

COMPLEXITY AND THE ARROW OF TIME.

Dirigido por Charles H. Lineweaver, Paul C. W. Davies y Michael Ruse. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Conceptos interdisciplinares

En busca de la unidad de las ciencias de la naturaleza

Existe una idea muy extendida de que el universo en general, y la vida en particular, se van haciendo cada vez más complejos con el tiempo. Para admitir que el mundo físico es extraordinariamente complejo basta con mirar a nuestro alrededor. De las moléculas a los cúmulos galácticos, se observa una superposición de capas de estructuras y de procesos complejos. El éxito de la empresa científica a lo largo de los últimos 300 años parte en buena medida del supuesto de que, en el universo, más allá de la complejidad que reina en la superficie, existe una elegante simplicidad matemática. Desde hace unos años, favorecido por la disponibilidad de una computación rápida y poderosa, la ciencia ha buscado principios generales que gobiernen la complejidad. Se han abordado diferentes formas de complejidad, desde el apilamiento caótico de rocas hasta la organización exquisita de un ser vivo.

El progreso espectacular registrado en física de partículas o atómica se debe a que se deja de lado la complejidad de los materiales para centrarse en sus últimos componentes, bastante más sencillos. Los adelantos en cosmología dejan en buena medida de lado las complicaciones de la estructura galáctica y abordan el universo desde un enfoque simplificado. Las técnicas aplicadas a la física de partículas y a la cosmología no sirven para descubrir la naturaleza y el origen de la complejidad biológica, que parece emerger sin cesar. La evolución darwinista explica cómo

apareció la complejidad biológica, pero no aporta ningún principio general de por qué surgió. La supervivencia del mejor adaptado no es necesariamente la supervivencia del más complejo. Los físicos se esfuerzan por alcanzar una definición unificada de complejidad, mientras que los biólogos y científicos de la complejidad describen su naturaleza.

Pero ¿qué es la complejidad? ¿Por qué aumenta? A este concepto interdisciplinar se han asociado otros: entropía, orden, información, computación, emergencia o energía libre. Pero no es fácil extender nociones que tienen un significado propio en una disciplina a otra. La energía libre posee un sentido propio en física y química, de difícil encaje en biología; dígase lo propio de la entropía, la información y la computación. Sobre los conceptos orden y emergencia reina una enorme confusión por su vaguedad. Incluso conceptos que creemos unívocos y asentados carecen de límites precisos. Tal el concepto de gen.

Decenios de análisis han desembocado en la creencia común de que el gen constituye una entidad perfectamente definida, que se expresa en una función nítida. En medios científicos, médicos sobre todo, se supone que se trata de una secuencia específica de información genética que, cuando se convierte en ARN mensajero, codifica una proteína. Solo habría que vincular enfermedades con sus genes subyacentes. Entre los genetistas, sin embargo, la noción de gen se ha torna-

do hartamente borrosa. Allí donde antaño se veían genes acotados e individualizados, que producían transcritos de ARN, perciben ahora una masa caótica de ARN. Se pone en cuestión la vieja esperanza de la reducción de problemas biológicos complejos a una interpretación mecanicista del ADN. Ni siquiera se ponen de acuerdo los expertos en centrar en los genes la atención principal con sacrificio de otras partes del genoma, las proteínas o la interacción mutua en distintos tejidos.

Los cosmólogos sostienen que un segundo después de la gran explosión (*big bang*), hace 13.800 millones de años, el universo era una sopa uniforme de protones, neutrones, electrones y neutrinos, partículas subatómicas bañadas en una radiación uniforme. De la misma surgieron, andando el tiempo, múltiples niveles de complejidad que jalónaron la evolución del universo. A medida que el universo se enfriaba y expandía, la materia no solo se agregaba en estructuras, sino que empezó un proceso de diferenciación progresiva que continúa hasta hoy. El primer estadio fue la formación de helio (He) durante los tres primeros minutos, de modo que la composición química del material cosmológico constaba de hidrógeno (H) y He. Con la formación de las galaxias, unos 400 millones de años más tarde, nacieron las primeras estrellas y se añadieron elementos más pesados que el H y el He; y se diseminaron en las regiones interestelares por explosiones de supernova. Se liberó así el potencial para una variedad casi ilimitada de formas materiales sólidas, que iban de granos finísimos a los planetas.

Con la aparición de los planetas con superficies sólidas, el camino quedaba expedito para el enriquecimiento ulterior de formas materiales a través de cristalización y formación de sustancias amorfas. Las posibilidades fueron astronómicas. La historia de la materia es la historia de una complejidad creciente. Quedémonos en el humilde copo de nieve para comprobar que incluso una población de cristales de hielo puede combinarse en múltiples patrones de filigranas hexagonales, pues quizá no haya habido dos copos de nieve iguales en la historia de la Tierra. Una historia similar cabe aplicar a casi todas las estructuras sólidas; no hay dos rocas de idéntica composición interna o forma externa. La distribución de los objetos no conoce límites. Sin embargo, el futuro del universo será de simplicidad incesante como resultado de la expansión acelerada.

Otro tanto puede aplicarse a los fluidos: no hay dos nubes iguales, ni dos océanos con idéntico patrón de flujo, ni hay dos pautas de convección planetarias iguales (ni, por tanto, dos pautas de campos magnéticos), ni dos patrones de viento estelar, ni dos lluvias de rayos cósmicos, ni... El principio de esa explosión de diversidad puede buscarse en la ruptura de la simetría.

Una de las predicciones principales de todos los tiempos fue realizada en 1852 por el físico William Thomson (lord Kelvin). A partir de las leyes de la termodinámica y la naturaleza de la entropía, Thomson llegó a la conclusión de que el universo se estaba muriendo. La segunda ley de la termodinámica, que había sido formulada años antes por Clausius, Maxwell, Boltzmann y otros, establece que, en un sistema físico aislado, la entropía total (la medida del desorden) no puede disminuir nunca. Todos los procesos físicos, mientras pueden producir una caída de entropía en una región local, entrañan siempre una subida de entropía en cualquier otro lugar que compense lo anterior, de suerte que el resultado neto sea un aumento de la entropía total. Aplicado al universo en su totalidad, la segunda ley predice un crecimiento inexorable de la entropía global con el tiempo y un crecimiento concomitante del desorden. El aumento de entropía debe ahora definirse en referencia a un volumen en expansión del espacio. Una visión simple de la segunda ley de la termodinámica es que el universo comenzó en un estado bajo de entropía, entropía que ha ido en aumento desde entonces y seguirá creciendo en el futuro.

La creciente complejidad del universo se realiza a costa de un aumento de la entropía del campo gravitatorio: mientras la materia y la radiación disfrutan de una energía libre sostenida en virtud del campo para promover procesos complicados, el propio campo gravitatorio paga el precio en su ser desordenado. De modo que la entropía total del universo aumenta incluso cuando crece la riqueza, complejidad y diversidad de sus contenidos. Un campo gravitatorio de baja entropía presenta una forma simple, mientras que un campo de entropía elevada es complejo.

La complejidad no puede aumentar en el tiempo sin una fuente de energía libre para generarla o transferirla. Ello solo es posible si el universo no se encuentra en un estado de equilibrio termodinámico

(de muerte térmica). Ejemplo bien conocido de la emergencia de la complejidad y del concomitante incremento de la entropía (o caída de energía libre) que hay que pagar por ello es la estructura organizada de un huracán, que solo es posible por la existencia (y baja entropía) de gradientes de presión, temperatura y humedad. También ofrece otro ejemplo el origen de la vida instado por la explotación de alguna forma de potencial químico redox. La entropía constituye el grado de desorden de un sistema; ello implica que es el orden, y no la complejidad, lo que desempeña un papel inverso. No hay, pues, incompatibilidad entre avanzar en complejidad y avanzar en entropía.

Puesto que la complejidad física requiere la explotación de gradientes de energía libre, el desarrollo de cualquier tipo de complejidad está vinculado a la disminución de energía libre y al incremento de entropía, en conformidad con la segunda ley de la termodinámica. Ahora bien, que el desarrollo de la complejidad sea coherente con la segunda ley no significa que sea explicado por ella. Numerosos autores han reconocido que la entropía y la segunda ley guardan un nexo fundamental con la complejidad. Pero no se trata de una simple relación inversa.

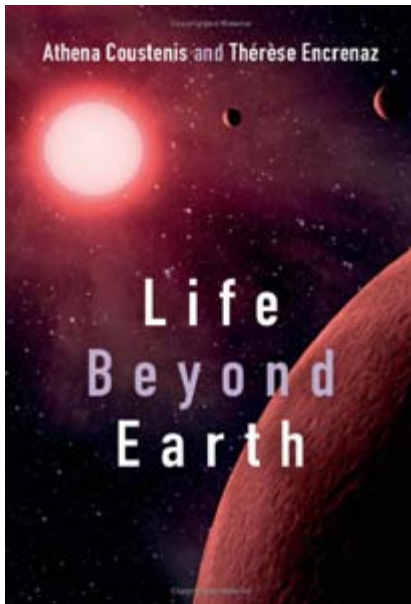
Con la formación de planetas, se abre la puerta a la formación de la vida y el desarrollo de la complejidad biológica. Parece incuestionable que la biosfera es hoy mucho más compleja que cuando la vida apareció sobre la Tierra. (Nadie sabe cuándo ocurrió, pero existe un acuerdo general en fijar esa época hace algo más de 3500 millones de años.) No podemos separar la complejidad de los organismos de la complejidad de su entorno. Un individuo humano es más complejo que una bacteria y una pluviselva más compleja que una colonia de bacterias. Darwin adoptó la metáfora del árbol para describir la evolución, con sus ramas y puntos de separación. Un árbol evolutivo es manifiestamente asimétrico con el tiempo: resulta completamente distinto si lo miramos de arriba abajo. Las mutaciones pueden causar que una especie se divida en dos por divergencia genómica, pero no encontraremos nunca dos especies que se fundan en una (salvo en el exclusivo caso de la endosimbiosis), por la sencilla razón de que es infinitésima la probabilidad de que diferentes secuencias genómicas que representan dos especies acometan las mutaciones requeridas para convertirse en una idéntica.

No existe una ley absoluta sobre la complejidad biológica, aunque se han documentado dos tendencias en la escala de la historia de la vida: el tamaño corporal y la jerarquía (célula procariota, célula eucariota, individuo multicelular, colonia). Si el Sol explotara mañana y destruyera toda la vida, habría que partir de cero para la emergencia de esta. Y por lo que se refiere a la biosfera en su globalidad, la evolución de la complejidad no es vía de dirección única.

La complejidad biológica puede hallarse en una especialización incrementada de partes corporales tales como la duplicación y subsiguiente diferenciación de extremidades animales, en las relaciones entre especies y en las redes de ecosistemas. Aunque el grado de especialización parece un criterio razonable de complejidad biológica, existen numerosos ejemplos en la historia de la vida sobre la Tierra en los que la especialización ha conducido a la extinción, mientras que la simplificación ha conducido a un éxito adaptativo y a la supervivencia. Con otras palabras, la macroevolución exhibe tendencias en una doble dirección: hacia la complejidad y hacia la simplicidad.

Cabe la posibilidad de que la vida haya encontrado y refinado las principales soluciones operativas de los problemas de supervivencia y reproducción, de que la diversidad de la vida tenga saturado el espacio de complejidad y que la complejidad se esté acercando a sus límites. Salvo la complejidad neural, que podría no haber alcanzado su apoteosis en los humanos. Aunque el cerebro de los vertebrados conoció varios incrementos de tamaño, la encefalización rampante se inició en los últimos 20 millones de años. Los datos actuales dan 18 millones de años para el cerebro del delfín, 7 millones de años para los homínidos y quizá la misma cifra para los cuervos de Nueva Caledonia. El cerebro humano constituye la entidad más compleja del universo. Cuando la información suministrada por el entorno cambia con una celeridad que impide ser incorporada en los genes (es decir, cambios en el medio a una escala temporal inferior a una generación), puede incorporarse en las capacidades de información biológica del cerebro. Igual que la complejidad biológica, la complejidad cultural dependería, en última instancia, de la complejidad física.

—Luis Alonso



LIFE BEYOND EARTH. THE SEARCH FOR HABITABLE WORLDS IN THE UNIVERSE

Por Athena Coustenis y Thérèse Encrenaz.
Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Astrobiología

Vida extraterrestre

Entre las cuestiones científicas más apasionantes de todos los tiempos sobresale la de llegar un día a conocer si la vida que palpita en la Tierra es un regalo excepcional del planeta o constituye un fenómeno común en el cosmos. La vida en el espacio, se trate de organismos extraños en mundos lejanos o de una expansión de nuestra propia especie en el sistema solar, despierta por igual la inquietud intelectual y la imaginación. La humanidad podría hallarse en puertas de grandes descubrimientos. Hay en marcha misiones de notable refinamiento técnico, como *Cassini*, que ha venido explorando el sistema saturniano y Titán desde 2004. Otras se hallan en preparación, como la *Sample Return* a Marte o la *Icy Moons Explorer* a Júpiter. Sin olvidar otros programas no menos ambiciosos, como el de instalar telescopios gigantes que inspeccionen planetas.

La Vía Láctea, que se originó hace unos 12.000 millones de años, sigue activa en continuo alumbramiento de estrellas. La Tierra debe su composición química a miles de generaciones de estrellas que vivieron y expiraron mucho antes del nacimiento del sistema solar, ocurrido hace unos 4600 millones de años. En nuestro planeta, dotado de un núcleo magnético de hierro, un océano de agua y una atmósfera de nitrógeno, carbono y oxígeno, apareció y medró la vida. Pero ¿solo aquí?

El campo emergente de la astrobiología dio su primer paso firme en 1961, en Green Bank, West Virginia, donde

radioastrónomos y biólogos reunidos en un congreso abordaron las perspectivas de vida inteligente fuera de la Tierra. En la preparación del encuentro, Frank Drake, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, desarrolló una ecuación sobre las probabilidades de planetas con capacidad para la telecomunicación en la Vía Láctea. Sostienen los astrobiólogos que la presencia de vida en el universo requiere una fuente de energía, un tipo de átomo que permita la existencia de estructuras complejas, un solvente donde las moléculas puedan flotar e interactuar y tiempo suficiente para que la vida emerge y evolucione. En la Tierra, el tipo de átomo exigido se cumple con el carbono. Los átomos de carbono pueden enlazarse hasta con otros cuatro átomos, lo que lo convierte en el elemento crucial de la vida tal como la conocemos. Con el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno, el carbono pertenece al grupo más abundante de elementos que encontramos en todas las formas de vida. En el universo, a esos cuatro hay que sumar dos gases inertes: el helio y el neón.

Lo mismo que el carbono, los átomos de silicio pueden enlazarse con otros cuatro átomos, pero la naturaleza de tales enlaces no aporta base estructural para moléculas complejas. Los enlaces establecidos por el carbono con otros átomos (carbono-oxígeno, carbono-hidrógeno o carbono-carbono, por ejemplo) se rompen con relativa facilidad; merced a ello, las moléculas basadas en el carbono pueden formar nuevos tipos tras colisionar

e interactuar, componente esencial de cualquier actividad metabólica. Por el contrario, los enlaces de silicio se traban vigorosamente con otros átomos (de manera singular con los de oxígeno, cuya unión persiste millones de años), lo que les incapacita para formar nuevos tipos moleculares.

Hay más. Para identificar la presencia de material biogénico en una fuente extraterrestre podemos servirnos de una medida basada en los isótopos de carbono. En la Tierra, la relación $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ en los minerales es de 90. Sin embargo, en los organismos esa razón se altera debido a la fotosíntesis. Las plantas utilizan preferentemente el isótopo más ligero (^{13}C) cuando convierten la luz solar y el dióxido de carbono en materia orgánica. Existen dos ciclos de fotosíntesis en la Tierra: el de fotodisociación C3, que se emplea en entornos templados, es el más común y conduce a un cambio en la razón $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ de un 2,6 por ciento; el de fotodisociación C4, privilegiado en medios cálidos y secos, produce un cambio mucho menor. En consecuencia, la razón de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ es de 92,4.

La ciencia acepta ya la hipótesis de que los planetas que giraron en órbita alrededor de las primeras estrellas pudieron albergar vida. Se ha calculado incluso que el agua líquida —prerrequisito para la vida— pudo haberse formado en planetas rocosos a los 15 millones de años de la gran explosión inicial. Según Abraham Loeb, astrofísico de la Universidad Harvard, en el universo primitivo, la energía requerida para mantener líquida el agua podría haber procedido del fondo cósmico de radiación de microondas. Hoy, la temperatura de esa radiación fósil es de 2,7 kelvin, pero cuando el universo tenía 15 millones de años sería de 300 kelvin. Podría haber habido entonces planetas rocosos en zonas del universo donde la materia fuera excepcionalmente densa. Allí pudo haberse dado una época habitable durante dos o tres millones de años.

Las respuestas al trabajo de Loeb varían. Christopher Jarzynski, de la Universidad de Maryland, no está convencido de que la vida pudiera existir en un universo uniformemente caliente. La vida sobre la Tierra depende termodinámicamente no solo de la fuente de calor del Sol, sino también del fondo cósmico de radiación de microondas frío, que aporta un sumidero de calor. Alexander Vilenkin, de la Universidad Tufts, sostiene que tan pocos

millones de años es muy escaso tiempo para producir vida inteligente. Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, piensa que la vida podría ser más adaptable de lo que pensamos. En su opinión, todo es habitable si sabemos desenvolvernos.

La condición universal común a todas las teorías sobre el origen de la vida es el agua líquida. Todas las formas de vida necesitan un solvente donde las moléculas puedan flotar e interactuar. Las notables propiedades químicas del agua como solvente y su abanico de rasgos insólitos resultan del hecho de que sus moléculas forman enlaces débiles, enlaces de hidrógeno. El agua consta de dos de las moléculas más abundantes del cosmos; aparece en modesta cuantía en cometas, meteoroides y la mayoría de los planetas solares con sus lunas. Se ha identificado agua en los lugares más dispares: en forma de vapor en las nebulosas de emisión, de hielo en los discos protoplanetarios y líquida por debajo de la corteza helada de varias lunas de Júpiter (Europa, Ganímedes y Calixto). En 2005, la nave espacial *Cassini* tomó imágenes de géiseres de agua líquida en erupción en la superficie de Encélado, luna de Saturno. A partir del único caso conocido, el de la Tierra, habrá que concluir que la vida requiere un entorno húmedo, rico en carbono, privado para el oxígeno y el nitrógeno, con trazas de otros elementos relativamente pesados (fósforo, azufre, sodio, magnesio, cloro, potasio, calcio y hierro), junto con fuentes disponibles de energía libre.

A longitudes de radioonda se han descubierto alcoholes (metanol y etanol) e incluso un azúcar (glicoaldehído). Los aminoácidos ricos en nitrógeno no brillan tan fácilmente en los enclaves nebulares, pero se infieren a partir de su presencia en condritas carbonáceas (meteoritos rocosos ricos en carbono), que se han encontrado en la Tierra. El fósforo, sorprendentemente raro en la Tierra, puede hallarse en grandes concentraciones en los meteoritos de hierro. Algunos sostienen que este componente clave para la vida nos llegó a través de bombardeos meteoríticos. El azufre procede del interior de la Tierra como parte de la constante actividad del manto superior. Además de la Tierra, el azufre constituye del 2 al 7 por ciento de los meteoritos rocosos y predomina en la química volcánica de Io, luna de Júpiter. Cabe la posibilidad de que otros procesos bioquímicos pre-

dominen en otras partes. Por ejemplo, alcohol, amonio y metano pueden permanecer líquidos a temperaturas mucho más bajas que el agua. Y, en principio, podrían servir de solventes, en los que elementos simples y moléculas pudieran reaccionar para formar nuevos tipos de moléculas complejas.

En cualquier caso, no hay pruebas sólidas de la existencia de vida fuera de los confines terrestres. La vida emergió en la Tierra hace unos 3800 millones de años, tras el cese del Bombardeo Pesado Tardío (cuyos cráteres de impacto y cuencas pueden observarse todavía en la Luna). Pero, si bien las circunstancias físicas de la vida sobre la Tierra están bastante bien definidas, los procesos químicos desarrollados en tierra firme, océano y atmósfera se hallan muy lejos de conocerse.

Tal como la conocemos, la vida reduce sus características determinantes a dos funciones esenciales: metabolismo y reproducción. (La movilidad resulta también un rasgo importante para la mayoría de las formas vivas.) El metabolismo implica la transferencia de materia y energía entre el ser vivo y el entorno. Entraña un conjunto de reacciones químicas que modifican las moléculas. La entidad metabolizadora por excelencia es la célula, dotada de una membrana permeable que encierra un amplio espectro de reactivos en su interior. En la Tierra, la reproducción corre a cargo de los ácidos nucleicos. La reproducción mediada por ADN constituye el motor del desarrollo y la evolución. El desarrollo se apoya en la replicación de la célula, mientras que la evolución implica un proceso de mutación y selección. Se habla de una protovida de ARN, molécula que puede cumplir la doble función de reproducción y metabolismo. Además del ADN y el ARN se han postulado otros ácidos nucleicos como moléculas alternativas portadoras de información.

Los meteoritos caídos en la Tierra aportan una fuente asequible para el estudio de la materia orgánica procedente del espacio. El meteorito Murchison que cayó en Australia en 1969 contiene granos de carburo de silicio que, a juzgar por sus relaciones isotópicas, fueron producidos por una supernova. El meteorito de Murchison pertenece a las condritas carbonáceas, meteoritos que se suponen formados a partir de fragmentos procedentes del cinturón de asteroides entre Júpiter y Marte. Se han identificado más de quinientos compuestos orgánicos en

ese meteorito: hidrocarburos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aminas, amidas, adenina, guanina y uracilo. De los setenta y cinco aminoácidos identificados en el meteorito, ocho son idénticos a los aminoácidos que encontramos en las proteínas. En cambio, aminoácidos ubicuos, como la histidina, no han aparecido entre los productos de la química cósmica.

Entre las miradas de rocas que continuamente bombardean la Tierra, muchas pudieron proceder de Marte. El origen marciano de esas rocas, incluida ALH84001, vino determinado por el análisis de la concentración relativa de determinados elementos químicos y sus isótopos, atrapados en el interior de las mismas. Ese meteorito se descubrió en 1984 en la región antártica de Allan Hills. El meteorito Mill, que explotó en 2012 sobre California, presenta moléculas orgánicas no encontradas en ningún otro meteorito.

Por su parte, el robot *Curiosity*, que tomó suelo en agosto de 2012, obtuvo indicios de que pudo haber habido vida en Marte. *Curiosity* evidenció que estaban allí todos los ingredientes esenciales para un entorno habitable: humedad prolongada, bloques esenciales de construcción de la vida y fuente de energía. En una primera cata, el robot tomó una muestra con compuestos orgánicos. No solo no había indicios de hostilidad contra la presencia de vida, sino que se identificaron ingredientes de una receta de la vida: carbono, hidrógeno, oxígeno, fósforo, nitrógeno y azufre. Y no menos importante, otros elementos combinados en compuestos que presentan diverso grado de oxidación. Los organismos pueden servirse de compuestos menos organizados para extraer energía en vez de recurrir a la luz solar para la fotosíntesis o consumir materia orgánica.

Si la vida bacteriana surgió tan prestamente en la Tierra, y si Marte llegó a alcanzar también condiciones favorables para la vida, cabría que se hubiera producido alguna forma de evolución en el manto bacteriano de Marte. En su nivel bacteriano, la vida es un fenómeno universal y puede esperarse donde y cuando se den las condiciones favorables. Con las misiones en curso a Marte y a Titán, y muchas más misiones proyectadas, la humanidad se encuentra en las puertas de un progreso excitante y ante posibles descubrimientos importantes en nuestra búsqueda de vida en el espacio.

—Luis Alonso