planeta. Los genes más primitivos pudieron estar constituidos de ARN. Sólo más tarde, cuando la información genética creció en longitud, se necesitó ADN por ser más estable para servir de archivo para la duplicación.

La vida, tal como la conocemos en la Tierra, se presenta como una síntesis de dos sistemas macromole-

culares. Las proteínas, debido a su multifuncionalidad y reactivación química, realizan todo el trabajo, pero son incapaces de autoduplicarse en forma sencilla. Los ácidos nucleicos parecen hechos a la medida para duplicarse, pero pueden lograr muy poco en comparación con las complejas y más aptas proteínas. El ARN y el ADN son las rubias bobaliconas del mundo biomolecular, aptas sobre todo para la reproducción (con un poco de ayuda de las proteínas), pero de poca utilidad para gran parte del trabajo realmente exigido. Sería mucho más fácil resolver el problema del origen de la vida si sólo hubiera una familia de macromoléculas capaces de realizar las dos funciones: duplicación y catálisis, pero la vida que conocemos emplea dos familias. Ello muy bien pudiera deberse a que no existe ninguna macromolécula capaz de efectuar convenientemente las dos funciones por las limitaciones de la química orgánica, es decir, por la naturaleza misma de las cosas.

Para alcanzar cualquier progreso posterior, debemos tratar de aprender algo acerca de las condiciones físicas y químicas de la primitiva Tierra o de algún otro planeta parecido. Esto es lo que haremos.

VI. LA TIERRA PRIMITIVA

¿QUÉ SUSTANCIAS necesitamos para formar la base material de la vida? La vida que vemos en torno nuestro se basa en los átomos de carbono, combinados con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, junto con algo de fósforo y azufre. Utilizando estos cuantos tipos de átomos es posible formar enorme número de pequeñas moléculas —es decir, moléculas con menos de cincuenta átomos— y un número casi ilimitado de diferentes macromoléculas, cada una de ellas constituida por miles de átomos. Otros átomos también son importantes, tales como los átomos eléctricamente cargados (iones) de sodio, potasio, magnesio, cloro, calcio, hierro y varios otros, pero en casi todos los casos estos átomos no forman parte de moléculas orgánicas, sino que existen principalmente por sí mismos. Para que la vida comenzara fue necesaria la presencia de la mayor parte de estos átomos. ¿De dónde provenían? ¿Y se hallaban solos o en combinaciones sencillas?

Sucede que los átomos hallados en química orgánica son todos muy reactivos. Aun en la atmósfera se encuentran combinados. Argumentos químicos sencillos sugie-

ren que el hidrógeno se combinará consigo mismo para formar la molécula H_2 , el oxígeno dará O_2 y el nitrógeno N_2 . Igualmente, es posible esperar combinaciones sencillas, como H_2O (agua), NH_3 (amoníaco), CO_2 (bióxido de carbono), CH_4 (metano) y numerosos cuerpos más. La atmósfera terrestre actual consta principalmente de un gas muy inerte, el nitrógeno (N_2), junto con 20% de oxígeno (O_2), un poco de vapor de agua (H_2O) y aún menos bióxido de carbono (CO_2).

Solía creerse que la atmósfera primitiva de nuestro planeta era muy diferente. Como el hidrógeno es con mucho el elemento más abundante en el universo, era natural creer que predominaba en la atmósfera primitiva. En la actualidad, casi todo el oxígeno contenido en la atmósfera es producto de la fotosíntesis. En los tiempos primitivos no existía vida sobre la Tierra, de modo que no había oxígeno producido de esta manera. Tal atmósfera, rica en hidrógeno y pobre en oxígeno, se denomina *reductora*, en contraste con la atmósfera actual, a la que llamamos *oxidante*. Los experimentos en síntesis prebiótica, que describiremos brevemente, parecían apoyar esta conclusión.

Hace poco se han puesto en tela de juicio estas ideas. El hidrógeno es tan ligero que la gravedad de nuestro planeta no tiene fuerza suficiente para retenerlo y, por lo tanto, escapa al espacio con bastante facilidad. La tasa exacta depende de varios factores, sobre todo de la temperatura en la atmósfera superior, pues cuanto más elevada sea dicha temperatura, más fácilmente se moverán los átomos o moléculas y escapan al espacio. Hoy día se cree posible que gran parte del hidrógeno original escapó con tanta rapidez que jamás predominó en la atmósfera.

Pero ¿qué hay respecto del oxígeno? No pudo haberse producido por fotosíntesis, pero ¿existe algún otro mecanismo aceptable? Casi con toda seguridad en la Tierra primitiva abundaba el agua, sobre todo en la atmósfera. En circunstancias favorables, la luz ultravioleta puede escindir el agua en sus dos componentes. Si el hidrógeno producido de esta manera hubiera escapado al espacio, el oxígeno dejado atrás se habría acumulado, y si el proceso ocurrió en escala lo suficientemente grande, la atmósfera debió de ser rica en oxígeno. Hoy, en virtud de la mencionada estructura de la atmósfera actual, este proceso no produce oxígeno en cantidad apreciable, pero por lo menos es posible que, en el remoto pasado, las condiciones fueran tan diferentes de las actuales que el oxígeno se produjera con mayor facilidad.

Por supuesto, el oxígeno y el hidrógeno no eran los únicos elementos presentes en el aire. Quizá había un poco de nitrógeno, algo de carbono y tal vez un poco de azufre, aunque los dos últimos no se hallarían sin combinar. Es probable que se encontraran presentes los gases N_2 y CO_2 , con cantidades menores de CH_4 , CO y hasta NH_3 y SH_2 (sulfuro de hidrógeno). Lo que resulta bastante oscuro es su proporción exacta, en particular las cantidades de H_2 y O_2 .

Como la atmósfera interactúa con las sustancias químicas de la superficie de nuestro planeta, la composición química de las rocas sedimentarias más antiguas nos dará algunas claves para conocer la composición de la primitiva atmósfera terrestre. Algunas de estas rocas tienen indicios de haberse formado en condiciones de reducción, hecho que apoya la hipótesis de que la atmósfera de entonces era reductora. También esta hipótesis ha sido

puesta en tela de juicio recientemente. Aun hoy, algunos sedimentos son reductores —por ejemplo, el fango fétido— a pesar de todo el oxígeno que contiene el aire que nos rodea. Por lo regular, tales condiciones suelen ser resultado de procesos de degradación anaeróbica de la materia orgánica contenida en el fango. Ahora se afirma que si se consideran *todas* las rocas disponibles de cierta edad, después de haber calculado el promedio, las pruebas indican que la atmósfera de lo pasado era bastante parecida a la actual. Por desgracia, esto sólo nos permite retroceder 3 200 millones de años. Antes de esta remota era, las pruebas de que disponemos son muy escasas, pues las rocas que poseemos de esa época son unas cuantas. La conclusión de que la atmósfera de hace 3 200 millones de años no era reductora no sorprende por completo, pues se supone que ya hace 3 600 millones de años había organismos capaces de realizar la fotosíntesis. Para nuestra mala fortuna, hasta hoy no ha sido posible descubrir cuántos de ellos había, de modo que es difícil calcular si su producción de oxígeno era grande o pequeña.

En resumen, nos gustaría conocer la composición aproximada de la atmósfera terrestre en una época anterior a la aparición de la vida como la conocemos y, en particular, en qué grado era oxidante o reductora. Por ahora parece muy difícil llegar a alguna conclusión firme sobre este asunto.

De igual modo, ignoramos cuál era la temperatura de la Tierra primitiva, pues en gran parte depende de la rapidez con que se formó. Si su concreción se realizó en un corto espacio de tiempo, el calor generado por las colisiones no habría tenido tiempo de disiparse, de manera que en su fase primitiva nuestro planeta debió de haber

sido muy caliente. Si el proceso fue más lento, la Tierra primitiva pudo haber tenido una temperatura más moderada, aunque con lugares transitoriamente más calientes a causa de los choques recibidos durante las fases finales de la formación. Cualquiera que hubiesen sido los detalles del proceso, parece probable que en algún momento nuestro planeta llegó a un estado en que le fue posible retener la suficiente agua líquida para formar océanos, mares, lagos, ríos y pantanos.

Cualquiera que fuese la naturaleza de la atmósfera, sin duda recibía abundante energía del Sol. No se sabe con certeza cuál fue la temperatura solar en aquella época, aunque es probable que su radiación no difiriera mucho de la que hoy día recibimos. Una posible diferencia que podría haber afectado la cantidad de radiación solar llegada a la superficie terrestre sería la causa de la actual capa de ozono (O_3), pues si la atmósfera hubiera contenido poco oxígeno (excepto en la combinación como agua, monóxido de carbono CO y bióxido de carbono, CO_2), la capa de ozono no se habría formado. Esta capa de ozono filtra y retiene gran parte de la luz ultravioleta proveniente del Sol. Igual que hoy, probablemente se produjeron frecuentes tormentas eléctricas (semejantes a nuestras tempestades) y también considerable actividad volcánica, lo mismo en la tierra que en los océanos. Además, se producirían reacciones entre iones y moléculas en la ionosfera y en la atmósfera superior, de manera que hubiera varias fuentes de energía de la clase adecuada para fomentar los cambios químicos. Todo esto indica que los océanos primitivos no estaban constituidos sólo por agua y unas cuantas sales sencillas, sino que se había acumulado en ellos apreciable cantidad de pequeñas moléculas.

las orgánicas, formadas a partir de otras moléculas presentes en la atmósfera y disueltas en las aguas oceánicas por medio de las descargas eléctricas, la luz ultravioleta y otras fuentes de energía.

La idea de que la atmósfera primitiva no era como la actual sino que contenía mucho menos oxígeno, pareció recibir impresionante apoyo en 1953 por parte de Stanley Miller, discípulo de Harold Urey, quien hizo pasar una descarga eléctrica a través de una mezcla de CH_4 , NH_3 , H_2 y H_2O contenida en un sistema cerrado. El procedimiento comprendía un matraz de agua, que fue hervida para provocar la circulación de los gases y sirvió para atrapar cualesquier productos volátiles solubles en agua que se hubieran formado y protegerlos de la desintegración causada por la descarga eléctrica. Al cabo de una semana o algo así se detuvo la descarga eléctrica y se encontró que el agua contenía varios productos orgánicos pequeños, incluso considerable cantidad de aminoácidos sencillos: glicina y alanina, que forman parte de todas las proteínas. Desde entonces han sido muchos los experimentos similares realizados, usando diferentes mezclas de gases y diversas fuentes de energía, en distintas condiciones experimentales, incluso haciendo pasar los gases sobre superficies de minerales calentados. Los resultados han sido demasiado complejos para resumirlos aquí, salvo por lo que respecta a un hecho notable. Si la mezcla de gases contiene cantidad apreciable de oxígeno, entonces no se forman las pequeñas moléculas emparentadas con las presentes en los organismos vivos. En ausencia de oxígeno gaseoso, se producen tales moléculas pequeñas, siempre que la mezcla de gases contenga nitrógeno y carbono en una u otra forma. Algunas mez-

clas de gases producen mayor variedad de aminoácidos que otras, especialmente si no está presente el H_2 . En la Tierra primitiva, el H_2 se habría perdido en el espacio, mientras que en el experimento original de Miller, que se realizó en un recipiente cerrado, cualquier cantidad de H_2 formado no tuvo semejante vía de escape del aparato y, en consecuencia, se fue acumulando a medida que avanzaba el experimento.

Por consiguiente, si la atmósfera primitiva era reductora, es probable que el agua de la Tierra primitiva contuviera una mezcla bastante diluida de pequeñas moléculas orgánicas, muchas de las cuales podrían haber servido como materia prima para los primeros organismos vivos. Todavía se discute acerca de cuáles fueron, en qué cantidad y dónde: si en la atmósfera superior, en los océanos, cerca de los volcanes submarinos o en marismas, lagunas, aguas termales cerca de hendeduras volcánicas o en todos estos lugares. Muchas de estas moléculas no son estables en el agua por mucho tiempo, de modo que las cantidades presentes en el agua a fin de cuentas serían la consecuencia del equilibrio entre su continua producción a lo largo de millones de años y su destrucción en el agua provocada por el movimiento térmico. Casi todos los aminoácidos tienen a la vez una carga positiva y otra negativa, de manera que, aun siendo pequeños y eléctricamente neutros, tienden a permanecer en el agua con preferencia a escapar al aire. Por esta razón, no debieron de haberse perdido por evaporación. Tampoco este primitivo caldo, como a menudo se le llama, "se echaría a perder", en el sentido habitual, pues no había entonces microorganismos que vivieran en él y pudieran utilizar sus moléculas como alimento.

En cierta ocasión pregunté a mi colega Leslie Orgel, que investiga sobre el origen de la vida, cuál habría debido ser la concentración del mentado caldo. Me contestó que él había hecho un cálculo muy somero y que tal vez contenía tanta materia orgánica como la sopa de pollo (aunque principalmente en forma de pequeñas moléculas orgánicas). Quedé desconcertado. Recordé con claridad que en una de las raras ocasiones en que yo tuve que preparar mi comida abrí una lata de sopa de pollo y que, además de trocitos de carne, contenía una rica mezcla cremosa. Un océano entero con tal consistencia me pareció sumamente improbable. Sin embargo, resulta que a la tal sopa sería más correcto describirla como *caldo* de pollo. En lo que Orgel pensaba era en un caldo de pollo aguado, bastante aguado. Incluso había llegado a medir la cantidad de materia orgánica en una muestra de tal caldo. Quizá no todo el mundo esté de acuerdo con su cálculo, pero da idea muy aproximada de la cantidad total de materia orgánica de que tal vez se disponía en nuestro planeta antes del comienzo de la vida.

Si resulta que la atmósfera primitiva no era reductora sino que contenía regular cantidad de oxígeno, entonces el cuadro se hace más complicado. A primera vista, podría parecer que, no habiendo materia prima disponible, difícilmente podría haber comenzado la vida. Si en realidad esto fuera cierto, vendría en apoyo de la teoría de la panspermia dirigida, pues algunos planetas en otros lugares del universo podrían haber tenido una atmósfera más reductora (como la que analizaré en el capítulo VIII) y, en consecuencia, un caldo prebiótico más favorable. No obstante, aun en una atmósfera oxidante podría haber habido lugares en la Tierra donde las condiciones

fueran reductoras, por ejemplo: debajo de las rocas y en el fondo de los lagos y mares. Quizá hubiera aguas termales en el lecho marino que proveyesen a su alrededor condiciones favorables para la síntesis prebiótica.

Otra posibilidad sería que considerable cantidad de pequeñas moléculas presentes en el espacio llegaran a la superficie de nuestro planeta por uno u otro medio, quizá traídas por cometas que chocaran contra nuestro planeta y produjeran concentraciones locales de sustancias químicas aprovechables. Aun si tal fenómeno sólo hubiese modificado una pequeña porción de la superficie terrestre, podría haber habido suficientes de estos lugares especiales para que las cosas siguieran su camino, suponiendo que la vida pudiera comenzar fácilmente dado el ambiente adecuado.

A pesar de todas estas incertidumbres, parece posible que en algunas etapas primitivas de la historia de la Tierra había buena cantidad de agua en la superficie y que en tales lugares se hubiera formado una solución diluida de pequeñas moléculas orgánicas; muchas de ellas no dejan de tener relación con las materias primas necesarias para sintetizar proteínas y ácidos nucleicos, junto con varias sales desprendidas de las rocas circundantes. Las condiciones bien podrían haber sido adecuadas para que surgiera alguna forma primitiva de vida. Así pues, nos hemos de enfrentar a la dificultad de decidir en qué fase de este continuo proceso de evolución química hemos de aceptar como tal un organismo vivo muy sencillo.

La elección de una etapa particular debe ser en cierto grado arbitraria, pero tenemos un criterio que podemos aplicar provechosamente para fijar una demarcación entre lo vivo y lo no vivo. ¿La selección natural se da, aun

cuando sólo de manera muy sencilla? Si es así, entonces un suceso raro puede hacerse habitual. Si no es así, cualquier acontecimiento raro sería debido sólo a la casualidad y a la naturaleza intrínseca de las cosas. Este criterio es importante porque, como veremos, en verdad el origen de la vida puede haber sido un suceso raro, y nos agradaría mucho saber exactamente hasta dónde llegó el grado de rareza.

Sea el caldo de la índole que sea, ¿cuál sería la probabilidad de que surgiese espontáneamente un organismo capaz de evolucionar por selección natural? Aquí nos enfrentamos a problemas formidables. Cualquier cosa que haya ocurrido durante aquellos remotos tiempos, podemos estar seguros de que el primitivo organismo habría acabado por evolucionar con bastante uniformidad hasta su condición actual, basado en los ácidos nucleicos para la duplicación y en la síntesis de las proteínas para la acción. No podemos estar seguros de que los organismos desarrollados más primitivos no estuvieran incorporados en algo muy diferente que preparase el escenario para los organismos actuales. Aunque ése no fuera el caso, y el primer organismo capaz de duplicarse tuviese algunos elementos del que ahora existe, carecemos de pruebas de si lo primero que existió fue el ácido nucleico, o fueron primero las proteínas o si uno y otras evolucionaron juntos. Mi opinión es que surgió primero el ácido nucleico (probablemente ARN), seguido de cerca por una forma sencilla de síntesis proteínica. A mi juicio, es éste el camino más fácil, pero aun así aparece plagado de dificultades. Quizá el fosfato era común y el azúcar ribosa (que no contiene nitrógeno) pudo haberse formado fácilmente en ciertas condiciones especiales, por cuanto el

formaldehído (HCOH) se sabe que fue uno de los cuerpos químicos prebióticos más comunes. Sin embargo, podría haberse requerido un conjunto de condiciones muy diferentes para la síntesis de las bases, tales como la adenina, que sí contienen nitrógeno. En seguida se presenta el problema de enlazar el azúcar con la base y el azúcar de manera adecuada (y hay varias maneras inadecuadas posibles), y después activar este compuesto (llamado nucleótido), tal vez uniéndolo a otro u otros dos fosfatos que serían los que aportarían la energía necesaria para ligar dos nucleótidos entre sí. La repetición de esta operación conduciría a la formación de la cadena molecular que llamamos ARN. No es fácil comprender cómo pudo suceder esto en una mezcla con otros cuerpos, bastante similares, sin la frecuente incorporación de moléculas inadecuadas en la cadena, a menos que estuviese presente algún catalizador específico. Es posible que haya sido un cuerpo mineral o incluso algún péptido producido por la acumulación casual de aminoácidos, pero esto no se ha demostrado de modo convincente. Aunque tal proceso hubiera ocurrido, tan sólo en una mezcla particular y en determinada ocasión, el resultado sería sólo un ARN con una secuencia de bases muy aleatoria.

Para que se realice la selección natural es necesario un mecanismo duplicador razonablemente exacto. Tenemos ahora un rayo de esperanza. Si, por alguna razón, fuera bastante común la polimerización del ARN, sería muy probable que con el tiempo hubiera conducido a alguna molécula similar a la del ARNT, utilizada hoy día de modo general para sintetizar proteínas. Los enlaces de tal molécula ayudarían a condensar nucleótidos en cadenas cortas de sólo tres eslabones de longitud, y éstas habrían

sido mejores precursores para un proceso de duplicación que los nucleótidos aislados.

Si todo lo que se necesitaba hubiese sido la duplicación, el ARN sería un candidato muy prometedor, pero aunque la duplicación sola puede mantener en marcha un sistema, algo más se requiere para que aumente la competición. Antes de que sea demasiado largo un gen debe hacer algo, si es que ha de alterar mucho su ambiente. Ahora bien, el ARN no es ideal para ello. Indudablemente, en casos favorables, puede elaborar estructuras tridimensionales, pero éstas rara vez tendrían actividad catalítica. Quizá ésta fuera realizada por pequeñas moléculas orgánicas de cualquier clase que abundaran en el caldo ambiental. Algunas de ellas pueden haberse combinado con esmero con ciertas moléculas plegadas de ARN para producir una "enzima" primitiva que ejerciera una poco refinada actividad catalítica, aunque hasta la fecha nadie ha intentado descubrir tales moléculas.

Alternativa más atrayente sería que un sistema primitivo de síntesis proteínica pudiera haber comenzado con una sola molécula de ARN mensajero y de ARNt, es decir, sin ribosomas ni proteínas. Esto parece otra vez una clara posibilidad, pero hasta ahora no ha sido apoyada por experimentos. Tal sistema, si funcionara, superaría muchas de nuestras dificultades conceptuales, aunque subsistirían algunos problemas, por ejemplo: cómo atraer al aminoácido "correcto" para cada tipo de molécula de ARNt.

Una vez puesta en marcha la síntesis y la duplicación del ARN, tal vez pudiera esperarse que se produjeran catalizadores sencillos que hicieran más rápidas y eficientes todas estas reacciones químicas. De ahí en adelante,

la selección natural podría realizarse para refinar y desarrollar el sistema. Atractivo como es esto, todavía no se ha ideado método alguno para verificarlo en todos sus detalles y comprobarlo experimentalmente.

Hay, pues, alguna razón para examinar otras opciones.

Un segundo candidato natural a duplicador primitivo sería alguna proteína primitiva. Esto es interesante porque el caldo casi con seguridad tenía algunos aminoácidos y tal vez buen número de diferentes clases de ellos, aunque (aparte de la glicina, que no es simétrica) la mezcla puede haber tenido aproximadamente partes iguales de los dos isómeros enantiomorfos de dichos aminoácidos. La dificultad consiste en que los aminoácidos no parecen unirse tan bien como lo hacen las bases en los ácidos nucleicos. Ninguna proteína de hélice doble ha sido descubierta, aunque la proteína de la colágena (de los tendones, cartílagos, piel, etc.) consta de tres cadenas de polipéptidos enrolladas unas en otras para formar una hélice triple. Cada tercer residuo debe ser glicina, pero no parece haber clara interacción que pudiera seleccionar los aminoácidos para los otros dos lugares. Además, la colágena tiene una estructura muy regular y parece inerte catalíticamente. Si alguien pudiera sintetizar una forma sencilla de proteína, compuesta quizá de cuatro aminoácidos, que pudiera constituir la base de un proceso de duplicado sencillo (como hacen ADN y ARN), no cabe duda de que sería importantísimo descubrimiento. Mientras esto no suceda, la afirmación de que la proteína fue el duplicador primitivo debe considerarse con reserva.

Esto no significa que la polimerización accidental no pudiera haber producido moléculas proteínoideas que

quizá hubiesen ayudado a la formación antes de que, finalmente, ocurriera la verdadera duplicación, pero este último proceso habría sido necesario para que la selección natural tuviera lugar libremente.

Siempre hay la posibilidad de que el primitivo sistema de duplicación fuese de forma muy diferente, y que por su falta de capacidad a la adaptación y el cambio finalmente hubiera sido remplazado por el actual. Esta idea es difícil de refutar. Por lo menos deberíamos ser capaces de imaginar cómo se efectuó el cambio del sistema inicial, cualquiera que éste fuera, al actual, basado en los ácidos nucleicos y las proteínas. Se ha creído que estructuras arcosas estratificadas pudieron ser las adecuadas, pero no es fácil ver en forma detallada cómo podrían haber reaccionado, y hasta ahora no se ha producido ninguna prueba experimental impresionante que corrobore tal comportamiento.

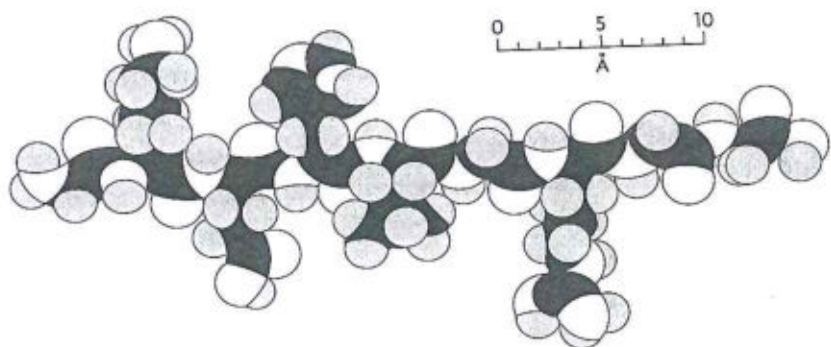
Con todo, parece muy probable que el primer duplicador fuese el ARN. Esta hipótesis ganaría considerablemente si pudiéramos elaborar un sistema sencillo de copiado en el tubo de ensayo sin usar proteínas. Para facilitar, podríamos comenzar con una cadena de ARN preformada que tuviera una secuencia de bases arbitraria y tratar de que se formara la cadena complementaria de acompañamiento mediante el suministro de la materia prima necesaria. Para ello tendríamos que contar con cuatro clases de materia prima y alguna forma de energía química para efectuar la reacción. Hasta ahora el éxito alcanzado ha sido bastante modesto. Los mejores logros, hasta la fecha, son de Leslie Orgel y colaboradores, quienes utilizaron como plantilla poli-C (ácido policitidílico), es decir, un ARN cuya única base constitutiva es la

citosina, a la que añadieron una forma químicamente activada de G (guanina), que es el complemento normal de la citosina. En presencia de iones de cinc (Zn^{++}) —ion presente en todas las enzimas que polimerizan el ácido nucleico— las guaninas fueron unidas lentamente en el enlace correcto (llamado 3' - 5') para integrar una poliguanina de apreciable longitud. En la mezcla de incubación se hallaron moléculas tan largas como las formadas por 40 guaninas en hilera, y quizá habría otras aún más largas, pero en cantidad inferior a la que los actuales medios de detección pueden descubrir. Además, el sistema es exacto hasta donde es posible, pues sólo cantidades muy pequeñas de A (adenina) y U (uracilo) se incorporaron a la cadena (como "errores"), cuando sus precursores también fueron agregados a la mezcla. Es éste un promisorio comienzo, pero para que sea útil tendríamos que ser capaces de observar la duplicación exacta (complementaria) de una particular secuencia de citosinas y guaninas. Hasta ahora no se ha logrado. Dicho sea de paso, no es esencial tener las cuatro bases en el sistema original, pues un ARN con sólo dos de ellas puede incorporar información en su secuencia. Sin embargo, para lograr una buena duplicación, las dos deben ser complementarias.

Aun superadas estas dificultades, el sistema, aunque sencillo, ya es un tanto refinado. Por ejemplo, no es puro en forma natural. Es difícil imaginar cómo pudo formarse en la Tierra primitiva un pequeño sistema con sólo estos dos componentes y no otros. Tampoco es fácil imaginar la manera exacta en que se formaron estos precursores. Cabría esperar que hubieran sido trifosfatos de nucleósido —en términos más sencillos, moléculas cons-

tituidas por una base, un azúcar (ribosa) y tres fosfatos en fila, aunque éstos no fueron exactamente utilizados en el experimento descrito arriba—. Quizá sea posible imaginar cómo se formaron por separado cada uno de estos componentes en un lugar u otro de la Tierra primitiva; menos fácil es pensar en cómo se formó correctamente la combinación y cómo se separó, por lo menos en parte, de otras moléculas semejantes que, si hubieran estado presentes, tal vez habrían obstruido el sistema. Desde luego, nadie hasta ahora ha sido capaz de cocinar un caldo primitivo con agua, sales, unos cuantos gases y luz ultravioleta (o alguna otra fuente de energía) y dejarla cocer para que se formara en ella un ordenado sistema de ARN duplicador. Este fracaso no debe sorprender demasiado, pues la naturaleza debe de haberse tardado millones de años, en muchos lugares de la superficie terrestre, antes de que una feliz combinación de circunstancias produjera un sistema capaz de iniciar la duplicación y a la vez mantenerla en marcha por algún tiempo.

Así pues, nos hallamos en torturante situación. Por un lado, creemos que podría haber habido una provisión bastante adecuada de moléculas orgánicas, aminoácidos en particular, en la superficie terrestre, aunque su concentración en la mayor parte de los lugares debió de ser algo baja. Además, las hélices dobles de ARN o ADN sugieren sin duda que podrían haber formado una buena base para un primitivo sistema de duplicación. Por otro lado, es difícil imaginar cómo pudo haber surgido un sistema exacto de mezcla tan compleja con tanta facilidad, aunque más difícil aún es conjeturar acerca de los componentes exactos necesarios y los precisos pasos que habría seguido el proceso. Además, aun si uno pudiera fi-



Carbono
 Oxígeno
 Hidrógeno
 Nitrógeno

El modelo muestra una cadena polipeptídica corta cuya extensión es de sólo nueve aminoácidos. La espina dorsal de la cadena es regular, con grupos laterales unidos a intervalos uniformes.

gurarse cómo pudo haber comenzado la duplicación del ARN, todavía tendríamos que pensar en cómo tales sustancias se asociaron a una primitiva forma de síntesis de proteínas, si bien ya podemos comenzar a deducir algunas hipótesis acerca de cómo pudo haber sucedido.

Lo que hace que nos sintamos frustrados en nuestro presente propósito es que en apariencia es casi imposible dar *algún* valor numérico a la probabilidad de lo que parece una secuencia de acontecimientos bastante improbable. La dificultad puede verse con mayor claridad si consideramos el siguiente argumento muy burdo. Supongamos que el acontecimiento ocurrió en alguna marisma, cerca de la orilla del mar. Es fácil imaginar que habría una de estas marismas por cada kilómetro de costa o algo así, para no hablar de los que se hallaban dispersos por toda la superficie de nuestro planeta. Tal vez había 100 000 de estos lugares —el número pudo haber sido

fácilmente mucho mayor—. Una vez más, supongamos que a la baja velocidad con que se formaron tales sistemas pudieran pasar unos 100 años antes de que uno comenzara a funcionar. Llamemos p a la pequeñísima probabilidad de que uno de tales acontecimientos sucediera en 100 años. Quizá sucediera p una vez en 1 000 millones. Pero como quizá tenemos 500 millones de años y 100 000 charcos, casi es seguro que la vida comenzó en esas condiciones. Sin embargo, si p fue sólo una oportunidad entre un billón, la probabilidad del comienzo de la vida no sería aún muy escasa. Si p hubiera sido tan pequeña como una entre 10^{15} (1 000 billones), la probabilidad de que la vida comenzara habría sido muy pequeña. La exactitud de las cifras no importa mucho. Las utilizamos simplemente para dar una idea de la magnitud del problema. La incertidumbre nace del hecho de que no tenemos ni idea del valor que debemos atribuir a p , excepto que debió de ser “muy pequeño”. Por tal razón, es imposible para nosotros decidir si el origen de la vida en nuestro planeta fue un suceso muy raro o, por el contrario, de ocurrencia casi segura. Aunque a veces se han propuesto argumentos en favor de la segunda posibilidad, me parecen muy huecos. Sin algún apoyo experimental directo es probable que sigan siéndolo. Y no va a ser fácil obtener apoyo experimental para algo que muy bien pudo haber sido una fortuita secuencia de rarísimas reacciones. Sólo si la vida fue de *muy* fácil comienzo, en virtud de haber en realidad una vía directa a través del laberinto de posibilidades, sería probable que alguna vez fuéramos capaces de reproducirla en el laboratorio, por lo menos en un futuro cercano.

Una persona honrada, que contara con todo el cono-

cimiento de que hoy disponemos, únicamente podría decir que, en cierto sentido, el origen de la vida parece ser, por el momento, casi un milagro, debido a que son tantas las condiciones que tuvieron que satisfacerse para que tuviera comienzo. Pero esto no significa que haya buenas razones para creer que pudo *no* haber comenzado en la Tierra gracias a una muy razonable secuencia de reacciones químicas bastante comunes. El hecho cierto es que el tiempo disponible fue demasiado largo, los muchos y muy diversos microambientes en la superficie de la Tierra; las posibilidades químicas cuyo número era tremendo y nuestro conocimiento e imaginación endeblados en exceso para desembrollar exactamente lo que pudo suceder o no pudo suceder hace tanto tiempo, sobre todo por carecer de pruebas experimentales sobre aquella época con las cuales pudiéramos contrastar nuestras ideas. Quizá en el futuro lleguemos a saber lo bastante para examinar la hipótesis, pero por ahora sólo podemos decir que nos es imposible decidir si el origen de la vida en la Tierra fue un suceso improbableísimo o casi inevitable —o cualquier posibilidad entre uno y otro extremos—.

Si fue algo sumamente probable, no hay problema. Pero si resulta que fue bastante improbable, entonces nos veremos compelidos a considerar si pudo haberse originado en otros lugares del universo donde, por una u otra razón, las condiciones fueron más favorables.

VII. UNA FALACIA ESTADÍSTICA

APESAR de nuestra incertidumbre acerca de cómo empezó la vida, es indudable que ésta existe ahora y en inmensa escala. La vemos en torno nuestro. Seguramente, podría aducirse que, habiendo ocurrido una vez, podemos confiar en que volverá a suceder. Por supuesto, en la mayor parte de los casos es improbable que vuelva a comenzar. Aparte de que las condiciones actuales son muy diferentes de las prebióticas, parece muy verosímil que cualquier nuevo sistema que se intentara implantar en estos tiempos rápidamente sería absorbido por los miembros del sistema que ya existiera. Este punto de vista es un tanto reciente. En el siglo XIX se creía que la vida podría comenzar *de novo*, ya entonces, en pantanos, infusiones, materia descompuesta y otros medios adecuados. Hubo frecuentes informes acerca de gusanos, moscas y aun ratones originados de esta manera. Los primeros experimentos de Redi, Joblot y Spallanzani hicieron esto bastante dudoso; pero los cuidadosos y esmerados experimentos de Pasteur demostraron que tales afirmaciones casi seguramente eran falsas. La ingeniosa construcción del equipo de Pasteur fue eliminando, una tras otra, todas las

objeciones que los críticos creyeron poder oponer. Pasteur demostró fuera de toda duda que en un sistema inicialmente estéril, ningún indicio de vida aparecía, ni aun en el más rico y tentador caldo, aunque se permitiera libre acceso al aire, siempre que se evitara que con éste llegaran al matraz de cultivo cualesquiera microorganismos.

Las cuestiones que nos interesan son otras muy diferentes. Si nuestro planeta volviera a formarse otra vez (con sólo ligeras variantes, de manera que los sucesos no pudieran repetirse con exactitud), ¿cabría esperar que la vida comenzara por segunda vez? Más exactamente: si en algún lugar del universo existiera un planeta muy semejante al nuestro, ¿qué probabilidad habría de que en él surgiera la vida? Incluso en estos casos tiene lugar un poderoso apremio psicológico para hacernos creer que tales sucesos serían sumamente probables, dado el ejemplo que ofrece la Tierra. Por desgracia, este argumento es falso. No sé si tal modo de razonar tiene nombre, pero debería llamársele *falacia estadística*. La manera más fácil de comprender por qué es erróneo es considerar que cualquier suceso bien definido es uno entre un gran número de posibilidades bastante similares. Un mazo de naipes constituye un excelente modelo para tal situación.

Tomemos un mazo de naipes común de 52 cartas bien barajado y repártase al azar en cuatro manos de 13 cartas cada una, sin hacer trampas. ¿Cuál sería la probabilidad de que se hubiera repartido un determinado conjunto de cartas? Podríamos elegir uno que es fácil de especificar, tal como que la primera mano contuviera todos los corazones, la siguiente todos los diamantes, la tercera todas las espadas y la cuarta todos los tréboles, pero esto

no afecta el cálculo; lo que importa es especificar exactamente qué cartas queremos que contenga cada mano. Es fácil calcular con qué frecuencia resultarían dichas manos si las cartas se repartieran una y otra vez de un mazo barajado al azar. La probabilidad de obtener tal mano resulta ser tan pequeña como una en 5×10^{28} . Sin embargo, cada vez que repartimos un mazo obtenemos una distribución u otra en las cuatro manos, y como nuestro cálculo aplicable es también a *esa* distribución, obtener tal mano sería contingencia rarísima. Y no obstante ahí la tenemos en la mesa ante nosotros. Es claro que algo debe estar mal.

Lo que está mal es que, para aplicar el cálculo, hemos de decir *por adelantado* cuál es exactamente la mano de cartas de la que estamos hablando. No nos está permitido repartir las cartas y *después* pretender que el resultado sea precisamente el que buscábamos. Por supuesto, podemos repartir un mazo y después decidir cuál es la combinación que vamos a elegir. La baja probabilidad calculada por nosotros ofrecería entonces la oportunidad de obtener la misma mano en el siguiente reparto, siempre suponiendo que el mazo haya sido escogido adecuadamente al azar. Este argumento podría aplicarse a cualquiera que sea la mano real, de modo que ahora vemos otra manera de considerar la probabilidad de una en 5×10^{28} , es decir, que ésta es la probabilidad de repartir *cualquier* conjunto de cuatro manos *dos veces seguidas*.

Podemos exponer esto de diferente manera diciendo que la composición de *un* reparto, por sí mismo, en realidad nada nos dice respecto a la probabilidad de obtener otra vez exactamente las mismas cuatro manos. Nos dice que tenemos el número justo de 52 naipes en el mazo,

pero por sí mismo no nos dice cuál será la probabilidad de obtener la misma distribución en sucesivas ocasiones. Podemos calcular esto si conocemos todos los parámetros de la situación y el número de manos que vamos a repartir antes de rendirnos. Podemos conocer esto del mazo de naipes, pero la situación prebiótica es más complicada. También hay el factor adicional de que no solemos intentar calcular la probabilidad de que un suceso *idéntico* ocurra una segunda vez. Cualquier forma razonable de vida muy semejante a la actual sería aceptable y contaría como éxito. Una analogía con los naipes podría hacer más claro esto. Pedimos que las cuatro manos sean, cada una, toda de corazones, diamantes, espadas y tréboles, *en este orden*. Pero supongamos que aceptamos como éxito cualquier reparto en el que en cada mano hubiera cartas de una sola denominación. Que este reparto ocurra es 24 veces más probable que el anterior porque es más posible que los mazos satisfagan nuestras condiciones. Cuando consideramos el origen de la vida, este factor —el número de formas de vida semejantes pero no idénticas— es también bastante desconocido, y sólo se añade a nuestra incertidumbre.

En cierto modo, este último punto de vista general reside en la raíz de nuestro problema. Aunque la probabilidad de que la vida comience en determinado tiempo y en determinado lugar parece excesivamente pequeña, son tan numerosos los posibles lugares de nuestro planeta y tanto el tiempo disponible que no podemos estar seguros de que estos factores no anulen la pequeña probabilidad de que alguno de ellos ocurra, tornando así un acontecimiento raro en otro casi seguro. Pero si se piensa un momento, se verá que carecemos de bases objetivas

para llegar a esta conclusión. Como decíamos en el capítulo anterior, la probabilidad total podría ser cualquiera, dependiendo sólo de cómo salieran los varios números.

Hay una razón especial de por qué la falacia estadística se aplica con particular fuerza a nuestro caso. Y ello se debe a que si la vida *no* hubiera comenzado en la Tierra (de una u otra manera), no estaríamos aquí para pensar en el problema. El mero hecho de que *estemos* aquí por fuerza implica que la vida *sí* tuvo comienzo. Por esta razón, si no por otra, no podemos utilizar directamente este hecho en nuestros cálculos.

Parecemos estar en contacto con un inherente fracaso de la mente humana cuando nos enfrentamos a los argumentos de la probabilidad. Los seres humanos, y quizá también otros animales, propendemos demasiado a generalizar partiendo de un solo ejemplo. La palabra técnica para esto, muy interesante por cierto, es *superstición*, aunque muchas formas de superstición contienen asimismo un componente emocional. De igual modo, tenemos problemas al tratar de comprender números muy grandes, de manera que nos sentimos felices cuando, multiplicando un número muy pequeño por otro muy grande, resulta algo que nos hace sentirnos más a nuestras anchas, por ejemplo: una probabilidad cercana a uno. La certidumbre suele estar muy cerca de nuestros corazones, aunque buena parte de ella en la práctica nos elude. La única manera de vencer estas desventajas psicológicas —y en asuntos científicos sin duda son desventajas no obstante lo útiles que hayan podido ser en la evolución— es exponer nuestros argumentos fría y claramente. Una “reacción visceral” tal vez sería útil en los negocios, en la política o en nuestra vida personal, por

cuanto representa una generalización inconsciente de experiencias anteriores, nuestras o de nuestros antepasados, expresadas en nuestros genes; pero al considerar el origen de la vida carecemos realmente de experiencia que nos guíe en este sentido, de modo que cualquier reacción visceral es probable que sea superficial y engañosa. Es aún menos útil para enfrentarnos a la posibilidad de que la vida haya evolucionado independientemente en otros lugares. Es muy poco lo que sabemos de los planetas de nuestro Sistema Solar y nada en absoluto, salvo por inferencia muy indirecta, de los que giran en torno de otras estrellas. Quizá haya en el universo muchos lugares adecuados para que aparezca la vida, de los cuales algunos pudieran tener condiciones más favorables que las que prevalecen aquí. Ahora nos dedicaremos a estos problemas.

VIII. OTROS PLANETAS HABITABLES

NUESTRO principal interés radica en la vida, tal como la vemos, basada en compuestos de carbono disueltos en agua. Nos enfrentamos a un universo de vastas dimensiones, sobre todo vacío, pero con uno que otro lugar adecuado para una forma de vida no diferente de la nuestra. ¿Cuántos de estos lugares es probable que existan?

Quizá la condición más estricta sea la existencia de agua líquida. Es probable que el agua sea un compuesto bastante común, pero debe conservarse en algún ambiente que no sea tan frío como para que exista únicamente en forma de hielo, ni tan caliente que sólo exista en forma de vapor. El problema se verá con mayor claridad si expresamos la temperatura en grados Kelvin, la llamada escala absoluta. Ésta se basa en la escala de grados centígrados o de Celsius, en la cual el agua, en condiciones normales de presión, se congela a 0°C y hierve a 100°C . En la escala absoluta esta diferencia sigue siendo de 100° , pero se toma como 0° o cero absoluto de temperatura —que, hablando en términos generales, es la temperatura en que cesa por completo cualquier movimiento molecular—. En tal escala, el hielo funde a unos 273°K y

hierva 100 grados más arriba, o sea, a unos 373°K . Debemos señalar estos dos números ante la desolada frigidez del espacio, cuya temperatura es, muy aproximadamente, de 4°K , sólo un poco más arriba del cero absoluto, y la temperatura de la superficie del Sol que, en números redondos, es de 5000°K . Debido a que necesitamos una temperatura cercana a los 300°K , vemos inmediatamente que sólo la encontraremos en la relativa proximidad de una estrella, pero no demasiado cerca de ella. La mayor parte del universo no sólo estaría demasiado vacía, sino también sería demasiado fría. El sencillo argumento expuesto supone que la presión del gas sobre el agua debe ser bastante semejante a la presión atmosférica ejercida sobre la superficie de nuestro planeta. Si la presión fuera superior, toleraríamos una temperatura ligeramente superior y todavía el agua se conservaría en estado líquido, aunque la presión sólo altera la gama de temperaturas en medida limitada.

El otro requisito principal es que las moléculas del agua no escapen al espacio. Siempre habrá en la atmósfera cierta cantidad de vapor de agua, por encima del agua líquida, cualesquiera que sean la presión y la temperatura, y, a menos que las fuerzas de gravedad fueran suficientemente poderosas, la velocidad de la agitación molecular causada por el calor provocaría que una molécula ocasional fuera impulsada a tan alta velocidad que escaparía al espacio en lugar de volver a caer atraída por la fuerza de gravedad. La velocidad de escape de un cohete disparado desde la superficie terrestre es de unos 11.3 km por segundo, mientras que a la temperatura de una habitación la velocidad *media* de las moléculas del agua es un poco mayor que la velocidad del sonido, es decir, unos 320 m

por segundo. Éstas son sólo un promedio; una considerable fracción de las moléculas de la atmósfera viaja con mayor rapidez, sobre todo si la temperatura es alta; pero el margen de seguridad es lo bastante grande para que sean muy pocas las moléculas del tamaño de las del agua, el O_2 o el N_2 que se pierden en el espacio. Moléculas mucho más ligeras, como las del H_2 , se mueven con bastante más rapidez debido a que las moléculas mayores que chocan con ellas las impelen con fuerza dado que su masa es mucho mayor. (La masa del H_2 es 2; la del H_2O , 18; la del N_2 , 28.) Las partículas moleculares o atómicas del hidrógeno son constantemente impulsadas fuera de la atmósfera. Por otro lado, la Luna, aunque de tamaño bastante razonable, tiene una masa demasiado pequeña que le impide retener aunque sea por un momento cualquiera de los gases comunes. Si alguna vez tuvo atmósfera debió de haberla perdido a lo largo de los muchos millones de años transcurridos desde su formación.

Considerado en forma detallada, el problema de la atmósfera del planeta resulta complicado porque depende no sólo de la cantidad y clase de energía radiada por la estrella madre y la distancia entre ésta y el planeta, sino también de otros factores, tales como la cantidad de energía reflejada por la superficie del planeta (que es mucho mayor si la reflejan la nieve o el hielo que si la reflejan el campo o la selva) y la reflejada por las nubes. Depende también de la composición molecular de la atmósfera. El CO_2 retendrá en gran cantidad el calor irradiado por el planeta, produciendo en éste el efecto llamado de "invernadero". Pero dejando de lado todos estos detalles, podemos ver que el requisito fundamental es que su tamaño no sea menor que cierto mínimo —tamaño no

muy diferente del de la Tierra—, que su distancia de la estrella madre sea tal que el planeta no resulte demasiado caliente (como Mercurio) ni tampoco demasiado frío, como lo sería si estuviera tan lejos (como Júpiter), y que no tenga fuente de calor adicional.

Rige también cierta restricción en cuanto al tipo de la estrella. La rapidez con que la estrella consume su combustible nuclear depende mucho de su masa. Una estrella grande agota su combustible con mucha rapidez. Por lo tanto, es demasiado caliente y emite gran cantidad de energía en torno de ella. Cualquier planeta que tuviera agua líquida en su superficie habría de estar mucho más lejos de su estrella madre que lo que la Tierra está del Sol. Esto en sí mismo no causa problema. La dificultad radica en el tiempo relativamente corto en que tal estrella emitiría luz y calor. Una estrella demasiado grande apenas duraría unos 10 millones de años. Este tiempo difícilmente parece lo bastante largo para que la vida evolucionara en forma apreciable. Por otra parte, el Sol ha radiado con mucha uniformidad por más de 4 000 millones de años y tal vez seguirá haciéndolo por lo menos durante igual tiempo.

Las estrellas cuya masa es mucho menor que la del Sol plantean una dificultad diferente. Pueden brillar de manera uniforme mucho más largo tiempo, por lo que no causa preocupación disponer de tiempo para la evolución de la vida. Como tal estrella emite menos energía, cualquier planeta habitable debería estar más cerca de ella que la Tierra del Sol. Por esta razón, sólo habrá una *escala* de distancias bastante pequeñas si el planeta ha de reunir las condiciones que necesitamos. Una distancia menor y el planeta sería tan caliente que el agua herviría;

una distancia un poco mayor, y el agua se congelaría. Así pues, cabe esperar encontrar algunas estrellas más pequeñas con planetas habitables, pero su número será bastante pequeño, pues las condiciones exactas serían más difíciles de cumplir. Aun para las estrellas del tamaño de nuestro Sol, el margen puede ser tan pequeño que sólo uno que otro sistema planetario tendría un planeta situado precisamente en el lugar adecuado, como sin duda es el caso de nuestro Sistema Solar.

En resumen, necesitamos una estrella que no sea demasiado grande ni su vida excesivamente corta, ni pequeña en exceso, porque entonces la probabilidad de que existiera un planeta habitable sería muy ligera. Por fortuna, el Sol es una estrella mediana. Resulta que muchas estrellas tienen un tamaño aceptable. Lo que ahora necesitamos saber es si tales estrellas en general tienen planetas que giren en torno de ellas.

Por desgracia, no hay ninguna teoría ampliamente aceptada del origen del Sistema Solar a pesar de todas las nuevas pruebas experimentales que han ido acumulándose gracias a la investigación del espacio cuando menos de 10 años a la fecha. En la primera parte de este siglo se conjeturaba que el Sistema Solar se había formado de una corriente de materia desprendida del Sol por el acercamiento de otra estrella. En consecuencia, tendría que haber sido un suceso muy raro y, por lo tanto, serían unas cuantas las estrellas que tuvieran sistemas planetarios. Un tratamiento teórico más detallado ha demostrado que un suceso de tal naturaleza sería muy improbable que hubiera dado origen a los planetas tal como los conocemos. Las teorías más recientes están ligadas al origen del Sol mismo. Se supone que éste se habría condensado por la gra-

vedad de una nube de polvo y gas lentamente giratoria, cuya velocidad de rotación aumentaba a medida que los diámetros del sistema se hacían más pequeños a causa de la conservación del momento angular. Esta rotación habría producido un disco aplanado, del cual, según se cree, se habrían formado los planetas en virtud de una condensación adicional, otra vez causada por la atracción de la gravedad. Cómo sucedería exactamente esto —por ejemplo: si la explosión de una supernova cercana fue necesaria para poner en marcha el sistema— no está claro por completo. Así pues, no es posible decir con plena confianza, con base exclusiva en argumentos teóricos, que los sistemas planetarios probablemente son frecuentes, si bien cabe sospechar que tal es el caso. En consecuencia, debemos examinar las pruebas experimentales.

Éstas resultan ser muy escasas. Los planetas son demasiado pequeños y la luz que reflejan de su estrella madre es débil en exceso para que podamos descubrirla por observación directa, ni siquiera la de las que pudieran girar en torno a las estrellas más próximas. Un planeta grande influirá ligeramente sobre la órbita de la estrella en torno de la cual gira —una y otra girarán alrededor de un punto que representa su centro de gravedad común—. En casos muy favorables, sería posible observar el movimiento de una de tales estrellas, y en realidad en cierto caso se pensó que podía detectarse tal irregularidad de la rotación. Sin embargo, ahora se sospecha que los efectos observados se debieron a un error experimental porque el movimiento previsible es muy pequeño.

Por lo tanto, a primera vista el problema parece no tener solución. Si así fuera, lo único que podríamos hacer sería sentarnos y esperar nuevos o muy mejorados

métodos de detección. Pero hay un efecto que puede observarse con bastante facilidad y que podría darnos la clave. La distribución del momento angular (en términos aproximados, la cantidad de espines, el total de los cuales, en un sistema cerrado, tiene que permanecer constante) en nuestro Sistema Solar es bastante extraña. Definido de esta manera, la mayor parte de los espines se ha encontrado en los planetas y muy pocos en el Sol. Es posible que el protosol girara al principio mucho más rápido y, en consecuencia, la nube de polvo que giraba en torno del Sol lo hiciera con mayor lentitud. Mediante cierto mecanismo (y se han propuesto detalladas sugerencias acerca de cómo pudo suceder tal cosa) el espín se transfirió del Sol a la nube de polvo, con lo que se lentificó el Sol y se aceleró la nube.

Por fortuna, la velocidad del espín de una estrella en muchos casos puede detectarse mediante el estudio cuidadoso de la luz que aquélla emite, pues en uno de sus bordes la materia de la estrella giratoria puede moverse hacia nosotros y el borde opuesto se alejaría. Estos movimientos alternan la frecuencia de la luz que nos llega, en virtud del efecto Doppler. Se ha descubierto experimentalmente que las estrellas cuyo tamaño es aproximado al del Sol se colocan más o menos en dos clases. El espín de algunas de ellas es muy rápido, como se podría esperar por el modo de su formación inicial, mientras que otros espines al parecer giran mucho más lentamente. Resulta tentador creer que las estrellas de este segundo tipo se han lentificado porque poseen un sistema planetario. Si esta clase de hipótesis fuera correcta, los planetas abundarían.

Por desgracia, realmente es la única prueba posible en favor de la existencia de otros planetas. En la ciencia

siempre es más cómodo si dos o más líneas de razonamiento distintas llevan a la misma conclusión. Aquí sólo tenemos una. La experiencia ha demostrado que tal conclusión puede ser aceptada sólo con reservas. Dicho esto, hemos de conceder que la prueba directa de las rotaciones estelares realmente es muy convincente; la conclusión acerca de la existencia de planetas que giran en torno de estrellas de lenta revolución resulta bastante plausible y está de acuerdo con nuestras teorías generales de cómo pudieron haberse formado las estrellas y los planetas. En resumen, parece más verosímil que los planetas sean más abundantes que raros.

Hay otro factor que hemos considerado acerca de la posible existencia de otros sistemas planetarios. Así como es bastante fácil detectar el giro de una estrella mediante el estudio minucioso de la luz que nos envía, de igual manera podemos detectar las estrellas dobles, es decir, estrellas muy juntas que giran en torno de otra y mantenidas en sus órbitas por su mutua fuerza de gravedad que las atrae. No es necesario que las dos estrellas sean del mismo tamaño y tipo y, de hecho, a menudo son bastante diferentes una de otra. Hasta cierto punto tales sistemas múltiples son comunes, siendo más bien la regla que la excepción. Ahora bien, un sistema planetario que girara en torno de un par de estrellas, cada una de las cuales girara en torno de la otra, quizá fuera menos estable que uno semejante al nuestro, que tiene como centro una sola estrella. Las estrellas dobles, a menos que estuvieran muy juntas (en cuyo caso su efecto de gravitación sobre los planetas sería casi del mismo orden que el de una sola estrella) podrían perturbar las órbitas de los planetas, pues a veces un planeta estaría más cerca de una

estrella y, por lo tanto, un poco después de la otra. Esto no sólo haría que la energía que recibiera determinado planeta variara periódicamente, sino, lo que es más importante, los planetas estarían en gran peligro de chocar unos contra otros. La constancia de las condiciones durante largo tiempo, que creemos necesaria para la evolución de las formas superiores de vida, no será fácil que ocurriera en tales sistemas planetarios. Así, aunque muchas estrellas dobles tuvieran planetas, en éstos las condiciones no serían las ideales para la evolución de la vida. Por supuesto, por lo que sabemos, un poco de variación sería favorable, y también desviar la evolución de su carril de cuando en cuando, pero es difícil creer que la vida pudiera subsistir después de un verdadero choque de un planeta contra otro.

Persiste el problema de la atmósfera del planeta. De ello hemos hablado ya en el capítulo VI. Aquí ampliaremos la exposición para abarcar planetas que se hallan fuera del Sistema Solar. Como hemos visto, es difícil por ahora determinar cómo fue la atmósfera de la Tierra primitiva. Y se vuelve aún más difícil si desconocemos el tamaño exacto de la estrella, el tamaño exacto del planeta y la distancia que los separaba. En el Sistema Solar, Venus no es diferente de la Tierra, pero está un poco más cerca del Sol y su tamaño es un poco menor que el de nuestro planeta. A pesar de esto, su atmósfera es muy diferente de la nuestra: mucho más caliente, muy densa (la presión en la superficie es más de 100 veces mayor que la presión atmosférica en nuestro planeta), y en gran parte está formada por CO_2 . Esta elevada concentración de bióxido de carbono produce un efecto de invernadero al atrapar la radiación térmica que intenta escapar al es-

pacio, y esto, añadido a la mayor corriente de energía que proviene del Sol, eleva la temperatura a casi 720°K . Esta elevada temperatura causa la alta densidad del CO_2 en la atmósfera, por cuanto es lo bastante elevada para evaporar parte del carbonato de las rocas. En la Tierra, aunque los carbonatos son muy abundantes —como en los acantilados blancos de Dover— la temperatura es lo suficientemente baja para que casi toda esta sal permanezca en forma sólida o disuelta en los océanos. En pocas palabras, una diferencia relativamente pequeña en las condiciones que prevalecen en un planeta puede causar una diferencia muy grande en la atmósfera.

Así, es posible que pueda encontrarse un planeta cuya masa sea mayor que la del nuestro, aunque a tal distancia de su estrella que contenga agua líquida en su superficie. Si el planeta fuese lo bastante masivo, podría retener el hidrógeno que abunda en la nube de polvo (como sucede con nuestros planetas exteriores, como Júpiter) o, por lo menos, perderlo con mucho mayor lentitud. La atmósfera resultante, siendo reductora, podría ser muy favorable para la producción de un bueno y “sabroso” caldo en su superficie. Así, por lo menos es posible la existencia en el universo de lugares más favorables para que en ellos comience la vida que en cualquiera de los pertenecientes a nuestro Sistema Solar.

Aunque el nuestro parece un planeta de tipo bastante mediano girando en torno a una estrella muy mediana, no tenemos la seguridad de que en el sistema existan características especialmente favorables para dar origen a la vida. Posible ejemplo de ello es nuestra Luna. Las lunas son muy comunes en los planetas del Sistema Solar, pero por analogía con los otros planetas cabría esperar que la

Tierra tuviese varias lunas más pequeñas que la que vemos brillar sobre nosotros, que es grande. El origen de la Luna se desconoce todavía. Parece probable que sea un fragmento de nuestro planeta. ¿Se formó al mismo tiempo que la Tierra o ésta la capturó más tarde, habiéndose formado en otro lugar del Sistema Solar? Tal vez nuestra Luna se fundió con un conjunto anterior de lunas más pequeñas.

Cualquiera que haya sido el origen de la Luna, podría suponerse que estuvo considerablemente más cerca de nuestro planeta en aquellos antiguos tiempos. La Luna provoca las mareas en la Tierra. Esta fricción no sólo lentifica la rotación de nuestro planeta, que debió de ser mucho más rápida en aquellos días, sino que, por acción recíproca, poco a poco obliga a la órbita de la Luna a ampliar el radio. Cuando la Luna estaba más cerca de la Tierra, las mareas debieron de ser mayores. Cuán mayores hayan sido depende de cómo se originó la Luna y cómo cambió su órbita. Es posible que al principio fuera atraída cuando recorría su órbita en sentido contrario al actual, y que después fuera contrayéndose gradualmente y cambiara a la conocida dirección de rotación, pasando en el proceso de girar sobre los polos. Si tal fue el caso, las mareas debieron ser mucho mayores en aquella época. Esto pudo causar efectos muy diversos. Sin ellos pudo haber existido una gruesa capa de hidrocarburos sobre todas las aguas de nuestro planeta. Estas antiguas mareas podrían haber revuelto esta capa de hidrocarburos convirtiéndola en una emulsión, produciendo quizá condiciones más favorables para que surgieran las primigenias células. Estas grandes mareas pudieron haber producido en gran escala una continua serie de inundaciones y de-

secaciones en depresiones cercanas a las orillas del mar y los océanos. Y también de esta manera pudieron haberse creado condiciones favorables para la síntesis prebiótica. En términos generales, las grandes mareas moverían cosas de un lado a otro y con ello darían lugar a mayor variedad en la superficie de la Tierra primitiva.

Un efecto más sutil pudo ser causado por el desplazamiento de los continentes. De no ser por la tectónica de placas —el desplazamiento de varias placas sobre la superficie terrestre— no habría habido formación de montañas. En tal caso, el continuo desgaste erosionaría la tierra, y los detritos se verterían (como ahora sucede en los ríos) en el mar, hasta que todo el planeta quedara sumergido bajo los océanos. Esto no impediría por completo el surgimiento de la vida, pero si hubiera ocurrido en época muy temprana, habría dificultado el origen de la vida. De hacerlo más tarde, los organismos superiores quizá hubieran evolucionado de manera muy diferente. No es fácil imaginar cómo hubiese surgido la ciencia moderna si no hubiera habido tierra firme seca, aunque sería temerario afirmar que no la hubiese habido.

Tal vez las montañas se formaron porque el interior del planeta es bastante líquido y las rocas no lejanas de la superficie son lo bastante plásticas como para permitirles ceder en grado considerable. Estas condiciones se deben a que el interior de la Tierra es muy caliente (en cálculo muy aproximado, esta temperatura es casi como la de la superficie del Sol). Entre otros factores, quizá esto dependa de la radiactividad de las rocas, sobre todo las que contienen isótopos de uranio, torio y potasio. El porcentaje de átomos radiactivos en las rocas no es alto, pero el planeta contiene tanta materia que en suma llega a ser

considerable cantidad. Además, tal desintegración radiactiva produce una cantidad de energía relativamente grande. Este calor, añadido al que persiste desde los tiempos en que la Tierra se solidificó, es contenido por el tremendo grosor de la corteza terrestre y por su baja conductividad térmica, de manera que esta pequeña provisión interna de calor puede mantener muy elevada la temperatura gracias a su buen aislamiento.

Teniendo presentes todas estas complicaciones, retrocedamos y tratemos de hacer un cálculo muy aproximado del número de planetas de la galaxia que tienen una solución acuosa de compuestos orgánicos en la superficie—un caldo poco denso del cual es imaginable que puede surgir la vida—. El número total de estrellas de toda clase en nuestra galaxia se calcula que es de unos 10^{11} (100 000 millones). Sólo algunas de ellas serán del tamaño apropiado y unas cuantas no serán estrellas dobles. Tal vez una estrella de cada cien satisfaría estas dos condiciones. Esto nos dejaría 10^9 estrellas posibles. Aunque sólo una de cada diez de estas estrellas tuviese sistema planetario, generalmente de la clase adecuada, tendríamos aún 10^8 de ellas. Es más difícil calcular cuántas de estas estrellas tienen un planeta de tamaño adecuado y a la distancia conveniente de su superficie, pero quizá una de cada cien sería un cálculo conservador. Nos quedaría así un millón de planetas en nuestra galaxia en los que pudiéramos encontrar océanos de caldo orgánico poco denso en los cuales podríamos esperar que surgiera la vida.

Como se ve inmediatamente por lo burdo de nuestros cálculos, queda suficiente espacio para debatir acerca del monto probable de cada una de estas cifras. El cálculo que hemos hecho de un millón podría ser demasiado bajo. El

punto principal es que es difícil creer que resulte demasiado alto por tan grande factor que no hay otro planeta semejante a la Tierra en ninguna parte de la galaxia. Para que esto fuera cierto, nuestro cálculo tendría que ser por lo menos un millón de veces demasiado alto. Claro que puedo estar totalmente equivocado respecto a los sistemas planetarios. Es posible que fueran en extremo raros —ello significaría que la lenta rotación de estrellas semejantes a nuestro Sol tendría alguna otra explicación—. Podría haber algunas condiciones sutiles que hubiéramos pasado por alto, de modo que si bien los sistemas planetarios abundan, en realidad la Tierra es una cosa extraordinaria y que los planetas semejantes a ella son rarísimos, si es que los hay. A falta de alguna prueba experimental directa, no podemos estar seguros de que nuestros burdos cálculos no tengan alguna falla. Un error pequeño nada significaría. Incluso si nuestro cálculo es 100 veces demasiado alto, todavía dejaría 10 000 planetas habitables en la galaxia. Por el momento sólo hay una conclusión razonable, por frágil que sea. Es probable que los planetas con caldo adecuado sean muy abundantes en nuestra galaxia.

Esto no implica que tales planetas estén bastante juntos. Aunque hubiera un millón de ellos, la distancia media que separara a unos de otros sería de unos cuantos centenares de años luz. Si sólo fueran 10 000, la distancia entre ellos sería unas 10 veces mayor que la anterior. Por supuesto, nuestros cálculos bastante conservadores pueden ser demasiado bajos, en cuyo caso apenas los separarían unos 10 años luz, pero distancia tan extremadamente corta parece muy improbable. Aun así, un cohete que se desplazara con velocidad 100 veces menor que la de la luz tardaría 1 000 años en recorrerla.

IX. CIVILIZACIONES SUPERIORES

ACABAMOS de ver que parece más que probable la existencia en nuestra galaxia de muchos otros planetas que tengan en la superficie gran cantidad de solución acuosa de moléculas orgánicas de la clase necesaria para que sirvieran como hileras de ladrillos para elaborar un sistema vivo. También hemos visto, en el capítulo VI, que por ahora no podemos formarnos una idea clara en cuanto a si de tal caldo es posible obtener un primitivo sistema vivo en un plazo razonable —es decir 1 000 millones de años—, o si la mayor parte de estos caldos está condenada a permanecer estéril casi indefinidamente, porque el origen de la vida es un acontecimiento en extremo raro. En este capítulo vamos a considerar otro problema.

Suponiendo que un sencillo sistema de duplicación hubiera logrado mantenerse en evolución, ¿cuál sería la probabilidad de que llegara a una fase evolutiva semejante a la nuestra?

Al considerar lo que sabemos acerca de las fases de la evolución en nuestro planeta descubrimos una cosa bastante curiosa. Los organismos más sencillos parecen ser los que han tardado más tiempo en su evolución. Las más

antiguas huellas de vida que hasta ahora se han descubierto se encuentran asociadas con rocas cuya antigüedad se remonta a 3 600 millones de años. Tal vez los organismos multicelulares aparecieron hace 1 400 millones de años, pero el testimonio fósil formado por animales sencillos cuyas partes duras se han conservado sólo tiene 600 millones de años de antigüedad. Estos acontecimientos aparecen marcados en la carta cronológica de la página 20 de este libro.

Una investigación adicional podría demostrar la existencia de organismos unicelulares hace más de 3 600 millones de años. En consecuencia, el tiempo disponible para la evolución precelular —que hemos considerado el paso difícil— apenas pudo haber llegado a los 1 000 millones de años, y aun quizá haya sido considerablemente más corto. A cambio de esto, el tiempo necesario para que los organismos unicelulares dieran el siguiente y decisivo paso parece ser de unos 2 000 millones de años o, quizá, un poco más. Después de esto, la evolución parece haberse acelerado. Los primitivos mamíferos aparecieron hace sólo 200 millones de años y, en realidad, no se diversificaron para dar formas similares a la mayor parte de las actualmente existentes hace apenas 60 millones de años.

Seguramente, un paso decisivo fue el origen de los eucariotos, es decir, los organismos poseedores de verdadero núcleo, capaces de realizar el proceso mitótico y con protoplasma dotado de mitocondrios, que le proveen energía. Las plantas adquirieron cloroplastos para realizar la fotosíntesis. Se cree que estos progresos fueron esenciales para la evolución de vegetales y animales superiores. Desde luego, los organismos que no experi-

mentaron tales progresos, como las bacterias y las algas verdiazules, han subsistido con estructura más o menos sencilla, aunque bien adaptados a su ambiente.

No sabemos con claridad cuán difícil fue este paso. Hay poderosas razones para suponer que los mitocondrios de nuestras células son descendientes de ciertos organismos primitivos de vida independiente que infectaron otras células muy diferentes de ellas, y aprendieron a vivir simbióticamente con ellas. Tal vez la adquisición de la movilidad celular y con ella la capacidad para realizar la fagocitosis —englobar partículas de alimentos y aun organismos enteros— explique toda la diferencia. Comoquiera que sea, parece que para que esto sucediera llevó mucho tiempo, y ello sugiere que fue un acontecimiento muy insólito. Si, por alguna razón, la probabilidad de que tal suceso ocurriera hubiese tenido tan sólo la mitad de su valor real, podría no haberse dado nunca, incluso en esta última época de la historia del planeta. En tal caso, la Tierra de nuestros días estaría poblada por bacterias y algas y poco más.

Tal argumento no puede aplicarse a *todas* las etapas de la evolución. Una vez aparecidos los animales primitivos con músculos y nervios, podemos confiar en que, dado un buen mecanismo molecular para la rápida evolución, se desarrollaría un sistema visual. La capacidad de ver confiere a los animales considerable ventaja selectiva y, lo que es más importante, este desarrollo ocurrió por lo menos en tres diferentes etapas de la evolución: en los insectos, los moluscos (tales como el calamar y el pulpo) y en los vertebrados (peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos). Cualquier cosa que haya sucedido varias veces en forma independiente en la evolución no es probable

que fuera un fenómeno muy raro. Los pasos que ocurrieron sólo una vez y sobre todo los que al parecer tardaron mucho tiempo, son de los que podríamos sospechar que fueron causados por un feliz accidente y, en consecuencia, no deberíamos confiar en que proceso semejante ocurrirá en otro lugar.

Es difícil concluir cuántos de tales pasos pueden haber ocurrido. Otro posible ejemplo es el de la extinción de los dinosaurios. Hace unos 60 millones de años, los dinosaurios, que en aquella época eran los vertebrados que predominaban, sobre todo los terrestres, de repente se extinguieron, junto con gran número de otras especies animales y vegetales. Dos físicos, Álvarez y Álvarez (padre e hijo), y sus colaboradores advirtieron la existencia de una delgada capa de arcilla que se depositó por aquel tiempo; la analizaron y hallaron que tenía inusitada composición isotópica, con desusual cantidad de vanadio. Examinaron tres lugares ampliamente separados y en todos encontraron esta capa de arcilla, lo cual indicaba que la había producido algún fenómeno de alcance mundial. La composición isotópica era compatible con el origen extraterrestre atribuido a parte del material. Los investigadores propusieron la hipótesis de que un asteroide, de unos nueve kilómetros de diámetro, había chocado contra la Tierra, produciendo en ella tremenda cavidad y lanzando a la atmósfera enorme cantidad de materia que, esparcida por los vientos, se extendió por todo el mundo y obstruyó la luz del sol durante varios años, hasta que, al fin, sedimentaron las más pequeñas y ligeras partículas. (Todavía se recuerda que, después de la erupción del Krakatoa, se observaron asombrosos crepúsculos en todo el planeta durante varios años a causa

del polvo suspendido en la atmósfera.) Como resultado de la casi total obstrucción de la luz solar, muchas plantas quizá murieron, sobre todo el fitoplancton oceánico. Muchas especies podrían haberse extinguido, aunque las plantas con semillas muy resistentes renacerían una vez que, por fin, volvió a brillar la luz del sol. Como resultado de esta pérdida masiva de materia vegetal, la cadena alimentaria fue trastornada por completo, y ello debió de haber sido mortal especialmente para los grandes animales que formaban el extremo superior de tal cadena. De esta manera, se extinguieron todos los dinosaurios, excepto, tal vez, unos cuantos de los pequeños, antepasados de las aves. Los primeros mamíferos habían evolucionado hacía 200 millones de años, pero cuando ocurrió la catástrofe aún no habían alcanzado un alto grado de evolución, tal vez porque permanecían dominados por los dinosaurios. Casi todos estos primitivos mamíferos eran pequeños insectívoros nocturnos, lo que quizá les permitió sobrevivir durante largos años de oscuridad. Cuando por fin retornó la luz, los mamíferos evolucionaron con rapidez para ocupar los nichos ecológicos que los dinosaurios extintos dejaron vacíos (igual que los pinzones de Darwin se extendieron sobre las islas Galápagos) y pronto formaron muchas nuevas especies cuyos descendientes vemos hoy en torno nuestro. Una rama, la de los primates, desarrolló buena visión para los colores y agrandó su corteza cerebral para llegar en último término al hombre.

La pregunta clave es: si la evolución de los dinosaurios no hubiera sido interrumpida, ¿alguna inteligencia animal habría evolucionado lo suficiente para crear ciencia y tecnología? A esto no podemos responder con cer-

teza, pero abrigamos la secreta sospecha de que los dinosaurios se habían especializado en el sentido erróneo. Si así fue, entonces la evolución en la Tierra de una inteligencia superior en esencia dependió de la violenta sacudida dada a la evolución por el asteroide. Tal colisión puede no haber sido un acontecimiento único. Se conocen otras extinciones más tempranas, reveladas por el testimonio de los fósiles. Podemos esperar que un gran asteroide choque contra nuestro planeta con una frecuencia media de una vez cada 200 millones de años, aunque todavía no se ha documentado si estas extinciones más tempranas se debieron a algún choque de este género.

Es posible que la evolución, a la larga, produzca siempre alguna criatura con alto grado de inteligencia, por cuanto en la lucha por la existencia el inteligente suele vencer. Pero serían necesarios cambios muy grandes en el ambiente para dar mayores pasos en la evolución. De ser así, esto impone otra condición a los probables sistemas planetarios para evolucionar hacia superiores formas de vida, en tiempo razonable.

X. ¿CUÁN PRONTO PUDO COMENZAR LA VIDA EN LA TIERRA?

HASTA ahora hemos considerado *dónde* pudo haber comenzado la vida en el universo y cuán raro es probable que haya sido el acontecimiento. Nada hemos dicho sobre *cuándo* pudiera haberse iniciado ni tampoco cuánto tiempo ha sido necesario para progresar desde los primeros comienzos hasta las civilizaciones superiores capaces de enviar cohetes a otros sistemas planetarios. Estrictamente hablando, no podemos hacer un cálculo más firme en cuanto al tiempo que la evolución necesita que el cálculo en cuanto a la probabilidad de determinada etapa, excepto que podríamos negarnos a creer que el proceso entero pudiera haber ocurrido con rapidez mucho mayor que en el planeta. No hay teoría detallada de la evolución tan cuantitativa que nos permita calcular cuánto tiempo es probable que haya requerido cualquier fase particular. Vemos que puede depender de factores tales como el índice de mutaciones, el tiempo de generación, la magnitud de la población que se mezcla con otra y, sobre todo, de las presiones selectivas producidas por el ambiente en general y por otras especies en particular. La estabilidad ambiental, una gran población endogámi-

ca y largo tiempo de generación tienden a lentificar los cambios. Los mecanismos de aislamiento, geográficos o biológicos, que originan poblaciones pequeñas pueden producir nuevas especies con bastante rapidez. Cualquier especie que se enfrenta a muchas oportunidades y pocos rivales, como suele suceder cuando nuevas tierras se colonizan por primera vez, es probable que se diversifique con gran rapidez para llenar todos los nichos ecológicos disponibles. Pero en todos estos casos resulta difícil *predecir* la rapidez de evolución, salvo en forma muy aproximada. En sentido muy profundo, la evolución es un proceso cuyo curso es *forzosamente* impredecible. Sólo cuando sea probable que cierto atributo confiera una ventaja abrumadora (tal como el ser capaz de ver), podemos confiar en que acabará por aparecer, de una manera u otra. Aun en ese caso sería temerario predecir qué forma adoptará el sistema visual. Lo más que podemos decir del sistema nervioso de un animal superior es que podría evolucionar de modo que el animal no sólo perciba las señales claras que incidan sobre sus órganos de los sentidos y responda a ellas, sino también aprecie las características de estas señales que correspondan a aspectos particulares del mundo real, y sobre todo a los que afecten la supervivencia y la reproducción del animal: el olor de un depredador, la presencia de una hembra, etc. Pero es casi imposible predecir cuánto tiempo tardará el cerebro animal en adquirir por evolución determinada función compleja.

La pregunta más fácil que podemos tratar de responder sería ésta: si la vida volviera a comenzar sobre el planeta, con sencillos cambios en el ambiente (de modo que no se repitiera exactamente el proceso), ¿cuánto tiempo

pasaría antes de que apareciera una criatura semejante al hombre? Sabemos que este proceso ha tardado unos 4 000 millones de años. Sería concebible que sucediera de nuevo en tan sólo 1 000 millones de años, pero un lapso mucho menor que éste nos obligaría a ser incrédulos. Por otra parte, se hubiera requerido un periodo mucho más largo de no haber ocurrido uno o dos accidentes felices. Parece casi imposible llegar a una conclusión, y en cuanto a la vida en otro planeta muy diferente del nuestro, la dificultad se complica.

En consecuencia, me veré obligado a quebrantar las reglas impuestas por el cálculo de probabilidades y suponer que la vida, una vez comenzada en cualquier lugar, evolucionaría casi con la misma rapidez que lo hizo en el planeta, es decir, que la evolución tardaría unos 4 000 millones de años desde que se formó el caldo hasta llegar al hombre. De todo lo que llevamos dicho se desprende que tal suposición es desesperadamente improbable, a menos que pudiera demostrarse que *todos* los pasos importantes de la evolución tienen un alto grado de certeza. Si esto fuera cierto, las demoras y aceleraciones aleatorias tenderían a promediar la duración y, en total, la rapidez sería semejante a la del proceso en la Tierra. Pero aun esto supone que factores generales, como la temperatura o la multiplicidad de los ambientes asequibles, no fueran tan diferentes de modo que el curso entero de la evolución, aunque en general semejante al desarrollado en la Tierra, fue considerablemente acelerado o retardado. En realidad, todo lo que podemos decir es que la cifra de 4 000 millones de años para todo el proceso, aun sin apoyo firme, no es exorbitante.

Con este número tan dudoso podemos empezar a

considerar cuándo pudo hacer su primera aparición la vida. Hay dos requisitos esenciales. Necesitamos un planeta adecuado y ciertos elementos en su superficie o cerca de ella. Es claro que ninguno de los dos podría haberse dado poco después del *Big Bang*, tal como expusimos en el capítulo II. Hay buenas pruebas de que muchos de los átomos de nuestro cuerpo no se formaron durante los primeros momentos de la expansión cósmica sino que fueron sintetizados por algunas de las primeras estrellas. Estas grandes estrellas consumieron rápidamente su combustible nuclear, se retrajeron sobre sí mismas, estallaron y esparcieron sus detritos en el espacio para finalmente condensarse y formar nuevas estrellas y sistemas planetarios. Aunque no sabemos cuánto tiempo se necesitó para que ocurriera en considerable escala todo esto, un cálculo razonable podría ser de 1 000 o 2 000 millones de años.

Para seguir adelante necesitamos saber la edad del universo —el tiempo transcurrido desde el *Big Bang*—. Por desgracia, esto sigue siendo materia de controversia. Los cálculos más elevados llegan hasta los 20 000 millones de años; los más bajos son apenas de 7 000 millones de años, aunque poca gente acepta cifra tan baja. Cuando Leslie Orgel y yo escribimos nuestro artículo, la hipótesis generalmente más admitida variaba en torno a los 13 000 millones de años. En la actualidad, se cree que la cifra que más se aproxima a la realidad es la de 10 000 millones.

Para nuestro propósito, la cifra exacta no es esencial, con tal que no resulte demasiado baja. Para mayor seguridad, tomemos 10 000 millones de años. Asignando 1 000 millones de años a la formación de los planetas y

sustancias químicas, nos quedan 9 000 millones de años. Vemos inmediatamente que ésta es unas dos veces la edad de la Tierra. Queda, pues, suficiente tiempo para que haya evolucionado la vida no sólo una vez, sino *dos veces consecutivas*. En pocas palabras, el tiempo disponible habría permitido que la vida comenzara en algún planeta distante formado hace 9 000 millones de años, para que se llegase a la evolución de seres semejantes a nosotros 4 000 o 5 000 millones de años más tarde y para que estos seres hubieran enviado alguna forma sencilla de vida a nuestro planeta, el que por entonces se había enfriado hasta la fase en que los océanos primitivos ya se hubieran formado. Si en realidad esto sucedió o no sucedió es cuestión de opiniones, pero si las pruebas disponibles se dan por buenas sería difícil argüir que el tiempo total de que se dispuso con seguridad fue demasiado corto. Hubo amplio tiempo para que evolucionara la vida no sólo una, sino más de dos veces.

XI. ¿QUÉ HABRÍAN ENVIADO ELLOS?

A. PARTIR de este punto debemos dejar de lado las consideraciones cuantitativas, por muy aproximadas que sean, y dar un poco más de libertad a la imaginación. Supongamos que en algún planeta distante, hace unos 4 000 millones de años, hubiera evolucionado alguna forma de ser superior que, al igual que nosotros, hubiera descubierto ciencia y tecnología, que las hubiese hecho avanzar muchísimo más de lo que nosotros hemos logrado, pues habría tenido para ello tiempo suficiente, y resulta muy improbable que su sociedad se hubiera detenido exactamente en la misma fase en que nosotros nos hallamos. No es fácil para nosotros imaginar hasta qué grado de progreso hubiese llegado, aunque algo de su ciencia podría no haber sido diferente de la nuestra. El conocimiento que poseemos acerca de mucho de la física y la química es ahora tan completo y se basa en fundamentos tan sólidos que muchas de sus características principales podrían ser ya de nuestro conocimiento. Es improbable que esto fuera cierto en *todo* lo que se refiere a estas asignaturas. Por ejemplo: es probable que la física de la alta energía nos reserve todavía muchas sorpresas. Podemos

esperar nuevos métodos en fisicoquímica que hagan más completo nuestro conocimiento de la estructura y las reacciones químicas. Aun si no quedaran por descubrir principios radicalmente nuevos (y esto es bastante improbable), queda trabajo para generaciones de científicos dedicados a descubrir en detalle cómo interactúan átomos y moléculas en muchas mezclas diferentes y en diversas condiciones de presión y temperatura.

Cuando volvemos los ojos a la astronomía, la astrofísica y la cosmología, nos damos cuenta de que en estos campos es mucho más lo que falta por descubrir. Ya hemos tocado algunos de estos problemas —por ejemplo: cuántas estrellas tienen planetas— y también quedan en gran escala preguntas por contestar, tales como si el universo es abierto o cerrado (esto es, si tiene suficiente masa para que, finalmente, se retraiga sobre sí mismo, en lugar de expandirse eternamente). Nuestro conocimiento de la biología es aún más primitivo —por ejemplo: sólo tenemos ideas esquemáticas acerca de los detalles de la embriología y, como ya hemos visto, del curso y mecanismo de la evolución todavía conocemos sólo un esbozo, y del origen de la vida sabemos menos aún—.

Podemos confiar en que si nuestra civilización sobrevive apenas otros mil años, para entonces ya habremos dado respuesta a muchas de estas difíciles preguntas. Incluso si para esas fechas han sido comprobados todos los principios fundamentales de las ciencias, mucho será lo que todavía quede por hacer. Puede esperarse que en el curso de los próximos 10 000 años se elaboren en forma detallada muchos sistemas complejos. Sobre todo, es probable que veamos un enorme florecimiento de proyectos de ingeniería que apliquen los conocimientos fundamen-

tales para entonces adquiridos a sistemas de fuerza, sutileza y complejidad cada vez mayores. Con tal de que la humanidad no se vuelque sobre sí misma ni contamine por completo el ambiente ni sea dominada por anticientíficos rabiosamente fanáticos, podemos esperar que se hagan grandes esfuerzos para mejorar la naturaleza del hombre mismo. ¿Qué forma tomarán, qué lograrán, y cuánto tiempo será necesario para cambiar de manera radical la naturaleza humana? Esto es algo que apenas podemos vislumbrar a través de la niebla de la incertidumbre que rodea el futuro lejano.

Por analogía, cabe esperar que esos primitivos tecnócratas probablemente sepan mucho más que nosotros, sobre todo acerca de astronomía y biología, y que hayan elaborado una tecnología mucho más adelantada que la nuestra. ¿Cómo verán ellos su universo?

Sería sorprendente que no hubiesen penetrado los secretos de su propia naturaleza (lo que nosotros estamos muy lejos de haber hecho), los mecanismos de su evolución y el funcionamiento detallado de su ambiente físico. Mientras que sólo podemos suponer cuáles estrellas pudieran tener planetas, es probable que ellos ya lo supieran, aunque es difícil calcular cuánto sabrían de las condiciones exactas de esos otros mundos. Dados la alta tecnología y el tiempo suficiente con que contaron, podríamos esperar que ya hubiesen lanzado al espacio sondas sin tripulación o, al menos, a algunas de las estrellas más cercanas y, después de unos cuantos cientos de años, en respuesta hubieran captado mensajes portadores de información sobre las condiciones prevalecientes donde se recibieron tales mensajes de exploración. Aun para hacer esto sería necesaria tecnología mucho más avanzada que la nuestra.

Supongamos que descubrieran la existencia en la galaxia de muchos lugares adecuados para la vida, con tierra y océanos, con una radiación constante proveniente de su estrella, una atmósfera adecuada y, en consecuencia, muy grandes extensiones de caldo diluido en su superficie. Lo que no es tan fácil suponer es si serían capaces de descubrir cuántos lugares contienen alguna forma primitiva de vida. Quizá piensen que la vida es en verdad un rarísimo fenómeno. Incluso si fuera cierto lo contrario, sería posible que hubieran llegado a la errónea conclusión de que en realidad son los únicos y que en su galaxia no existían otras formas de vida. Podemos imaginar, sin mucho esfuerzo, que al mirar en torno desde su pequeño rincón del universo, una extensión en cuyo recorrido se tardaran algunas decenas de años luz en cualquier dirección, llegarían a la conclusión de que mientras los caldos son comunes, la vida es en extremo rara; que muchos lugares son potencialmente aptos para la vida, pero en ninguno de ellos se había dado el primer paso: la existencia espontánea del mecanismo químico necesario para la selección natural. Y, en consecuencia, debemos preguntarnos: si en verdad fue así como vieron el universo, ¿qué habrían hecho?

Hay otro factor necesario para delinear con mayor precisión su apuro. Sabrían que, a la larga —y sería muy a la larga—, su civilización estaba condenada. Por supuesto, tendrían razones que los hicieran creer que ni siquiera sobrevivirían por corto plazo. Quizá habrían descubierto que una estrella vecina estaba situada en una trayectoria que la llevaría a chocar con su planeta, acontecimiento no muy probable en casi ninguna parte de una galaxia, pero más que probable que ocurra cerca del centro galáctico. Tal vez

tuvieron razones para sospechar que su sistema social no sería estable indefinidamente, como sin duda no lo es el nuestro. Pero sabrían que muy a la larga —esto significa miles de millones de años—, cuando su estrella comenzara a agotar su combustible nuclear, tal vez se convertiría en una estrella roja gigante y entonces atraería a sus planetas y los calcinaría, inevitablemente. Sin duda, habrían planeado colonizar planetas vecinos, pero esto ha demostrado ser un logro tecnológico en extremo difícil, sobre todo si fueran desafortunados y el planeta habitable más cercano se encontrara a muchas decenas de años luz. Aunque lo intentaran, tendrían que haberse dado cuenta de que su oportunidad de alcanzar un feliz resultado era muy pequeña y que tendrían que formular planes de contingencia contra los repetidos fracasos de esta índole. Cualesquiera que fueran sus razones, esperamos que haya examinado minuciosamente otras alternativas.

¿Qué otras opciones les quedarían? La más fácil habría sido enviar sondas espaciales sin tripulación, pero éstas no serían fáciles de producir en serie, pese a lo que digan los escritores de ciencia, ficción. No sólo sería difícil construir una máquina para la cual hubiera materia prima disponible en abundancia, sino que sería formidable el problema de hacer que tales máquinas funcionasen bien con poca ayuda de la base de lanzamiento, sobre todo después de un largo viaje por el espacio y del trauma que se sufre al descender en un planeta lejano. Deberían llevar complicados mecanismos de autorreparación, y éstos, a su vez, también estarían expuestos a innumerables fallas. Lo único favorable sería la certeza casi absoluta de carecer de peligrosos enemigos. No habría polillas que echaran a perder las cosas ni tampoco habría ladro-

nes. Sólo habría que hacer frente a los lentos estragos del óxido y otras formas químicas y mecánicas de deterioro.

Quedaría la obvia posibilidad de enviar otros seres vivos desde su planeta. Aunque por fuerza inferiores en la escala de la evolución, cabría esperar que sobreviviesen y se multiplicaran y, con suerte, acabarían por evolucionar a formas superiores de vida. Si fuera demasiado difícil enviar criaturas semejantes al hombre en tan atractivos viajes, ¿por qué no ensayar el envío de ratones?

Por desgracia, las ventajas de utilizar ratones son mínimas: un ratón ocupa menos espacio que un hombre, pero carece del mismo control que éste sobre el ambiente. Su existencia, aun como colonia de cría, a lo largo de cientos de años en una nave espacial, presentaría dificultades muy graves aunque dispusiera de muchas e ingeniosas formas de reutilización. El ambiente que quizá encontrarían al llegar a su destino sería casi con seguridad siempre hostil. En particular, habría que esperar que faltara oxígeno, inconveniente que a la larga resultaría casi invariablemente fatal. Es claro que necesitaríamos un organismo que pudiera enviarse en un número bastante elevado, que fuera capaz de sobrevivir con cierta facilidad al largo viaje y tuviera alguna oportunidad de no morir a la hora del despegue al enviarlo y al descender en la superficie del planeta y resistir las condiciones ambientales que allí encontrara. Expuestas así las cosas, vemos que microorganismos semejantes a nuestras bacterias habrían sido una buena elección para ser enviados como colonizadores y dar comienzo a la vida en un lejano planeta.

¿Qué son las bacterias? La principal división del reino biológico no es, como estaríamos tentados a creer, la

de animales y vegetales. Tampoco es la de los organismos unicelulares y los multicelulares. La división más importante es la de las células que poseen núcleo, como las de nuestro cuerpo, las que denominamos *eucariotos*, y otros organismos más humildes que carecen de tal núcleo, llamados *procariotos*. Los biólogos suelen utilizar la denominación "organismos superiores", pero puede inducir a error. Seguramente, el hombre es un organismo superior y, en términos generales, también lo son los animales que vemos en los zoológicos. Pero para un biólogo, una célula de levadura, tal como las que fermentan el vino y la cerveza y se usan para esponjar el pan, también puede denominarse organismo superior. En esta terminología, "organismos inferiores" se refiere a los procariotos. Esta denominación abarca todas las bacterias, de las cuales existen innumerables tipos y a las que solemos llamar "algas verdiazules". Las demás especies de algas son eucariotos, como también son las amebas, los ciliados y muchos otros organismos unicelulares.

La división del mundo biológico en estas dos amplísimas categorías es importante porque es clara y profunda. Y no se trata únicamente de que las células tengan núcleo, sino que implica muchos rasgos de la arquitectura interna de la célula. Esta arquitectura no habría podido estudiarse con eficiencia si no se hubiera contado con equipo moderno, como el microscopio electrónico, que permite observar los componentes de la célula con tanto detalle que antes jamás había estado disponible. Por esta razón, la clasificación en eucariotos y procariotos es comparativamente reciente, pues apenas data de alrededor del año 1960.

¿Cuál es la diferencia entre ellos? En términos gene-

rales, cabe decir que los eucariotos poseen cromosomas muy desarrollados, los cuales, después de la duplicación, se dividen en un proceso llamado *mitosis*, función que requiere un mecanismo mitótico especial. Los “cromosomas” de los procariotos son mucho más sencillos y carecen de las moléculas que constituyen el eje mitótico. El citoplasma de los eucariotos contiene muchos elementos especiales, incluso complicados sistemas de membranas (de los que suelen carecer los procariotos) y pequeños organelos especiales, como los mitocondrios. Estos mitocondrios poseen su propio ADN y su mecanismo para sintetizar proteínas y generalmente se cree que los mitocondrios son descendientes de procariotos libres absorbidos por una célula y luego degeneraron de manera que sólo podrían existir en forma simbiótica con la célula receptora. Los mitocondrios suelen ser denominados las “centrales eléctricas de la célula”, pues contienen el mecanismo molecular para la eficiente combustión del alimento, utilizando oxígeno molecular. Cada una de nuestras células contiene cientos, si no es que miles, de mitocondrios.

Quizá la diferencia más importante entre eucariotos y procariotos sea la relativa a cómo penetran las sustancias en la célula o salen de ella. Los eucariotos disponen de mecanismos especiales que les permiten absorber partículas mayores —proceso llamado *fagocitosis*— y de estructuras internas especiales para digerir dichas partículas. Los procariotos carecen por completo de tales mecanismos moleculares. Sólo partículas de tamaño molecular pueden atravesar sus membranas.

No necesitamos conocer todos los detalles. En términos generales, los procariotos son más sencillos y carecen de esas moléculas especiales que permiten a los

eucariotos, más complejos, efectuar procesos vitales complicados. Estos procesos permiten a los eucariotos contener mucho más información genética (al permitir que posean un conjunto de cromosomas en lugar de un solo trozo de ADN), vivir en otros organismos y desplazar las moléculas dentro de sí mismos con fines concretos. Los eucariotos gozan de una propiedad que los hace superiores a los procariotos, y es la posesión de un mecanismo molecular para efectuar y controlar movimientos dentro de la célula. Esta propiedad es la que ha llevado a la formación de músculos, indispensables para los animales, y la que hace posible la complicada danza de los cromosomas que llamamos mitosis.

Entonces, ¿por qué si las bacterias se hallan en tal desventaja debemos considerarlas como pasajeros de nuestro cohete? La palabra clave es: oxígeno. Es muy probable que, en el mundo prebiótico, la atmósfera tuviera poco oxígeno. Por consiguiente, tenemos que examinar los organismos que existen hoy en nuestro planeta para averiguar cuáles son sus necesidades de oxígeno.

La gran ventaja del oxígeno es que permite a la célula obtener mayor cantidad de energía al metabolizar el alimento. Este proceso suele denominarse *respiración*. Unas cuantas bacterias pueden utilizar algunos compuestos inorgánicos, como carbonatos, nitratos o sulfatos, en lugar de oxígeno, pero estos compuestos son los que muy probablemente no se encontraban en cantidad apreciable en la Tierra primitiva por la falta de oxígeno en la atmósfera. Sin un aceptor inorgánico de electrones, nombre con que se designan tales compuestos, la célula se ve obligada a utilizar el proceso mucho menos eficiente de la *fermentación*. La importancia de la fermentación radica

en que puede efectuarse en ausencia total de oxígeno, pero produce mucho menos moléculas de trifosfato de adenosina (TFA, la energía circulante de la célula) que lo que produce la respiración.

El oxígeno molecular es un compuesto tan poderoso como peligroso. Es una sustancia de elevada toxicidad en potencia para las células por cuanto los procesos de éstas propenden a formar con él varios derivados mortales, como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), o compuesto aún más peligroso, el radical superóxido (O_2^-). Muchas células poseen enzimas especiales que las desembarazan de estas sustancias que amenazan la vida. Algunas especies de bacterias carecen de tales enzimas. Para ellas, el oxígeno es veneno y, por lo tanto, sólo pueden vivir en lugares donde no lo haya, por ejemplo, bajo una espesa capa de cieno, pero en la Tierra primitiva no debieron hallarse en especial desventaja.

El oxígeno —que debemos recordar se genera en nuestra época como subproducto de la fotosíntesis— es tan útil para casi todos los organismos que éstos no pueden vivir sin él; lo mismo sucede con nosotros. A esto se debe que no estemos obligados a considerar casi todas las células sumamente evolucionadas como candidatas para la colonización del espacio. Estos requisitos eliminan todos los contendientes, excepto ciertas bacterias y unos cuantos protozoarios, por ejemplo: las levaduras. Algunos de estos seres pueden aprovechar el oxígeno si lo tienen a su disposición —de nuevo, las levaduras son ejemplo de ello—, mientras que otros no pueden utilizarlo en absoluto. Algunos anaerobios pueden tolerar el oxígeno, pero a otros los mata.

Después de este preámbulo, veamos qué son las bac-

terias. Son tantas sus especies que toda descripción breve ha de ser forzosamente esquemática. Por lo regular, son muy pequeñas, lo cual quizá no nos sorprenda demasiado si consideramos que sólo poseen una modesta cantidad de ADN, del orden de un millón de pares base. Dimensión típica, aunque su tamaño varía entre muy amplios límites, sería de una o unas cuantas micras (una micra es la milésima parte de un milímetro), de modo que casi siempre son algo mayores que la longitud de onda de la luz visible, que varía en torno a media micra. Por esta razón, aunque pueden verse a través de un microscopio de luz de gran aumento, de tal manera que es posible observar su tamaño y forma aproximados (sea esférica, alargada o alineadas en largas cadenas), se necesitan otras técnicas para revelar sus secretos. Por fortuna, ciertas bacterias han resultado ideales para los modernos métodos bioquímicos, y ello ha permitido realizar enorme cantidad de investigación, sobre todo en los últimos treinta o cuarenta años. De esta manera se ha descubierto que estos seres son realmente notabilísimos.

Podría pensarse que siendo estas bacterias tan pequeñas carecerían de multifuncionalidad química, pero esto dista mucho de la verdad. Muchas de ellas pueden vivir en un medio químico muy sencillo, que contenga poco más que una fuente de carbono, de nitrógeno (tal como el amonio NH_4^+) y alguna otra sustancia, en general orgánica, pero no siempre que puedan utilizarse para obtener energía. Muchos de estos organismos no necesitan la mayor parte de las vitaminas por cuanto ellos mismos pueden sintetizarlas en lugar de obtenerlas de los alimentos, como ocurre con nosotros. Tampoco necesitan los aminoácidos "esenciales" que obtenemos de las proteínas

que vienen en los alimentos, porque éstas, también, pueden elaborarse por sí mismas. Muchos de ellos son móviles y pueden desplazarse en su medio con ayuda de sus primitivos flagelos y descubrir la concentración de moléculas alimenticias y, siguiendo una sencilla estrategia, nadar en dirección hacia ellas. De igual modo, pueden evitar ciertas sustancias tóxicas. En condiciones favorables, crecen y se dividen rápidamente. En un caldo de cultivo rico en nutrientes y con abundante oxígeno, pueden dividirse en dos en tan sólo 20 minutos. En circunstancias menos favorables, tardan hasta medio día en duplicarse, pero aun a ese ritmo su número aumenta en forma espectacular, siempre que no les falte alimento. Poseen eficientes mecanismos para controlar su aparato metabólico, de modo que las enzimas que de momento no se necesitan (gracias a una rica provisión de alimento) dejan de producirse y su producción se reanuda cuando la célula vuelve a sentir necesidad de ellas. En el aspecto metabólico, parecen estar destinadas a crecer con rapidez, ya que en muchas circunstancias las células más rápidas son las que vencen y, por selección natural, producen las siguientes generaciones. Sólo tienen actividad sexual muy débil. Casi siempre una sencilla célula se divide en dos sin que haya de por medio proceso sexual alguno, pero en ocasiones, en virtud de un mecanismo especial, dos bacterias se conjugan, y una de ellas (el "macho") transfiere parte de su ADN a la otra célula (la "hembra"). Este proceso puede ser hasta cierto punto lento y el acto de transferencia puede durar hasta dos horas, esto es, varias veces la duración de su vida normal.

Como no es esencial la reproducción sexual, un solo individuo basta para formar una colonia bacteriana. Ade-

más, como las bacterias no se ven obligadas a buscar pareja para reproducirse, pueden multiplicarse unas con independencia de las otras.

En general, las bacterias poseen una rígida pared celular por fuera de la delicada membrana plasmática, que es la verdadera barrera de tipo molecular entre el interior y el exterior de la célula. Esta pared evita las lesiones de la membrana plasmática y, sobre todo, impide la hinchazón osmótica que ocurriría si la célula se encontrara en un medio excesivamente acuoso. Así, muchas de las bacterias no son muy exigentes en cuanto a la concentración de sales o de sustancias orgánicas en su medio. Otra ventaja es que las bacterias pueden "liofilizarse", proceso que comienza congelando las bacterias y después evapora rápidamente el líquido en tal forma que casi no daña la estructura celular.

En nuestro planeta, las bacterias pertenecen a muy diferentes tipos y viven en los más disímiles ambientes, desde aguas termales hasta los áridos desiertos. Algunas han evolucionado de tal modo que pueden medrar incluso en condiciones de intensa radiación, como las que habitan en los reactores nucleares. Otras son capaces de utilizar las más insólitas sustancias, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el ion ferroso o el metano, aunque por lo regular necesitan oxígeno para hacer esto. Si también son capaces de realizar la fotosíntesis, tal vez la llevaron a cabo prescindiendo del oxígeno. Otras bacterias son estrictamente anaerobias y pueden utilizar el hidrógeno, produciendo metano en el proceso. Otras pueden "fijar" el nitrógeno, esto es, pueden obtener provisión de nitrógeno de la molécula N_2 muy inerte de la atmósfera. Otras más efectúan diversas formas de fotosíntesis, para lo cual obtienen

la necesaria energía de la luz solar. El exponer todas las posibilidades nos obligaría a usar demasiados tecnicismos.

Existe un grupo de microorganismos a los que debemos dedicar un poco más de atención. Son las algas o las bacterias verdiazules, como ahora se les denomina, aunque sólo sea porque parecen pertenecer a este tipo los fósiles microbianos más antiguos que se conocen. En su conjunto el grupo es muy diverso, aunque todos sus miembros poseen varias características en común. Todos ellos pueden obtener energía de la luz solar; algunos también son capaces de crecer en la oscuridad, si bien con gran lentitud, y no pueden utilizar sino unos cuantos compuestos de carbono con este propósito. Más extraño aún es que algunos de ellos sean también capaces de fijar el nitrógeno. En tales condiciones, necesitan muy poco para vivir, pues pueden crecer en un medio que contenga sólo unas cuantas sales y utilizar la luz para obtener carbono del bióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno del N_2 de la atmósfera. Tales organismos suelen consistir en cadenas de células unidas por sus extremos, y la fijación del nitrógeno la efectúan sobre todo células especiales, los heterocistos, que se especializan en ejecutar esta función y jamás se dividen.

No es sorprendente que las bacterias verdiazules vivan en hábitats muy diversos, pues se encuentran no sólo en el fondo del mar sino en agua dulce y en tierra. Algunas medran en las aguas termales, otras en los desiertos, donde habitan en las grietas de las rocas.

Después de esta esquemática descripción del mundo bacteriano, recapitulemos algunas de las ventajas que estos seres poseen para los viajes espaciales. Como hemos visto, muchos de ellos son bastante pequeños. Una bac-

teria común, por ejemplo la *Escherichia coli*, mide como una micra de ancho y dos de largo. En consecuencia, en unos cuantos centímetros cúbicos caben 1 000 millones de bacterias. Puede congelárselas vivas y gran parte de ellas seguirá viva al descongelarlas. En congelación pueden sobrevivir en forma casi indefinida sin que haya pérdida seria alguna. A temperaturas muy bajas, como las del espacio exterior, muchas muy bien podrían sobrevivir más de 100 000 años. Serían casi inmunes a los choques, sacudidas por sismos y accidentes semejantes. Pero lo mejor de todo, si cayeran en un océano prebiótico, es que tal vez prosperarían, sobre todo por ser muchas las especies que pueden sobrevivir con poco o nada de oxígeno. En realidad, algunas bacterias pueden desarrollarse en medios tan sencillos que casi cualquier "caldo" prebiótico les permitiría sobrevivir y multiplicarse con bastante eficiencia, suponiendo que no fuera demasiado frío. Además, no necesitan quedar amontonadas. En circunstancias favorables, una sola bacteria podría poblar un océano entero.

Las bacterias resultarían en extremo sencillas si se les compara con organismos como el humano, pero como factorías químicas autorreproductoras no sólo son compactas y resistentes, sino muy multifuncionales desde el punto de vista químico. Hasta donde se sabe, sorprende que nadie se ha propuesto cultivar bacterias en un *caldo* artificial como el del experimento de Urey-Miller (casi todos los investigadores hacen grandes esfuerzos para excluir microorganismos de sus matraces de cultivo), pero sin duda podría esperarse que muchas especies de bacterias prosperarían en él, incluso en ausencia de oxígeno atmosférico.

Por todas estas razones, los microorganismos, y en especial los anaerobios, son los seres idóneos para enviar a otros planetas, suponiendo que nuestro propósito fuera hacer que en ellos comenzara la vida más que enviar un organismo superior plenamente formado para que tuviera alguna oportunidad de sobrevivir. Ésta es la razón por la cual Orgel y yo sugerimos estos organismos como la carga más adecuada para la nave espacial no tripulada que consideramos necesaria para efectuar la panspermia dirigida.

XII. EL DISEÑO DEL COHETE

ANTES de ver cómo podría diseñarse un cohete para enviar microorganismos a otro planeta, consideremos primero cómo enviar astronautas. Para imprimir a tal nave espacial alta velocidad, necesitaremos un motor muy poderoso y una buena provisión de combustible. Debe tener capacidad suficiente para albergar a los astronautas y contener medios de subsistencia (alimentos, oxígeno, etc.) suficientes para el largo y oscuro viaje, junto con los instrumentos adecuados para vigilar y controlar el curso de la nave y mantener la comunicación con el planeta desde el cual se efectúa el lanzamiento. Debe llevar combustible suficiente para desacelerar la nave espacial a la llegada y permitir el descenso sin riesgo de los tripulantes en algún planeta o asteroide de la estrella elegida. Ni la aceleración ni la desaceleración han de ser tan bruscas que lesionen a los pasajeros. La nave espacial no tendrá que hacer el viaje de regreso, pues se trata de colonizadores y no de viajeros.

Por razones bastante claras, sería conveniente que el viaje fuera muy veloz. Si los tripulantes pudieran viajar con extrema velocidad, cercana a la de la luz, se produci-

ría la dilatación relativista del tiempo. Aunque el viaje, tal como se vería desde cada estrella, requeriría miles de años, dentro de la nave sólo habrían transcurrido unas cuantas décadas. Ésta es una de las más sorprendentes conclusiones que pueden derivarse de la teoría especial de la relatividad.

Resulta que para la gente— (a diferencia de los electrones)— la dilatación del tiempo es casi imposible de conseguir no sólo a causa de la avanzada tecnología necesaria, sino por las leyes fundamentales de la física, que tratan de la energía, la fuerza y la masa. Por ejemplo: el cohete necesitará gran cantidad de energía, pero no deberá ser demasiado pesado; en consecuencia, deberá utilizar un combustible muy rico en energía. No sabemos de mejor medio para lograrlo que el proceso de aniquilación de la antimateria por la materia; pero el problema del almacenamiento sin riesgos de la antimateria parece insuperable. El método que le sigue en eficiencia es la fusión nuclear, lo que significa convertir el hidrógeno en helio y utilizar éste para impulsar la nave. Edward Purcell ha calculado que, aun con un motor de cohete "ideal" de este tipo, la velocidad de expulsión del gas vendría a ser sólo un octavo de la luz. En la práctica, sería aún menor que ésta. Un cohete pierde eficacia cuando alcanza velocidades mucho mayores que la velocidad con que sale el gas del escape. Estos cálculos demuestran que la masa del cohete más el combustible habrían de ser inmensamente más pesados que la carga si se quiere alcanzar una velocidad cercana a la de la luz.

Aparte del problema del aceleramiento de la nave espacial hasta estas altísimas velocidades, para no hablar de la desaceleración a la llegada, hay otra dificultad consi-

derable que es la protección de la nave contra averías. Gran parte del espacio está vacío por completo, pero a veces hay algunos átomos y moléculas y aun partículas de polvo. Aunque éstos se desplazaran con gran lentitud, su choque con la nave sería muy fuerte, en virtud de la velocidad de la nave espacial. A velocidad moderada, la carga y la maquinaria de la nave espacial podrían ser protegidas mediante una gruesa capa de material que sirviera de coraza. A velocidades muy elevadas —cercanas a la de la luz—, el grosor requerido de la coraza protectora sería imposible de construir.

Se han propuesto varias sugerencias ingeniosas para vencer estas dificultades. En lugar de transportar gran cantidad de combustible, la nave espacial podría recoger materia del espacio y utilizarla como combustible. Aun si esto pudiera hacerse satisfactoriamente, la materia que el espacio contiene es tan escasa que la pala para recogerla habría de ser enorme —como de unos 160 kilómetros de diámetro—. Quizá pudiera evitarse el daño a la nave con un dispositivo que desviara la materia, pero también esto sería una empresa heroica. Las únicas ideas que parecen remotamente viables se basan en proveer la energía para propulsión no desde el cohete mismo, sino desde el planeta base, por ejemplo: con un rayo láser. Esto permitiría que la nave espacial fuera pequeña y ligera hasta cierto punto, aunque todavía de considerable tamaño, pues no habría de cargar la inmensa cantidad de combustible que sería necesaria con los métodos más convencionales.

Incluso con estas técnicas, que todavía están muy distantes en el futuro, es improbable que se logre impulsar la nave espacial con velocidad superior a la mitad de

la luz. Con esta velocidad, la dilatación del tiempo es un efecto un tanto pequeño. Tentativamente, hemos de llegar a la conclusión de que el viaje basado en la teoría relativista a través del espacio es imposible.

Esto significa que el tiempo que la tripulación experimentara sería simplemente igual a la distancia del viaje dividida entre la velocidad media de la nave. Viajar una distancia de 100 años luz a un centésimo de la velocidad de la luz llevaría a los tripulantes 10 000 años. Para todo lo que no sean sino las más cortas distancias en las más avanzadas naves espaciales, el viaje habría de ser quizá más largo que la duración de la vida humana (por supuesto, seres que hubieran evolucionado en otros lugares podrían ser más longevos). De alguna manera debería prolongarse la vida del hombre congelando a los astronautas, si fuera posible, o bien permitiéndoles reproducirse en la nave espacial, lo que no es mi idea de disfrutar la buena vida.

Ya hemos dicho bastante para demostrar que el envío de colonizadores a través del espacio con alguna probabilidad de éxito es una empresa sumamente difícil, muy lejos del alcance de nuestras actuales posibilidades. El ingenio, perseverancia y esfuerzo requeridos son tan colosales que yo mismo dudo de que nuestros descendientes puedan lograrlo en forma venturosa, aunque no sabemos qué nos reserva el futuro.

Después de esta serie de casos sin solución, es un alivio retornar al problema más en consonancia con nuestros intereses de enviar sencillas bacterias a otro planeta. Para hacerlo, sólo he de considerar técnicas que, si bien son imposibles ahora, no están demasiado lejanas en el futuro.

Habiendo llegado a la conclusión de que la nave espa-

cial habría de desplazarse a gran velocidad, aunque no tan rápida como la luz, no es fácil predecir su velocidad más probable. Podemos construir naves espaciales que se desplazarán por el Sistema Solar a velocidades de 4.8 kilómetros por segundo, es decir, a 0.0015% de la velocidad de la luz. Sin entrar en detalles —si sería factible utilizar la explosión nuclear, si un rayo enviado desde nuestro planeta podría proporcionar la energía para la aceleración, etc.—, parece bastante segura la posibilidad de construir una nave espacial capaz de viajar a un milésimo de la velocidad de la luz. Elevar la velocidad a un décimo de la velocidad de la luz parece bastante difícil. La predicción razonable de la velocidad sería un centésimo de la velocidad de la luz.

En un radio de 100 años luz desde la Tierra hay varios millares de estrellas y, con fundamento en los argumentos propuestos, no sería demasiado sorprendente que alguna de ellas tuviese un planeta cuyo ambiente fuera apropiado para la vida y reproducción de nuestras bacterias. Por supuesto, en un anterior estadio de la vida del universo las estrellas podrían haber estado mucho más separadas. De otro modo, esta temprana civilización quizá habría nacido en alguna parte de la galaxia en que las estrellas estuviesen más cercanas entre sí en grado considerable. Sin embargo, la probabilidad de la existencia de un planeta habitable situado dentro de una distancia de 10 años luz parece muy pequeña; dentro de 1 000 años luz es más probable, de manera que 100 años luz quizá sea una suposición tan buena como cualquiera otra.

Esto nos daría, en términos aproximados, 10 000 años para la duración del viaje. Según nuestras normas cotidianas, resulta un tiempo inmenso, pero debemos pre-

guntarnos si lo sería tanto como para estar seguros de que la expedición fracasaría. Nadie ha tenido bacterias en congelación durante un tiempo siquiera aproximado al que se acaba de mencionar, pero los resultados obtenidos durante espacios mucho más cortos indican que si se les congela con cuidado y se les mantiene con el frío suficiente, muchas bacterias sobrevivirían a tal tratamiento durante largo tiempo. Parece muy probable que investigaciones adicionales con facilidad dieran procedimientos para conservar las bacterias hasta por lapsos de 10 000 años y quizá hasta un millón. En todo caso, el número de bacterias transportadas sería tan grande que podrían tolerarse pérdidas sustanciales, suponiendo que quedarán por lo menos unas cuantas para colonizar el nuevo ambiente.

Problema más serio es el que plantea la necesidad de asegurar que la nave espacial funcionase en forma fiable después de pasar 10 000 años en el espacio, pues el cohete debería funcionar no sólo al comienzo del viaje sino también al terminar. Depositar las bacterias en el planeta no es asunto sencillo. No sería práctico disparar el cohete al espacio y esperar que ocurriera lo mejor. Las estrellas son tan escasas que, a cualquier velocidad razonable, quizá la nave espacial atravesaría la galaxia y saldría de ella por el otro lado sin tocar ninguna. Habría que elegir como meta una estrella que pareciera habitable y mantener la nave espacial rumbo a ella durante el viaje. Esto sería fácil hasta cierto punto. El problema principal es el que se plantearía cuando por fin la nave se aproximara a la estrella. En este momento tendría que desacelerar, lo que implicaría llevar combustible durante todo el viaje y que los motores del cohete y su sistema de control si-

guieran todavía en buen estado de funcionamiento. Entonces, la nave espacial habría de ser capaz de elegir un planeta habitable en el cual dejaría su carga de tal manera que las bacterias sobrevivieran a la entrada directa en la atmósfera y se esparcieran ilesas en el océano primitivo. Nada de esto parece en extremo difícil; pero sí exige una tecnología avanzada en grado sumo a fin de que los varios componentes del cohete trabajen en forma segura después de su prolongado viaje a través del espacio. Parece que el problema puede ser resuelto, pero más bien a largo que a corto plazo.

Cualesquiera que sean los detalles de la nave espacial, parece probable que podría haber transportado y depositado muchísimos microorganismos. A juzgar por nuestros cohetes, una carga de 100 kilogramos no sería irrazonable. Las bacterias son tan pequeñas que en número de 10^{16} a 10^{17} cabrían dentro de tal espacio. Dada la enorme magnitud de estos números, habría que empacar las bacterias en varios paquetes por separado, lo que haría mucho más fácil su entrega. Durante ésta, los paquetes se habrían esparcido en la atmósfera, de manera que cayeran en diferentes lugares de la superficie del planeta. Cada paquete habría de haberse depositado en un estuche que fuera capaz de resistir el calor producido por la fricción a su paso por la atmósfera a elevada velocidad y el efecto del choque, lo mismo que al golpear contra el océano (es decir, los que cayeron sobre el planeta bien podrían haberse perdido). Una vez en el agua, la cubierta habría de disolverse para que las bacterias quedaran libres. Con un poco de ingenio parece fácil satisfacer todos estos requisitos. La entrega múltiple tiene la ventaja de que, aunque muchos de los paquetes cayeran en luga-

res inadecuados, unos cuantos podrían tener la fortuna de hallar ambiente propicio. Poquísimas bacterias bastarían para infectar un planeta estéril —incluso bastaría una sola, suponiendo que pudiera crecer y reproducirse felizmente—.

Como muchas bacterias habrían de ser enviadas, sería sensato expedir más de una variedad. Es difícil imaginar cómo habrían sido seleccionadas, pues dependería hasta cierto punto de qué microorganismos dispusiera el planeta del cual partiría la nave espacial. Como es improbable que la atmósfera del nuevo planeta tenga mucho oxígeno, más bien parecería una pérdida de tiempo enviar microorganismos que hubiesen de utilizar oxígeno para metabolizar su alimento. Sería mejor enviar microorganismos que se hubieran adaptado con anterioridad a cualesquiera condiciones que se esperara hallar en el nuevo planeta. Todos ellos podrían usar sustancia orgánica como fuente de energía, pero otros podrían utilizar la energía almacenada en ciertos minerales. La capacidad de realizar la fotosíntesis sería muy deseable y quizá la aptitud para formar esporas, por lo menos de algunos de los organismos enviados. Los remitentes bien podrían haber obtenido cepas nuevas por completo de microorganismos, sobre todo capaces de enfrentarse a condiciones prebióticas, aunque no se sabe qué sería mejor: si tratar de reunir todas las propiedades deseadas en un solo tipo de organismo o enviar muchos tipos completamente diferentes. Cualquiera que fuere la mejor solución, no parece presentar dificultades demasiado graves y, de hecho, hoy mismo podría ya empezarse a poner en práctica un programa de investigación, porque ya empezamos a elaborar poderosos métodos para modificar la compen-

sación genética de los organismos y en especial los microorganismos. El estudio realizado en 1976 sobre la posible habitabilidad de Marte llegó a la conclusión de que el mejor tipo de microorganismo sería el que se basara en nuestras actuales algas verdiazules. Como hemos dicho, es notable que los tipos más antiguos de microfósiles hasta ahora conocidos en la Tierra parecen pertenecer precisamente a esta clase.

Resulta más difícil decidir cuán avanzado debería ser el microorganismo que se enviara. Si el requisito principal fuera iniciar alguna forma de vida, aun la más sencilla, y si se creyera que sería una empresa difícil y arriesgada, entonces cuanto más sencillo y menos refinado fuera el microorganismo que se enviara sería mucho mejor. Si se piensa que, una vez alcanzado un planeta adecuado, sería más o menos sencillo el comienzo de la vida en él, entonces sería sensato enviar algunos microorganismos más complejos para dar a la evolución el inicio más fuerte posible. Si fuéramos nosotros quienes intentásemos elegir los microorganismos, con seguridad nos veríamos tentados a tratar de enviar alguna forma eucariota, es decir, una célula con cromosomas, un núcleo verdadero y macromoléculas útiles, como actina y tubulina, que contribuyan a dar movilidad a la célula y sus componentes. Una levadura sería buen ejemplo de estas células avanzadas. Prospera en presencia del oxígeno, pero también puede vivir sin él.

Si se hubiera enviado a nuestro planeta alguno de estos organismos al comienzo de la vida en él, habrían quedado escasas huellas de tales organismos en el testimonio fósil. Hasta donde podemos juzgar, los eucariotes actuales entraron en escena mucho después. Siempre podría

argumentarse que en el principio llegó a la Tierra alguna forma de eucarioto, pero que sucumbió a la competencia con las bacterias, mejor adaptadas, quizá cuando la provisión del alimento original llegó a su fin en los océanos primitivos. De otro modo, podría haber descartado sus atributos fantasiosos y evolucionado hasta convertirse en un organismo más sencillo y más apto para enfrentarse a la lucha por la supervivencia. Si se enviara una mezcla de microorganismos, sería sorprendente que, una vez lograda la vida, murieran todos (tan resistentes y adaptables son estos minúsculos seres); pero sin experimento uno dudaría en predecir cuál sería el tipo de organismo que vendría a sobreponerse a los demás en un ambiente tan remoto del que experimentamos todos los días.

De este análisis algo surge con mucha claridad. En el ambiente de un océano prebiótico, sobre todo en una atmósfera no oxidante, ciertos microorganismos tendrían inmensa ventaja sobre cualquier forma de vida superior. Como decíamos en el capítulo anterior, los microorganismos son multifacéticos en el aspecto químico, pueden prescindir del oxígeno y, siendo pequeños, pueden multiplicarse con gran rapidez. Añádanse a esto sus muy deseables cualidades como pasajeros —su pequeño tamaño, su resistencia a la congelación y la descongelación, su relativa falta de sensibilidad a las lesiones por radiación— y veremos que casi son ideales para la fecundación interplanetaria. Quizá sea verdad que, con el tiempo, el hombre será capaz de viajar a cierta distancia en el espacio fuera de los reducidos confines del Sistema Solar; pero, cualquiera que sea la distancia, *las bacterias podrían sobrepasarla*. Y hasta donde podemos ver, es probable que esta ventaja subsista por grandes que sean los progresos tecnológicos.

Este punto adquiere importancia si uno desea responder a quienes están convencidos de que los viajes espaciales acabarán por ser hasta cierto punto fáciles, porque podrían argüir que si puede enviarse al hombre resulta superfluo molestarse enviando bacterias. Esto sería lo correcto si siguiera existiendo una situación hipotética en que la panspermia dirigida fuera ventajosa. Supongamos que una forma avanzada de vida se dio hace 4000 millones de años en una galaxia vecina, como Andrómeda, pero que no existiera en absoluto en la nuestra. Aunque estos multiadaptables seres podrían haber conseguido colonizar toda la Andrómeda, el problema técnico de brincar a otra galaxia vecina puede haber sido demasiado difícil para que intentaran acometerlo. Dándose cuenta de que ellos mismos nunca podrían viajar el millón de años luz o poco más o menos desde Andrómeda hasta nuestra galaxia, sabrían, lo mismo que nosotros, que las bacterias podrían llegar más allá, y enviarían naves espaciales repletas de microorganismos. Aunque no es fácil imaginar cómo construir una nave espacial adecuada para tan inmenso viaje, sería aventurado decir que es imposible, ya que es muy difícil prever todos los progresos técnicos que puede deparar el futuro.

Como las bacterias resultan pasajeros tan ideales, ¿hay alguna forma de propulsión que pueda funcionar para ellas mas no para el hombre? Hay una por lo menos. Buen ejemplo de un enfoque por completo diferente del problema del cohete es la sugerencia de Mautner y Matloft, según la cual podrían usarse velas solares para impulsar a la nave espacial. Tales velas habrían de ser extensas y muy delgadas, de modo que la presión de la radiación solar excediera la fuerza de atracción de la gravedad del Sol. Los

autores creen que velas cuya masa sea un décimo de miligramo por centímetro cuadrado (y existen estos materiales) serían lo bastante delgadas para permitir a la nave espacial escapar a la gravedad del Sol. Velas aún más finas harían más rápido el despegue. Pero con estos métodos es difícil alcanzarse grandes velocidades, como un centésimo de la velocidad de la luz (0.01C), pero quizá sí podrían alcanzar velocidades entre un diezmilésimo y un milésimo de la velocidad de la luz.

Estas velocidades un tanto bajas limitarían un poco el alcance de la nave espacial, pues aun a una velocidad de un milésimo (0.001C) tardarían 10 000 años en recorrer una distancia apenas de diez años luz. Esto resulta bastante restrictivo, pero debe compararse la inmensa ventaja de que la desaceleración requerida al final del viaje también podrían efectuarla las velas solares, de modo que no se necesitaría gran provisión de combustible para esta maniobra, aunque sí se requeriría una cantidad muy pequeña para impulsar los muchos paquetitos de bacterias de la carga en órbita de los que por lo menos algunos pudieran ser atrapados por el planeta de destino.

Los autores consideran que para una carga de unas 10 toneladas, las velas deberían tener un radio de unos 182 metros. Los detalles de tal nave espacial son muy diferentes de los más comunes, pero una vez más apoyan la proposición de que las *bacterias pueden ir más lejos*. Es probable que esto sea cierto cualesquiera que fueren el método de propulsión y el alcance de vuelo de la nave, ya sea sólo los 10 años luz con las velas solares o el largo viaje de dos millones de años luz desde Andrómeda, utilizando una tecnología mucho más avanzada.

XIII. LAS DOS TEORÍAS OPUESTAS

TODOS los argumentos anteriores apoyan la tesis de que la panspermia dirigida no deja de ser plausible. Esto significa que tenemos dos teorías respecto al origen de la vida en nuestro planeta y que son radicalmente distintas entre sí. La primera —la ortodoxa— afirma que la vida, tal como la conocemos, tuvo su origen aquí en la Tierra, con escasa o ninguna ayuda de algo ajeno a nuestro Sistema Solar. La segunda teoría —la de la panspermia dirigida— sostiene que las raíces de nuestra forma de vida se remontan a otro lugar del universo, casi con seguridad a otro planeta, vida que habría alcanzado en éste una forma muy avanzada mucho antes de que aquí se iniciara, y que, en la Tierra, la vida fue sembrada por microorganismos enviados en alguna forma de nave espacial por una avanzada civilización.

Difícilmente podrían diferir más entre sí las dos teorías, pero ¿importa la diferencia? Puesto que el universo en su forma presente tuvo un origen en el tiempo —el *Big Bang*— y como en esos primeros tiempos cualquier forma de vida era imposible, su comienzo debió de haber ocurrido en algún cierto tiempo después de la Gran Ex-

plosión. Podría argüirse que la teoría de la panspermia dirigida sólo transfiere el problema a otro lugar. En parte esto es cierto, pero por lo que sabemos la localización fue esencial. En último término, podría llegarse a la conclusión de que, por una u otra razón, habría sido casi imposible que la vida comenzara en nuestro planeta, mientras que en algún otro más favorable podría haber sido más fácil que se iniciara y que tal vez fuese más rápida la evolución. Quizá nuestra insólita Luna resultara ser más un obstáculo que una ventaja. Así, aunque no podamos aducir todavía ninguna razón poderosa de por qué es más admisible que el origen de la vida se dio en un lugar ajeno a la Tierra, sería aventurado suponer que las condiciones en ésta fueron tan buenas como en cualquiera otra parte. En el fondo, que la vida se originara aquí o en otro lugar es un hecho histórico, y a estas alturas no tenemos derecho a considerarlo como impertinente.

Así pues, las dos teorías difieren entre sí radicalmente. ¿Podemos decidir cuál tiene mayor probabilidad de ser la correcta? En particular, ¿podemos reunir alguna prueba convincente que apoyara o refutara la teoría de la panspermia dirigida? Los organismos actuales tienen una línea de inicio. A pesar de la gran variedad de moléculas y reacciones químicas producidas por evolución, hay ciertos rasgos que parecen ser comunes a todos los seres vivos. A medida que, con todo cuidado, recogemos más y más datos de los organismos que hoy viven, podemos empezar a formar los árboles genealógicos de ciertas moléculas —por ejemplo, las moléculas del ARN transferente—, con la esperanza de llegar a ser capaces de deducir la naturaleza de los primitivos antepasados de estas moléculas. Este trabajo está todavía en elaboración, pero

existe un rasgo que es tan invariable que inmediatamente atrae la atención: el código genético, que describimos en el apéndice. Con excepción de los mitocondrios, el código es idéntico en todos los seres vivos hasta ahora examinados, y aun en los mitocondrios las diferencias son bastante pequeñas. Esto no sorprendería si hubiese alguna razón estructural clara para los detalles del código; por ejemplo, si ciertos aminoácidos por fuerza tuviesen que ir con algunos codones debido a que sus configuraciones encajasen a la perfección unas con otras. Se han hecho audaces intentos por dilucidar cómo pudo suceder esto, pero ninguno es del todo convincente. Por lo menos es asimismo plausible que todos los detalles del código sean sobre todo accidentales. Aun si ciertos tempranos codones no se debieran al azar sino que hubiera en ellos algo de lógica química, y aun si algunos amplios rasgos del código pudieran explicarse en cierta manera, parece ser muy improbable, al menos por el momento, que todos los *detalles* del código hayan sido decididos por razones puramente químicas. Lo que el código indica es que la vida, en alguna fase, habría superado por lo menos un obstáculo, una pequeña población endogámica de la cual descendiera toda la vida siguiente.

Ahora bien, no hay razón poderosa alguna para que tal obstáculo no surgiera durante las fases primitivas de la evolución en nuestro planeta. Una versión del código podría haber sido mucho mejor que cualquiera otra, que confiriera a sus poseedores tal ventaja selectiva sobre sus competidores, que sólo aquellos sobrevivieran, mientras se extinguían los otros. No obstante, uno se sorprende un poco de que no surgieran diversas versiones del código, y el hecho de que los códigos de los mitocondrios

sean un tanto diferentes apoya esto. Sin embargo, de los muchos diferentes tipos de organismos que habitan la Tierra son unos cuantos los que han sido estudiados en forma deliberada para determinar su código genético exacto. Como se sospecha que el código será siempre el mismo, son pocas las personas perspicaces que dedican tiempo al problema. Quizá, con adicionales investigaciones, se descubran más variedades. Mientras esto no suceda, el hecho de que el código sea tan uniforme presta poco apoyo a la panspermia dirigida.

¿Existe alguna otra característica, común a todos los seres vivos, que parezca insólita? En nuestra ponencia, Orgel y yo indicábamos que el molibdeno parecía abundar más en los organismos vivos de lo que pudiera esperarse, dada su natural abundancia en las rocas. Algunos han observado que mientras el molibdeno es más bien raro en las rocas, es mucho más común en el agua de mar. Al respecto, Orgel replicó que aun en el caso de que esto fuera cierto para los mares actuales, parece improbable que el molibdeno estuviera presente en tales cantidades en las aguas de los mares prebióticos, pues las mayores condiciones reductoras de aquella época podrían haber hecho sus sales solubles. Si se acepta el argumento de Orgel, debe concederse que el apoyo que da a la panspermia dirigida es bastante débil. Aunque los mares prebióticos hubieran contenido más bien poco molibdeno, de alguna manera los organismos primitivos podrían haber aprendido a concentrarlo en su cuerpo.

Quizá sería mejor enfoque indagar qué características esperaríamos encontrar en el testimonio de los fósiles si en verdad hubiera ocurrido la panspermia dirigida. La principal diferencia consistiría en la repentina apari-

ción de microorganismos, sin indicio alguno de sistemas prebióticos y organismos *muy* primitivos. También podríamos esperar descubrir no uno sino varios tipos de microorganismos que, aunque con parentesco muy lejano, más bien fueran diferentes. En particular, sería difícil rastrear formas ancestrales intermedias por cuanto éstas sólo habrían existido en el planeta del que fueron enviadas, pero no en la Tierra. De las distintas formas no sorprendería hallar alguna semejante a las algas verdiazules, ya que se ha indicado que serían buen candidato para un organismo realmente primitivo.

Ahora bien, tal vez debe hacerse notar que todas estas características son del primitivo testimonio fósil o de los primitivos árboles genealógicos deducidos del estudio de las moléculas de hoy día. Hasta ahora, los más primitivos fósiles hallados sin duda se asemejan a las algas verdiazules. Datan de una época hasta cierto punto temprana de la vida en nuestro planeta, tan antigua que sorprende descubrir que ya estaban plenamente formados en tal época. Por ahora, los intentos por rastrear en retrospectiva los árboles genealógicos de las moléculas parecen conducir a varias familias diferentes bastante lejanas unas de otras. Así, como mínimo puede decirse que estas pruebas no contradicen la panspermia dirigida, sino que en cierta medida la apoyan.

Por desgracia, un examen más cuidadoso de las pruebas revela que este apoyo es bastante débil. No disponemos de conjuntos completos de rocas rudimentarias formadas aproximadamente hace 3 600 y 4 600 millones de años, más o menos. Así, no es sorprendente que carezcamos de pruebas de formas más antiguas. Pudiera haber nos desconcertado el hecho de que las algas verdiazules

aparecieron en fase tan temprana de la evolución, pero deberíamos tener en cuenta que dispusieron de 1 000 millones de años para ello, y, como no tenemos manera de calcular la duración de la evolución prebiótica por medio de algún procedimiento independiente, nuestra "sorpresa" ante su aparición en aquella época simplemente refleja nuestra ignorancia combinada con nuestra antigua suposición (por carecer de buenas razones) de que los microorganismos aparecieron más tarde. Los árboles genealógicos moleculares, aunque interesantes, por el momento son demasiado incompletos para que den algún fuerte apoyo a cualquier teoría. Una vez más, sólo podemos decir que estos datos no se oponen a la panspermia dirigida, e incluso podríamos considerarlos de importancia.

Ahora debemos examinar el otro lado de la cuestión. ¿Hay buenas razones para rechazar la panspermia dirigida? Ciertamente, hay uno o dos tipos de argumentos que podrían hacerlo a uno sentirse incómodo.

Uno de ellos se refiere a la edad de las estrellas que contienen razonable abundancia de elementos pesados. Su edad debe ser de varios miles de millones de años menor que la del universo. Por ahora, este último número es aún objeto de debate. Si investigación adicional llegase a sostener una cifra situada en el extremo menor de la gama, entonces la edad de las estrellas más habitables sería apenas de 6 000 o 7 000 millones de años. Esta edad dejaría muy poco tiempo para el nacimiento y desarrollo de la supuesta civilización superior capaz de haber enviado el cohete, quizá dejaría apenas 2 000 o 3 000 millones de años. Si reflexionamos, veremos que este argumento no tiene mucha fuerza. ¿Por qué no habrían de ser suficientes 2 000

millones de años? Hemos visto que la fase más larga de la evolución en la Tierra fue ocupada sólo por microorganismos, en un periodo de 2 000 millones de años o más. Si en el otro planeta esta fase se hubiese acortado, digamos a 500 millones de años, y la fase prebiótica no hubiera sido demasiado larga, entonces no parece imposible que en 2 000 millones de años hubiese avanzado la evolución a una forma superior de vida partiendo de cero. Dicho en otros términos, si las últimas fases de la evolución en nuestro planeta —que según revelan los testimonios fósiles admitidos, desde los organismos más primitivos con partes duras hasta el hombre— tomaron únicamente 600 millones de años, ¿por qué en las fases anteriores, en condiciones quizá más favorables, no podría haberse desarrollado con igual rapidez? Es difícil refutar la panspermia dirigida por esta razón, a menos que pudiera demostrarse que el Sol es, en realidad, una de las estrellas más antiguas del tipo requerido. Las pruebas actuales indican que esto es improbable.

Quizá el argumento más contundente contra la hipótesis de la panspermia dirigida es la ausencia de todo indicio de eucariotos en las rocas más antiguas. Si enviáramos microorganismos a algún planeta distante, con seguridad trataríamos de despachar uno o dos eucariotos cuidadosamente elegidos, junto con varios de los procariotos más comunes, escogidos con cuidado, por cuanto todas las muchas especies que hay en la Tierra pueden metabolizar su alimento utilizando oxígeno, procedimiento mucho más eficiente que la glucólisis, es decir, el método por el que el alimento se digiere sin el concurso del oxígeno. Sin embargo, sólo muy pocos eucariotos terrestres pueden vivir sin oxígeno, de los cuales la levadura es el principal

ejemplo. Parecería, pues, razonable que cultiváramos eucariotos especiales, derivados de los que ya tenemos, que fueron especialmente destinados a vivir en condiciones prebióticas, pues aunque enviáramos algo semejante a las actuales levaduras sería probable que pronto perdieran su capacidad de utilizar el oxígeno en un ambiente en que hay poco o nada de éste. Por desgracia, la misma tendencia a perder potenciales facultades útiles se observa en otras especies de eucariotos. Por ejemplo: se ha argumentado que la razón fundamental para el éxito de los eucariotos y su aptitud para transformarse en muchas especies diferentes es su capacidad de realizar la fagocitosis —comerse otros, casi siempre organismos más pequeños—. Esto hace posible establecer una cadena alimentaria y con ella la oportunidad de obtener considerable diversificación. Para realizar esto, los eucariotos han desarrollado varias estructuras moleculares únicas —microtúbulos, actina, miosina, etc.— que los ayudan a moverse y engullir otros seres. Pero, en condiciones prebióticas, sobre todo después de la infección por la panspermia dirigida, sería improbable que los mares estuvieran rebosantes de microorganismos debido a que quizá no había alimento suficiente para mantener una densa población. Por el contrario, habría que esperar en estas fases primitivas que las células fueran unas cuantas y estuvieran aisladas entre sí. En tales circunstancias, un organismo potencialmente capaz de comer a otros encontraría demasiado pocos para hacer de ellos algo más que una fuente menor de alimentación. La selección natural bien podría haber sido causa de que los organismos perdieran todas estas estructuras moleculares más bien superfluas, en cuya fabricación hubieran tenido que gastar energía y, en lugar de ello, se vieron obligados a

concentrarse en la evolución de las que fueran capaces de hacer mejor uso del caldo. La otra propiedad que debió de haber sido de considerable valor habría sido la fotosíntesis y con seguridad habríamos enviado algunos organismos capaces de efectuar esta compleja operación, pero que vale la pena, porque cuanto más energía pudiera obtener del Sol una célula menos necesitaría obtenerla del caldo. Pero las células fósiles más primitivas hasta ahora encontradas parecen ser de este tipo: las algas verdiazules. De nuevo, parece como si el argumento contra la panspermia dirigida tuviera muy poca fuerza, y las pruebas, si hay alguna, parecen apoyar la tesis, aunque muy débilmente.

Por lo tanto, nos hallamos en una situación poco favorable. Tenemos dos teorías distintas, muy diferentes entre sí y, sin embargo, parece que somos incapaces de decir cuál de ellas es más probable que sea la correcta y mucho menos decidirnos en forma definitiva por una de las dos. ¿Por qué ocurre así? ¿Las teorías son deficientes por alguna razón o el tema resulta de especial dificultad?

Creo que contra la teoría de la panspermia dirigida se aducen dos diferentes críticas que son por completo de carácter opuesto. La primera, que mi esposa ha expuesto más de una vez, es que en realidad no se trata de teorías sino de ciencia ficción. Esto no significa un cumplido, aunque quizá pudiera interpretarse así. Corre la versión de que un servicio de información reunió en una ocasión a un grupo de científicos distinguidos sin indicarles de algún modo por qué solicitaba su consejo. Al comienzo de la reunión, el servicio explicó haber llegado a la conclusión de que necesitaba saber qué progresos científicos se esperaban en el futuro, de manera que pudiera estar preparado para la posible repercusión de la tecnología

consiguiente en las diversas tareas que la institución había de realizar. Entonces, un conocido físico se levantó y dijo que se había invitado al conjunto de personas menos indicadas. “Todos nosotros somos demasiado sanos —dijo— y esto nos hace ser conservadores. A quienes debieran haber consultado es a los escritores de ciencia ficción. *Ellos* son quienes pueden ver, con mayor claridad que nosotros, lo que el futuro nos reserva.”

Hay algo de verdad en esto, aunque conviene separar un poco la paja del trigo. Los primeros escritores de ciencia ficción, como Julio Verne y H. G. Wells, no lo han hecho del todo mal describiendo al hombre en la Luna, extraordinarios submarinos, etc. Lo contrario también es cierto. Algunos de los más ilustres científicos han hecho absurdos comentarios acerca de lo que *no* sucederá. Pero no es esto lo que mi mujer pensaba. Lo que ella daba a entender era que la idea se parece demasiado a la ciencia ficción convencional —la civilización superior en otra parte, el cohete con poderes excepcionales (¿un símbolo fálico?), incluso los pululantes microorganismos que infestan la tierra virgen—. ¿Cómo *pueden* tomarse en serio semejantes cosas? Todo esto huele a ovis o al *Carro de los Dioses* u otras formas comunes de la tontería contemporánea.

Contra esto sólo puedo aducir que si bien la idea tiene sin duda muchos de los estigmas de la ciencia ficción, su cuerpo es mucho más sólido. En realidad, no tiene el rasgo importante de casi todas las obras de ciencia ficción, que es un gran salto de la imaginación, que disfraza en forma frenética los inverosímiles fundamentos científicos de los que se da este salto. Cada uno de los detalles que contribuyen a formar el argumento requerido se basa en cimientos

bastante sólidos de la ciencia contemporánea: la edad del universo, la probable existencia de otros planetas, la composición de los mares prebióticos, la resistencia de las bacterias a las condiciones adversas y la facilidad con que pueden medrar donde casi todos los otros organismos seguramente morirían, el diseño del cohete, etc. De hecho, la idea es más bien poco imaginativa; podría describirse como un conjunto de posibilidades.

Y esto nos conduce a la otra crítica: que la idea en realidad es demasiado pedestre para ser cierta, que sólo necesita nuestra actual tecnología más el tipo de desarrollo lógico de la misma que se producirá dentro de unas cuantas decenas de años. De todos modos, diría esta crítica, esa supuesta civilización avanzada, si alguna vez alcanzó el nivel al que ha llegado la nuestra, es seguro que ha progresado mucho más, hasta planos de la ciencia y la tecnología que ni siquiera nos es dado vislumbrar. Así pues, ¿no es absurdo llevar la discusión teniendo como única base lo que sabemos hoy? ¿No resultará inevitablemente falso todo esto?

Este argumento tiene cierta fuerza, pero se le podría impugnar en varias formas. En primer lugar, afirmaríamos que Orgel y yo intentábamos elaborar una teoría científica, y no es científico no comprometerse y proclamar que a la larga todo será posible. Más aún, en realidad no tenemos ahora la tecnología necesaria para enviar bacterias a ningún planeta fuera del Sistema Solar, aunque, como hemos dicho, contamos con una buena base para esta tecnología. La idea de la panspermia dirigida tampoco se restringe por fuerza a la tan franca consideración que hemos esbozado. Nuevas tecnologías abrirían mejores posibilidades y, cuando menos, ofrecerían mayor oportu-

nidad de éxito que cualquier cosa que se pudiera esperar, en este siglo por lo menos. Por último, si se me arrinconara, por supuesto que levantaría la bandera: "Las bacterias pueden ir más allá", y proclamaría, aunque no sin alguna duda sobre lo que el futuro nos puede deparar, que, *cualquiera que sea* la nueva tecnología inventada, este lema seguirá siendo cierto. Habrá siempre un límite más allá del cual lo único que en la práctica podríamos enviar serán las bacterias. A quienes dijeren que en los siglos venideros los proyectos de esta clase serán demasiado fáciles, les preguntaría: "¿Tu cohete podría llegar a Andrómeda? Y si pudiera, ¿qué enviarías en él?"

Ninguno de estos argumentos me parece muy prometedor, pues no parecen llegar al meollo del asunto. En lo que deberemos concentrarnos no es tanto en lo atractivo de la idea, sino en sus méritos de teoría científica por derecho propio. Cuando hacemos esto vemos que en realidad hay otras deficiencias.

La primera es la índole de la prueba utilizada para elaborar la teoría. Gran parte de esto es poco más que pintar el trasfondo. Hay una prueba que pudiera dar serios motivos para la reflexión: es la aparente universalidad del código genético, aunque, como hemos visto, esto es algo que dista mucho de haber sido firmemente establecido.

El problema es que, debido sobre todo a que hemos meditado sobre este tan extraño hecho, Orgel y yo dimos con la idea de la panspermia dirigida. Ello significa que, de acuerdo con las reglas —al menos las reglas que rigen mi juego—, habrá que dar poca o ninguna importancia a la *verificación* de la teoría. El sello de autenticidad de una teoría válida es que prediga en forma correcta hechos que eran desconocidos cuando aquélla se propuso o, me-

jor todavía, que fueran entonces conocidos incorrectamente. Una buena teoría debe poseer cuando menos dos características: primero, estar en agudo contraste por lo menos con alguna idea alternativa y, segundo, permitir predicciones que puedan probarse. Una tercera propiedad deseable, que debe ser una teoría profunda —es decir, debe ser aplicable a una gama muy amplia de observaciones—, en realidad no puede exigirse aquí.

La teoría de la panspermia dirigida satisface sin duda el primer requisito. La dificultad surge cuando llegamos al segundo. La teoría hace una afirmación muy categórica: que los primeros organismos de la Tierra debieron aparecer repentinamente, sin que hubiera indicio alguno de precursores más simples en nuestro planeta. Una segunda aseveración es plausible, pero no esencial para la validez de la teoría: que varios tipos distintos de microorganismos debieron aparecer más o menos al mismo tiempo. Es claro que si tuviéramos un testimonio fósil completo de las primeras células podríamos decidir sobre el asunto en uno u otro sentido, de manera que la teoría no es vacua por completo.

Entonces, la dificultad esencial no es tanto la índole de la teoría como la extrema pobreza de pruebas pertinentes. No sólo son unas cuantas las rocas sedimentarias de aquella época que no hayan sido deformadas en algún aspecto entre la Tierra en su larga historia dentro de la corteza terrestre, sino que, aunque tuviéramos una buena colección de ellas (y parece probable que, con el tiempo, se hallarán bastante más de las que tenemos), seguiría siendo difícil obtener las suficientes para estar seguros de que no falta ninguna prueba esencial. Cuando consideramos lo difícil que ha sido averiguar con todo detalle

la historia de la evolución de un animal tan grande como el hombre primitivo, sobre todo si consideramos cuán reciente fue esa evolución en la escala del tiempo geológico, veremos que la tarea de rastrear la evolución de las primeras células en nuestro planeta es formidable. Ninguna de las otras posibilidades parece muy promisorias. Es válida la esperanza de que los seres vivos contengan "fósiles moleculares" en algunas de sus macromoléculas, pero algo muy insólito habría de suceder para que pudiéramos decidir entre las dos teorías. Lo mismo vale para los experimentos prebióticos simulados. Es verdad que los dos tipos de prueba, en virtud de su índole impresionante, nos han dado esperanzas. La naturaleza complementaria de las estructuras del ADN y el ARN, por un lado, y el experimento de Urey-Miller, por el otro, son cuestiones tan asombrosas que sería sorprendente que no guardaran relación con el origen de la vida. Pero ¿habrá otros tales experimentos? En nuestros días, ¿podrían sintetizarse proteínas en el tubo de ensayo sin la presencia de ribosomas, utilizando exclusivamente ARN mensajero y algún ARN prototransferente cargado de aminoácidos? Si esto ocurriera sería en verdad trascendental. ¿Podríamos llevar a cabo una síntesis prebiótica de ARN en verdad convincente partiendo de componentes elementales, que produjera cadenas lo bastante largas con un grado razonable de exactitud? Y aun si lográramos realizarlo, ¿resultaría tan abrumadoramente cierto que el origen de la vida ocurrió en la Tierra que la idea de la panspermia dirigida pareciera quedar invalidada?

Si decidimos entre las dos teorías, pronto aprenderemos que la verosimilitud no basta por sí misma, aparte por completo el hecho de que suele estar contaminada con

nuestros prejuicios no declarados. A primera vista, la teoría de la panspermia dirigida parece demasiado rebuscada, pero ¿podemos ofrecer sólidas razones que justifiquen esta reacción inicial? Treinta años de experiencia en biología molecular nos han dado la lección de que la verosimilitud no es suficiente. No basta con poner el clavo y darle un golpecito. Es importante remacharlo. Para conferir a una teoría el grado de certeza que necesitamos, debemos someterla una y otra vez a duras pruebas. Y esto, ¡ay!, es lo que no somos capaces de hacer en este caso particular. Cada vez que escribo un artículo acerca del origen de la vida, juro no volver a escribir otro más, debido a que hay demasiada especulación en torno a muy pocos hechos, aunque confieso que, a pesar de esto, el tema es tan fascinante que me parece que jamás me mantendré en mi resolución.

Así pues, lo más que se puede afirmar respecto a la panspermia dirigida es que, sin duda, se trata de una hipótesis científica válida, aunque como teoría es prematura. En forma inevitable esto conduce a la pregunta de si alguna vez le llegará su tiempo. Y ahora debemos andar con cuidado. La historia de la ciencia muestra que es demasiado fácil afirmar, con base en los mejores argumentos científicos, que tal o cual cosa jamás se descubrirá o que esto o aquello nunca podrá hacerse. "Nunca sabremos de qué están hechas las estrellas." "Nunca se podrá contar con la energía nuclear." "Lo de los viajes espaciales es puro cuento." Lo más notable es el poco tiempo que lleva refutar estas predicciones negativas. No es que crea que todas las cosas son posibles. Por ejemplo: creo que la levitación* es algo por completo improbable. Pero,

* Por levitación entiendo el acto de sostenerse uno mismo en el

dejando aparte la levitación (por cierto, es una buena prueba para diferenciar a las personas científicamente inteligentes de las ingenuas), es demasiado fácil formular predicciones negativas aventuradas. Yo mismo no puedo vislumbrar de qué manera llegaremos alguna vez a la conclusión de cómo se originó la vida, pero creo que por lo menos aumentarán las pruebas sobre las cuales se llegará a tal conclusión, aunque cuándo llegarán, si es que alguna vez se llega, a tal nivel que nos haga sentir confiados en que se ha encontrado la solución, es cosa que solamente el futuro podrá decirnos. Todo lo que podemos decir es que el problema —y el problema conexo de la vida en otros mundos— es tan importante para nosotros que, a la larga, sería una desgracia si no halláramos la respuesta.

aire durante un minuto o algo así, por la fuerza de la voluntad, despegado del suelo por completo, sin ayuda *ni aparatos* (no me refiero a aprender a saltar en el aire desde la posición de sentado en un colchón, de modo que uno imagine que está levitando).

XIV. RECONSIDERACIÓN DE LA PREGUNTA DE FERMI

AHORA que ya tenemos una perspectiva de la panspermia dirigida es oportuno retornar por un momento a la pregunta de Fermi: si existen seres inteligentes en otra parte de la galaxia, ¿por qué no han llegado a nuestro planeta?

Michael Hart afirma que, debido a que no hay indicios de ellos, debe significar que somos la única forma de vida superior evolucionada en nuestra galaxia. Su argumento principal es que, si existieran, sería irrazonable por completo imaginarlos estáticos en la misma fase de desarrollo que nosotros, y que, por consiguiente, es probable que hubiesen producido una tecnología muy avanzada que, según cree, les habría permitido fabricar naves espaciales capaces de viajar a distancias de decenas de años luz a tales velocidades como de un centésimo a un décimo de la luz y fundado nuevas colonias en alguna parte. Una vez que dichas colonias hubiesen tenido tiempo para asentarse y expandirse en sus nuevos hogares, a su vez seguirían enviando a otros seres en naves espaciales para fundar nuevas colonias. De esta manera, saltando de un planeta a otro, se habrían propagado por toda la galaxia.

El tiempo que esto llevara dependería de varios factores: la velocidad de las naves espaciales, el tiempo promedio de asentamiento, si se desplazaran siempre hacia afuera o lo hicieran en viajes sucesivos, de una manera más al azar, etc. El sorprendente resultado es que, sin importar la velocidad calculada, el tiempo para abarcar toda la galaxia no sería tan grande como pudiera haberse esperado: quizá menos de un millón de años, aunque algunas combinaciones de cifras dan tiempos de hasta 100 millones de años. Tomando en consideración cuán anterior debió haber sido el comienzo de la vida en otra parte, como nuestro planeta nació relativamente tarde, Hart sostiene que esos seres inteligentes ya deberían haber llegado a nuestro planeta.

Como el lector podrá ver de lo que se ha analizado en este libro, el argumento de Hart está muy lejos de ser irrefutable. Podría resultar ser tarea demasiado agotadora fabricar naves espaciales que pudieran transportar viajeros a otros planetas habitables y que pudieran establecer colonias en éstos, tan agotadora que algunas de esas civilizaciones superiores jamás hubieran podido construir las. Quizá se cansaron de la tecnología antes de tiempo y adoptaron un estilo de vida diferente, bien cayendo en un ocio placentero, tal como Gunther Stent ha vaticinado que lo haremos, o bien cultivando un modo de vivir puramente espiritual, tal vez mantenido por medio de fármacos psicodélicos elaborados con ese fin. Quizá se destruyeron a sí mismos, como muchos temen que lo hagamos, debido a su avanzada tecnología nuclear. Esto es probable sobre todo si se aplica a culturas lo bastante emprendedoras como para aventurarse en viajes espaciales. Aunque no todas las civilizaciones superiores hubie-

sen caído en uno de estos modos de vida, de tal manera que siempre hubiera habido alguna que lograra construir naves espaciales adecuadas, las pérdidas habrían sido considerables.

Si hubieran podido llegar a un nuevo planeta, el ambiente tal vez fuese tan desfavorable que los viajeros se habrían visto obligados a modificarlo hasta el punto de hacerlo habitable. Si necesitaran oxígeno, como parece probable, podrían haber tenido que practicar la agricultura en su nuevo hogar en extensa escala, de modo que las plantas produjeran oxígeno para los colonos. Quizá incluso tendrían que haber llevado a cabo una extensa labor de ingeniería genética en su nave espacial antes de que la forestación pudiera efectuarse con éxito, debido a que las características de la atmósfera y el suelo del planeta no fueran adecuadas para que las plantas medraran en ellos. Esta modificación ambiental podría haber tomado tanto tiempo que pudo haber habido peligro real, debido a algún accidente, y la colonia se hubiese extinguido. Después de todo, algunas de las primeras colonias inglesas establecidas en América lograron subsistir y otras fueron abandonadas por alguna razón. Aun en el caso de que los expedicionarios hubiesen logrado fundar una nueva civilización, seguramente que sus descendientes habrían preferido vivir en ella durante mucho tiempo antes de aventurarse, una vez más, a emprender el difícil y traumático proyecto de fundar otra más.

Por todas estas razones, las pérdidas podrían haber sido tantas que no fuera posible implantar un proceso continuo. Para extender la vida indefinidamente, cada civilización debería, en promedio, enviar tantas expediciones que por lo menos una de ellas sobreviviera y, con el

tiempo, ella, a su vez, enviara un número semejante de colonias. En resumen, tal vez se hayan hecho algunos cuantos intentos para esparcirse por toda la galaxia, pero no podemos estar seguros de que no todos terminaron en fracaso después de los primeros pasos.

Por otro lado, si las supuestas civilizaciones extraterrestres hubiesen intentado, tal vez como medida provisional, ensayar la panspermia dirigida y hubiesen enviado microorganismos, podría ser que hubiesen construido tales naves espaciales en época bastante temprana de su progreso tecnológico, antes de que cualesquiera de sus individuos se hubiesen aniquilado entre sí o perdido interés, y las naves podrían haber tenido un alcance mucho mayor. Contra esto, estos seres debieron de haberse dado cuenta de que el tiempo para la consolidación fuera ahora de miles de millones de años, comparados con los simples 1 000 o 10 000 años necesarios para expandir la colonia de hombres espaciales hasta ocupar por completo un planeta. Por supuesto, esos individuos podrían haber considerado la panspermia dirigida como útil recurso a lo largo plazo para crear una atmósfera con oxígeno en muchos lugares que sus remotos descendientes algún día pudieran ocupar para su provecho.

Aunque se aceptara el método de Hart para la colonización galáctica, la gente ha sido reacia a aceptar su conclusión de que estamos solos en la galaxia. En vez de eso hubieran preferido creer que una civilización superior sin duda podría haberse diseminado por toda la galaxia, pero por alguna razón los colonos no se han dejado ver por nosotros hasta hoy. Son muy pocos los astrónomos dispuestos a dar algún crédito a la aparición de los ovnis, aunque sólo se deba al elevado porcentaje de informes

claramente falsos. Es cierto que siempre queda un resto de observaciones inexplicadas, pero es desanimado saber que cuando aumenta la cantidad de informes acerca de los ovnis, sea por miedo o por la promoción de los medios informativos, el número de informes sin explicación también crece, lo que indica que tal vez también carecen de importancia.

Sin embargo, nada descarta la posibilidad de que la Tierra fuese inspeccionada de manera transitoria alguna vez en el pasado, por ejemplo: hace 40 millones de años, y después abandonada por inhabitable. Quizá los visitantes no creyeron que nuestro planeta pudiera constituir un hogar ideal para ellos, o tal vez, por razones de respeto a la ecología, no quisieron trastornar la flora y la fauna terrestres. John Ball ha insinuado que podríamos ser parte de un parque cósmico de flora y fauna, al que se deja desarrollar sin alterarlo. Quizá nos hallemos sometidos a algún tipo de discreta vigilancia por seres superiores de un planeta de alguna estrella vecina. No está muy claro de qué manera estos guardianes cósmicos realizarían esta labor sin que los descubriéramos, pero con un sistema perfeccionado tal vigilancia sería hasta cierto punto fácil. En todo caso, estamos delatando nuestra existencia por los programas de televisión que, como ruido de ondas ultracortas, escapan al espacio y se difunden en el exterior a la velocidad de la luz.

Otra insinuación sería que hubiesen llegado al Sistema Solar, pero hubieran decidido no visitar la Tierra. Michel Papagiannis ha planteado la posibilidad de que los seres extraterrestres hubieran vivido en su nave espacial situada en el cinturón de los asteroides, utilizando la luz del sol como materia prima para sus actividades in-

dustriales. Contra esto, David Stephenson ha señalado que cabría esperar que tales seres se hallaran más alejados, ocultos cerca de la órbita de Neptuno y que sólo de cuando en cuando incursionarían por los asteroides en busca de material carbonoso.* Sería en extremo difícil que descubriéramos una nave espacial, aunque fuera muy grande, en un lugar tan remoto como la órbita de Neptuno, o incluso en el cinturón de asteroides, pues éstos tenderían a camuflarla. Ninguna de estas insinuaciones puede ser descartada por imposible, pero tienen muchos visos de ciencia ficción: las hipótesis son demasiado extremas y las cadenas de razonamiento largas en exceso. Uno es reacio a admitirlas sin que haya por lo menos alguna otra clase de prueba en su favor.

Por supuesto, como he sostenido, si para la vida puede ser muy difícil seguir adelante, la conclusión de Michael Hart de que estamos solos en la galaxia pudiera ser correcta, aunque sus argumentos, como hemos visto, no son demasiado convincentes.

Si en verdad existieran otros seres inteligentes en la galaxia y si por una razón u otra hubieran decidido quedarse en casa, tal vez intenten enviarnos alguna clase de señales. Es un tema demasiado complicado para exponerlo aquí en su totalidad. Es mucho más fácil enviar señales que cohetes, pero aun con aquéllas habría dificultades. ¿Qué longitud de onda deberían usar? ¿Las señales deberían ser enviadas en todas direcciones o transmitirlas en un haz estrecho para hacerlas llegar más lejos? De ser así, ¿en qué dirección deberían enviarlas? ¿Qué deberían en-

* Los artículos de Papagiannis y Stephenson aparecen en la colección de Donald Goldsmith, *The Quest for Extraterrestrial Life. A Book of Readings* (véase "Otras lecturas" en la p. 205).

viar? Los números primos serían una señal preliminar predilecta, pues son los mismos dondequiera como en gran parte las matemáticas, la física y la química. Por desgracia, temas de disciplinas liberales, como literatura e historia, probablemente resultarían casi ininteligibles para otras civilizaciones, por lo menos al primer contacto. Es discutible que su música tuviera algún parecido con la nuestra.

Aunque existieran muchas civilizaciones en la galaxia, no se llegaría a la inevitable conclusión de que están transmitiendo señales al espacio. ¿Deberíamos enviar mensajes? Como dice Tommy Gold, si tenemos algo de sentido común, lo mejor sería que permanezcamos callados. Tal vez sean muchos los que escuchan y ninguno el que habla. Se han realizado modestos intentos por escuchar tales señales, así en los Estados Unidos como en la Unión Soviética, hasta ahora sin ningún resultado. Cualquiera cosa que sea lo que se piense acerca de la probabilidad de que haya otra vida en la galaxia, parece muy juicioso poner en acción un programa que fuera costoso para escuchar posibles señales, sobre todo porque podrían obtenerse además útiles conocimientos astronómicos.

A la larga, la pregunta de Fermi exigirá una respuesta. Una vez conocidas la extensión e índole de nuestra galaxia, sería preocupante no saber si somos sus únicos habitantes. Incluso sería muy peligroso no enterarnos. Si lo expuesto en este libro demuestra algo, es que decidir en un sentido o en otro no va a ser fácil. El problema sigue siendo formidable reto para nuestra ciencia y nuestra tecnología, lo mismo para nosotros que para nuestros descendientes.

XV. ¿POR QUÉ HEMOS DE PREOCUPARNOS?

LEGADOS a este punto, el lector puede sentirse de alguna manera defraudado. Si hace tanto tiempo que comenzó la vida y si resulta en extremo difícil descubrir cómo sucedió, ¿por qué hemos de preocuparnos por ello? El hombre y la mujer comunes, dedicados a sus tareas cotidianas, muy bien pudieran pensar, cualquiera que fuera el resultado, que para ellos no significa nada.

En mi opinión, este punto de vista es erróneo por dos razones, una particular y otra general. Permítaseme fundamentar mi punto de vista: supongamos que el comienzo de un sistema autorreproductor de la especie correcta partiendo de los componentes de la Tierra primitiva no es, como temíamos, una tarea casi imposible, sino, por el contrario, más o menos fácil. Podría ser que, gracias a una ingeniosa elección de componentes y condiciones, se formara de manera espontánea en el laboratorio un sistema vivo en tiempo relativamente corto: un año o tal vez menos. Me es difícil creer que tal descubrimiento no causaría tremenda conmoción en casi toda persona instruida y, sobre todo, entre la gente joven. El efecto psicológico de ser capaz de demostrar de manera gráfica algo

que en realidad está sucediendo puede ser muy grande, como lo demuestra el formidable impacto que causaron las fotografías de nuestro planeta tomadas desde el espacio, aunque dudo que cualquier experimento de laboratorio pueda tener tan grande atractivo estético como las imágenes de nuestro hermoso globo circundado de nubes, flotando en el espacio.

Experimentos reproducibles que demuestren que un rudimentario sistema vivo puede evolucionar partiendo de materias puramente químicas no vivas reforzarían nuestro sentimiento de unidad con la naturaleza en el más amplio sentido, es decir, con los átomos y moléculas que componen todos los materiales del planeta. No sé si tal descubrimiento tendrá además esas consecuencias "prácticas" tan deseadas por senadores y hombres de negocios (¿qué valor práctico tiene un juego de pelota?), que para ellos significan: ¿sirve para curar algo?, ¿servirá para ganar dinero? En verdad, no lo sé, pero han sido pocos los descubrimientos científicos fundamentales de los que no haya derivado alguna aplicación útil.

Pero algún lector crítico replicaría: seguramente usted no tiene derecho a recurrir a este argumento, porque es muy probable, si bien no más que probable, que seremos incapaces de producir tal demostración experimental en un futuro previsible. El verdadero origen químico de la vida pudo ser un acontecimiento raro en extremo, demasiado difícil de lograr para reproducirlo ahora mismo, sobre todo si consideramos el esfuerzo científico bastante modesto que se está haciendo para resolver el problema.

Tal argumento sólo puedo refutarlo en términos muy generales. Basaría mi posición en la muy notable situa-

ción en que se encuentra la raza humana después de 5 000 o 10 000 años de civilización. La cultura occidental en que vive la mayoría de los científicos se basó originalmente en un conjunto de creencias religiosas y filosóficas bien estructurado. Entre éstas podemos incluir la idea de que nuestro planeta era el centro del universo y que el tiempo transcurrido desde la Creación era más o menos corto; la creencia en una irreductible distinción entre el alma y el cuerpo; y la probabilidad, si no la certeza, de la vida después de la muerte. Estas ideas se combinan con una excesiva confianza en las doctrinas predicadas por ciertos personajes históricos, como Moisés, Jesucristo y Mahoma.

Ahora bien, lo notable de la civilización occidental, considerada en amplio sentido, es que mientras los restos de estas creencias siguen siendo sustentados por mucha gente, la mayoría de los científicos modernos no acepta ninguna de ellas. En vez de eso, tiene un conjunto de ideas muy diferentes que incluyen su concepto de la vida: la naturaleza exacta de la materia y la luz y las leyes a que obedecen, el tamaño y naturaleza general del universo, la realidad de la evolución y la importancia de la selección natural, las bases químicas de la vida y, en particular, la índole del material genético y muchas otras. Algunas de estas teorías llevan el nombre de los "profetas" científicos relacionados con ellas, como Newton, Darwin y Einstein. Estas personas son tenidas en alta estima y, sin embargo, sus ideas no se consideran más allá de la crítica ni sus vidas especialmente dignas de alabanza; su trabajo es lo que se valora.

Un científico moderno, si es lo bastante perceptivo, suele sentir la extraña sensación de que debería estar vi-

viendo en otra cultura. Sabe mucho y, sin embargo, tiene plena conciencia de cuánto queda por descubrir todavía. Cree firmemente que necesitamos comprender estos profundos misterios y también que, con el tiempo, mediante esfuerzos e imaginación, lo lograremos. Esto da un hondo sentido de urgencia a su indagación, sobre todo porque no está dispuesto a aceptar las tradicionales respuestas faltas de sentido crítico sin apoyo científico.

Aunque hay poca hostilidad activa contra su punto de vista —los creacionistas son un fastidio, pero hasta ahora sólo en menor escala—, no obstante lo desconcierta la acogida que se da a su trabajo. Una parte considerable del público muestra vivo interés por los descubrimientos de la ciencia moderna, de modo que con frecuencia se le pide que dé conferencias, escriba artículos, aparezca en televisión, etc. Y, sin embargo, aun entre los que se interesan por la ciencia —y mucha gente es indiferente o hasta un poco hostil contra ella—, ésta no parece influir gran cosa sobre su visión general de la vida. Esta gente o bien se aferra a anticuadas creencias religiosas y relega la ciencia a un compartimiento muy distinto de su mente, o la absorbe de modo superficial y, sin empacho, la combina con ideas muy dudosas, como la percepción extrasensorial, decir la buena ventura y la comunicación con los muertos. La observación de que “los científicos no lo saben todo” suele identificar a tales sujetos. Los científicos están terriblemente conscientes de que no lo saben todo, pero suelen reconocer lo absurdo cuando se lo encuentran.

Sólo en los últimos 10 años ha sido cuando la gente ha reconocido las muchas implicaciones que tiene la idea de que el hombre es un animal biológico que ha evolu-

cionado en gran parte gracias a la selección natural. Aun hoy, son muy pocos los profesores de ética que enfocan el tema desde este punto de vista. Son muy pocos los que al observar la afición masiva de la gente por el deporte organizado se preguntan por qué tantos individuos se comportan de esta manera tan extraña, y son menos aún los que piensan si el difundido entusiasmo por el fútbol no será quizá en parte el resultado de las guerras entre tribus a que se entregaron las muchas generaciones de nuestros antepasados.

El hecho es que los mitos de ayer, que nuestros antepasados no consideraron como tales sino como verdades vivas, se han desmoronado, y aunque no estamos seguros de si podremos utilizar con buenos resultados alguno de los fragmentos restantes, éstos son demasiado raquíticos para que subsistan como un conjunto de creencias entrelazadas y organizadas. Sin embargo, la mayoría de la gente está felizmente inconsciente de todo esto, como puede verse por la entusiasmada bienvenida que se da al papa dondequiera que va.

Por supuesto, muchos filósofos modernos aceptan esta posición general, pero casi todos ellos parecen tan desolados por el desmoronamiento de las viejas creencias que sólo rezuman un pesimismo deprimente. Sólo los científicos parecen haber captado el meollo del asunto; esto se debe en gran parte al aliento que les da el tremendo éxito de la ciencia, sobre todo en los últimos 100 años. Aunque los problemas económicos y políticos moderan el optimismo del científico, en cambio este optimismo es casi ilimitado en cuanto a su capacidad para elaborar un nuevo conjunto de creencias sólidamente fundado en la teoría y la experiencia por medio de un cuidadoso es-

tudio del mundo que lo circunda y, en último término, de sí mismo y de otros seres humanos. Sólo quien se dedique activamente a investigar las complejidades del cerebro puede darse cuenta de cuán lejos llegaremos en alguno de estos problemas; pero incluso en este caso se cree que en unas cuantas generaciones habremos llegado al meollo del asunto.

Contra este fondo deberemos enfocar el origen de la vida. Entonces veremos que éste es en realidad uno de los grandes misterios a que nos enfrentaremos cuando tratemos de descubrir cómo está constituido el universo y, en particular, localizar nuestro lugar en él. El problema tiene la misma categoría que otras importantes preguntas, muchas de las cuales fueron formuladas con claridad por primera vez por los griegos: la naturaleza de la materia y de la luz, el origen del universo, el origen del hombre y la naturaleza de la conciencia y del "alma". No mostrar interés por estos temas en verdad es ser inculto, sobre todo, como ahora que tenemos una esperanza muy legítima de darles respuesta en forma que se hubiera considerado milagrosa aun en tiempos como los de Shakespeare.

El origen de la vida también tiene íntima relación con otro tema importante que sólo ha sido tratado por encima en este libro: ¿estamos solos en el universo? Estudiar esto aquí en detalle nos llevaría demasiado lejos, porque hay muchos otros aspectos del problema que deben ser considerados, por ejemplo: exactamente cómo enviar y recibir señales a través de inmensas distancias. Ante todo, porque no podemos juzgar si el origen de la vida es un suceso muy raro o muy frecuente, todavía hemos de enfrentarnos a la pregunta de si hay otros seres inteli-

gentes en el espacio. Adviértase que si alguna civilización anterior hubiese enviado microorganismos a nuestro planeta por medio de un cohete, es más probable que hubiese enviado muchos cohetes, algunos a estrellas cercanas a ella y no sólo al Sistema Solar. Esto implicaría que aunque la vida en la galaxia fuese rara en extremo, no obstante podría haber varios planetas más que hubieran sido infestados hace unos 4 000 millones de años o algo así. Quizá tales planetas estarían ahora muy distantes de nosotros a causa del movimiento de dispersión de las estrellas al girar lentamente en torno al centro galáctico, de modo que aun si a la vida en tales lugares hubiese alcanzado ahora una alta etapa de desarrollo estarían demasiado lejos de nosotros para que nos comunicáramos fácilmente con ellos.

No se necesita mucha imaginación para comprender el efecto que nos causaría recibir algún auténtico mensaje de otra civilización. Sólo por parecer tan remota esta posibilidad, la gente no permanece despierta por la noche preocupándose por ello. Nuestros descendientes pueden adoptar un punto de vista distinto, pues con instrumentos sumamente perfeccionados podrían examinar el espacio, tratando de describir qué hay, si hay indicios de alguna forma de vida y, sobre todo, cómo explorar este vasto y vacío universo que vemos a nuestro alrededor.

EPÍLOGO

¿Contaminaremos la galaxia?

QUEDA por examinar un tema. Aunque resultara que nunca llegásemos a saber con certeza cómo empezó la vida en el planeta, todavía nos enfrentaríamos en el futuro a la cuestión práctica: ¿debemos tratar de que nuestra forma de vida tenga comienzo en otro lugar del universo? Y, de ser así, ¿cómo lo haríamos?

Muchos de estos temas se han tratado ya en el capítulo VIII. Podemos esperar que para entonces (si no nos hemos destruido nosotros mismos llevados por nuestra propia locura) seremos capaces de averiguar si las estrellas más cercanas tienen planetas, quizá mediante instrumentos perfeccionados colocados en la Luna. Incluso ya podríamos saber cómo se pudo formar nuestro Sistema Solar, gracias a la prolongada exploración de otros planetas, del cinturón de asteroides, los cometas, etc. Todo esto nos permitiría juzgar cuáles planetas es probable que contaran con un ambiente bastante favorable. Cabe esperar que, para entonces, el diseño de cohetes haya mejorado enormemente, de modo que puedan viajar a muy largas distancias y funcionar de manera confiable durante mucho tiempo, aunque no lleguen a alcanzar la velocidad de la luz.

Con todo esto a nuestra disposición, ¿qué haremos? Tal vez una de las cosas más fáciles sería tratar de hacer lo mismo que ya hicimos con Marte: no enviar personas, por lo menos al principio, sino instrumentos que pudieran informarnos. Hasta este requisito, en apariencia sencillo, en el aspecto técnico parece todavía muy alejado de nuestras posibilidades actuales. Colocar con éxito una nave espacial en la órbita de Marte requeriría difíciles hazañas de ingeniería, sobre todo después de tan largo viaje y a tal distancia. En órbita, su sensibilidad sería mucho menor que si pudiera posarse sobre la superficie del planeta (si es que la tiene); pero posarse en la superficie exigiría una tecnología aún más avanzada. Algunos de estos problemas podrían resolverse si se enviaran personas en la misión; pero esto plantea toda una nueva serie de problemas, el menor de los cuales no sería asegurarse de que llegaran vivas. Las probabilidades de fundar una colonia, en las muy desfavorables condiciones que quizá se encontraran allí, o de que las personas hicieran vivas el viaje de retorno parecen infinitamente remotas. Es irónico que, como ha indicado Tommy Gold, el resultado más probable, si después de todo se lograra, sería que algunas de las bacterias que los humanos llevaran consigo llegaran a un océano primitivo, donde sobrevivirían y se multiplicarían hasta mucho tiempo después de la muerte de los astronautas. En tal caso, ¿por qué no enviar bacterias para empezar? Luego que nos decidiéramos por esta opción, todos nuestros problemas de proyectos se simplificarían, como hemos descrito en otros capítulos. Si hay algún ejercicio intelectual que prepare la mente para que juzgue de manera más favorable la panspermia dirigida, sería imaginar lo que podría-

mos hacer en la futura exploración y colonización del espacio.

Pero obsérvese que, en nuestro entusiasmo por contaminar a nuestros vecinos, hemos pasado por alto un detallito. ¿Qué pasaría si el planeta que eligiéramos ya hubiese desarrollado otra forma de vida? No sabemos si nuestros descendientes serán capaces de llegar a la conclusión de que la vida es muy común en el universo o bien muy rara. Ni siquiera podemos juzgar si sus conjeturas serían correctas. La tecnología para determinar si una estrella cercana tiene planetas y, en términos generales, cómo son estos planetas, no parece demasiado distante, pero la tecnología necesaria para averiguar si en ellos hay vida o si no la hay, en una forma o en otra, parece estar muy lejos en el futuro. Podemos analizar estos problemas en escala más reducida si nos limitamos a tratar de descubrir si existe alguna forma de vida en los planetas y satélites de nuestro propio Sistema Solar. Las únicas pruebas fidedignas son las que provienen de astros en que se ha efectuado algún descenso. Es probable que el apremio para explorar el espacio llegue a un alto nivel mucho antes de que sepamos si lo que vamos a explorar sostiene alguna forma de vida.

Es difícil predecir cuál será el desenlace de tal situación. Nuestros descendientes se enfrentarán a nuevos problemas de moralidad cósmica. Como seres sumamente desarrollados, ¿estamos autorizados a perturbar la frágil ecología de otro planeta?, ¿nos sentiremos obligados a respetar la vida, *cualquiera* que sea la forma que haya adoptado? En nuestro planeta tenemos problemas similares, como cualquier vegetariano diría, aunque no sería mucha la gente que se sintiera obligada a respetar la vida

del virus de la viruela. Quizá se produzca una profunda divergencia de opiniones entre nuestros descendientes, aunque no puedo evitar pensar que serán los carnívoros quienes querrán explorar el espacio y los vegetarianos quienes tal vez se opongan a ello.

De pasada, diré que no creo que estos temores se apliquen a las naves espaciales que hoy día estamos enviando más allá del Sistema Solar. Aunque albergasen alguna bacteria, sería muy improbable que estos microorganismos sobrevivieran al viaje a través del espacio y a la entrada en otro sistema solar. La probabilidad de que infestaran otro planeta es tan extremadamente pequeña que sería ridículo preocuparnos por ello.

Una condición clara es no tratar el asunto con precipitación. Dado que, con suerte, tenemos milenios por delante y que conforme pase el tiempo sabremos más y seremos capaces de emprender tareas más difíciles, ¿para qué apresurarnos? Pero incluso este argumento supone que el mundo en lo político será estable por un periodo indefinido. De no ser así, con seguridad habrá presiones por parte de grupos poderosos que quisieran seguir con la tarea, por temor a que surjan circunstancias en que jamás pudiera completarse. Mi prejuicio sería no seguir adelante con demasiada prisa, si en realidad es posible esperar. No debemos actuar a la ligera contaminando la galaxia.

APÉNDICE

EL CÓDIGO GENÉTICO

EL CÓDIGO genético es el pequeño diccionario que relaciona el lenguaje de cuatro letras de los ácidos nucleicos con el lenguaje de 20 letras de las proteínas. Cada triplete de bases corresponde a determinado aminoácido, excepto tres de ellas que señalan la terminación de la cadena polipeptídica. El código se expone más adelante, el cual, por usar abreviaturas, tarda unos momentos en ser comprendido. Las cuatro bases del ARN mensajero se representan en su primera letra: *uracilo*, *citocina*, *adenina* y *guanina*. Cada uno de los 20 aminoácidos se representa por tres letras, casi siempre las tres primeras letras de su nombre; así, GLI vale por *glicina*, FEN, por *fenilalanina*.

A título de ejemplo, consideremos el ángulo superior izquierdo del código. Vemos que tanto UUU como UUC valen para la *fenilalanina*, debido a que FEN aparece escrita en esa posición. En el ángulo inferior derecho vemos que la *glicina* (GLI) está codificada por todos los cuatro tripletes que comienzan con GG, es decir, GGU, GGC, GGA y GGG. Casi todos los aminoácidos tienen varios "codones", pero el *triptófano* sólo tiene uno (UGG), lo mismo que la *metionina* (AUG).

Sorprende que el triplete AUG también sea parte de la señal para “comenzar la cadena”, pues todas las cadenas comienzan con la metionina o un cercano pariente suyo. Este aminoácido inicial suele ser cortado antes de que la proteína sea terminada.

El código que se presenta más adelante es el llamado habitual, del que se vale la inmensa mayoría de los sistemas sintetizadores de proteínas de animales, vegetales y microorganismos. El cuadro no refleja el hecho de haberse descubierto recientemente algunas pequeñas modificaciones. De acuerdo con esta nueva información, los genes de los mitocondrios humanos usan UGA y UGG para el triptófano. UAA codifica la metionina en lugar de la isoleucina. Así, en los mitocondrios humanos, todos los aminoácidos están codificados por dos tripletes cuando menos. Hay en ellos cuatro codones de PARO en lugar de los tres habituales (UGA es ahora el triptófano), pues AGA y AGG también codifican para PARO, en lugar de la arginina.

Otras especies de mitocondrios, como los de las levaduras, son semejantes, aunque las desviaciones del código habitual no son exactamente las mismas que las que ocurren en los mitocondrios humanos.

EL CÓDIGO GENÉTICO

		2°				
1° ↓	→	U	C	A	G	↓ 3°
U		Fe	Ser	Tir	cisH	U
		Fe	Ser	Tir	cisH	C
		Leu	Ser	Paro	Paro	A
		Leu	Ser	Paro	Tri	G
C		Leu	Pro	His	Arg	U
		Leu	Pro	His	Arg	C
		Leu	Pro	Glu	Arg	A
				(NH ₂)		
		Leu	Pro	Glu	Arg	G
			(NH ₂)			
A		Ileu	Tr	Asp	Ser	U
				(NH ₂)		
		Ileu	Tr	Asp	Ser	C
		Ileu	Tr	Lis	Arg	A
	Met	Tr	Lis	Arg	G	
G		Val	Ala	Asp	Gli	U
		Val	Ala	Asp	Gli	C
		Val	Ala	Glu	Gli	A
		Val	Ala	Glu	Gli	G

Los nombres de los 20 aminoácidos y sus correspondientes abreviaturas son:

Ala — Alanina	His — Histidina
Arg — Arginina	Ileu — Isoleucina
Asn — Asparagina (NH ₂)	Leu — Leucina
Asp — Ácido aspártico	Lis — Lisina
cisH — Cisteína	Met — Metionina
Fe — Fenilalanina	Pro — Prolina
Gln — Glutamina	Ser — Serina
Glu (NH ₂)	Tr — Treonina
Glu — Ácido glutámico	Tri — Triptófano
Gli — Glicina	Tir — Tirosina
	Val — Valina

La abreviatura Paro muestra los tres tripletes que pueden terminar la cadena polipeptídica.

EL ARN Y EL CÓDIGO GENÉTICO

El ARN es muy semejante al ADN. En lugar del azúcar desoxirribosa simplemente tiene ribosa (de aquí el nombre *Ácido RiboNucleico*), que tiene un grupo didroxilo —OH, mientras que la desoxirribosa sólo tiene uno —H. Tres de las cuatro bases (A, G y C) son idénticas a las del ADN. La cuarta base, el uracilo (U), es parienta próxima de la Timina (T), pues la timina es el uracilo con un grupo —CH₃ en vez del —H. Esto tiene escaso efecto sobre el emparejamiento de bases. U puede emparejar con A, como en el ADN, y T empareja con A. El ARN puede describirse utilizando el mismo lenguaje que para el ADN, pero con diferente acento. El ARN puede formar una doble hélice, semejante a la del ADN pero no muy idéntica. También es posible formar una doble hélice híbrida

constituida por una cadena de ARN y otra de ADN. En general, son raras las largas hélices dobles de ARN; por lo común las moléculas de ARN son de una sola cadena, aunque suelen estar plegadas sobre sí mismas para formar cortos tramos de hélices dobles.

En los organismos actuales hallamos el ARN empleado con tres propósitos. Unos cuantos virus pequeños, como el de la polio, lo utiliza en lugar del ADN como material genético. Otros virus se valen del ARN de una sola cadena; otros más se valen de él en cadena doble. El ARN también tiene usos con fines estructurales. Los ribosomas, el complejo conjunto de macromoléculas que son el verdadero lugar donde se sintetizan las proteínas, están constituidos por varias moléculas de ARN estructural, ayudados por varias decenas de distintas moléculas proteínicas. Las moléculas que sirven de interfase entre los aminoácidos y los tripletes de bases asociadas con ellos también están constituidos por ARN. Esta familia de moléculas de ARN, llamadas ARN^t (por ARN transportador), se utiliza para llevar cada aminoácido a un ribosoma, donde se agregará a una cadena polipeptídica, cada vez mayor que, una vez completa, se convertirá en proteína plegada.

La tercera —y quizá la más importante— utilización que la célula hace del ARN es que lo convierte en ARN mensajero. La célula no se vale del ADN para efectuar su labor cotidiana, sino que lo conserva como copia de archivo. Para fines funcionales, hace muchas copias de ARN de partes seleccionadas del ADN. Son estas cintas del ARN mensajero las que dirigen la síntesis de proteínas en los ribosomas, utilizando el código genético que mostramos en este apéndice.

En toda exposición detallada sobre el origen de la

vida las propiedades de las moléculas del ARNt cobran mucha importancia, pues hay fuertes sospechas de que ellas, o una versión simplificada de las mismas, aparecen primero, si no en el verdadero comienzo de sistemas de autoduplicación, sí por lo menos poco después. Las moléculas de una cadena de los ácidos nucleicos, y en particular del ARN, se pliegan a menudo sobre sí mismas y giran hacia atrás para constituir cortos tramos de doble hélice donde la secuencia de las bases lo permite. Las moléculas del ARNt son excelente ejemplo de esto. La espina dorsal no cuelga sobre todo el lugar, sino que se pliega para formar una estructura relativamente compacta y bastante intrincada. Esto expone en un punto un conjunto de tres bases (llamado *anticodón*) que empareja con las tres bases apropiadas (llamadas *codón*) en el ARN mensajero. El ARNt funciona como adaptador, con un aminoácido en un extremo y un anticodón en el otro, debido a que no existe mecanismo gracias al cual un aminoácido pueda reconocer el codón (el apropiado triplete de bases en el ARN mensajero) en forma directa. La especificidad del código genético de hoy día está así incorporada en el conjunto de moléculas de ARNt, por lo menos un tipo (y a menudo más) para cada aminoácido, y también en el conjunto de 20 enzimas (una para cada aminoácido) que una a cada aminoácido con las moléculas adecuadas de ARNt. La información para la producción de todos estos componentes básicos para la síntesis de las proteínas (y muchas más) está codificada en los genes, en los tramos de ADN apropiados.

OTRAS LECTURAS

GOLDSMITH, DONALD (comp.), *The Quest for Extraterrestrial Life. A Book of Readings*, University Science Books, Mill Valley, Cal., 1980.

Es una colección de artículos (con un comentario del compilador) que comienza con uno de Giordano Bruno, publicado en 1584. Casi todos los artículos son bastante recientes. Incluye el artículo original que Orgel y yo escribimos acerca de la panspermia dirigida. Algunos de ellos son bastante técnicos, pero el lector común será capaz de captar el sentido de casi todos.

Jastrow, Robert, y Malcom M. Thompson, *Astronomy: Fundamentals and Frontiers*, John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 2a. ed., 1972.

Texto excelente para el lector instruido, pues está dedicado en forma específica a los estudiantes de humanidades. Aunque no usa matemáticas, lleva las ideas hasta un nivel bastante avanzado. La parte más floja es la sección sobre virus, hacia el final.

Miller, Stanley L., y Leslie E. Orgel, *The Origins of Life on Earth*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1974.

Exposición avanzada, adecuada para graduados en alguna ciencia.

Orgel, Leslie E., *The Originis of Life*, John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1973.

Este muy ameno libro es bastante más difícil que el texto presente, pues se escribió pensando en los estudiantes de segunda enseñanza que desean obtener un grado avanzado en disciplinas científicas, pero puede entenderlo cualquier lector.

Stryer, Lubert, *Biochemistry*, W. H. Freeman & Company, San Francisco, 2a. ed., 1981.

Watson, James D., *Molecular Biology of the Gene*, W. A. Benjamin, Inc., Menlo Park, Cal., 3a. ed., 1976.

En realidad, estos dos libros son de texto para estudiantes universitarios, pero ambos están escritos en forma atractiva y sencilla y pueden servir como lectura complementaria para quien desee profundizar en el conocimiento de la química fundamental de la biología moderna. La diferencia entre bioquímica y genética molecular no tiene por qué detenernos. Como ha dicho Arthur K. Fritzmann: "Ahora todos somos biólogos moleculares".

COLECCIÓN



POPULAR

Para festejar

cumplidamente este

año los cincuenta de la

Colección Popular, *La vida*

misma. Su origen y naturaleza, de

Francis Crick, editado por vez primera

en esta colección en 1985, ve la luz de nuevo

en septiembre de 2009, cuando se imprimió en

Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V.

(IEPSA), Calzada San Lorenzo, 244; 09830, México, D. F., con

tiraje de 2 000 ejemplares. La composición, en que se emplearon tipos

Fondo Book, la hizo, en el Departamento de Integración Digital del FCE,

Gabriela López Olmos; el diseño de interiores es de *Guillermo Huerta*, y el

cuidado editorial estuvo a cargo de *René Isaías Acuña Sánchez*.

El autor, que en 1962 compartió el Premio Nobel de Fisiología y Medicina con James Watson y Maurice Wilkins por su descubrimiento de la estructura molecular del ADN, emprende en esta exploración un examen inquietante de las cuestiones fundamentales de la existencia humana, así como de los orígenes de la vida en la Tierra y de la condición cósmica del hombre. ¿Tiene la vida existente en este planeta orígenes extraterrestres, o se creó espontáneamente al darse aquí ciertas condiciones? ¿Las esporas y bacterias que han dado origen a la vida en la Tierra fueron enviadas en una nave no tripulada, cayeron como polvareda desde el espacio exterior o se fueron generando a lo largo de un proceso de millones de años? Estas hipótesis, formuladas en un principio por el célebre físico italiano Enrico Fermi, son discutidas en este libro de Francis Crick que conjuga la física, la astronomía, la bioquímica y la estadística con el pensamiento especulativo en una asombrosa demostración de que lo que él llama "panspermia dirigida" es un fenómeno plausible, aceptable en la discusión del origen de la vida y que, pese a que queda abierta la discusión, el enigma de la vida en otros planetas de la galaxia se halla inextricablemente ligado con el de su origen en el nuestro.

