

Daniel San Martín Sepúlveda

CLARITY

Un modelo unificador de las ciencias
...y un relato del todo

 Planeta

Capítulo 1

El orden del universo

La historia del átomo

*La astronomía nos conduce a un suceso único,
a un universo creado de la nada.*

ARNO ALLAN PENZIAS

Cuando Charles Darwin desarrolló la teoría de la evolución por selección natural, cambió el mundo para siempre. Su propuesta era tan poderosa que el filósofo de las ciencias Daniel Dennett llegó a denominarla como la mejor idea jamás pensada. Para Dennett, la evolución por selección natural “unifica el ámbito de la vida, y sus significaciones y propósitos, con el ámbito del espacio y del tiempo, la causa y el efecto, el mecanismo y la ley física” (Dennett, 1995, p. 21). A diferencia de otras ideas revolucionarias, la propuesta por Darwin resultó tan potente y a la vez tan comprensible que de inmediato logró un éxito rotundo. Una muestra de ello es que la primera edición de *El origen de las especies*, donde esta teoría se explica a detalle, se agotó en un solo día¹.

Fue tal el impacto intelectual que la teoría de Darwin causó en su época, que investigadores de todas las ramas intentaron replicar algunos de sus conceptos en sus propias disciplinas. Uno de los casos más interesantes fue el de Ludwig Boltzmann, quien aplicó la lógica darwinista a los sistemas físicos. Las semejanzas entre las ideas desarrolladas por Boltzmann y las de Darwin son muy profundas. En primer lugar, el método desarrollado por Boltzmann incorporó por primera vez el tiempo como parte fundamental de una explicación física. Hasta entonces, la ciencia, y en particular la física, habían negado el efecto del tiempo en sus estudios (Bergson, 1911). Un ejemplo de ello son las leyes de Newton, que funcionan de la misma forma hacia adelante o hacia atrás; el tiempo no las afecta. Sin embargo, en la teoría de la evolución por selección natural, Darwin hizo del tiempo un protagonista intrínseco de sus explicaciones. Aplicando este mismo principio, Boltzmann pudo llegar a una importante conclusión: si bien los procesos atómicos a nivel individual son reversibles, a nivel macroscópico suelen ser irreversibles; de ahí que el tiempo solo pueda correr en una dirección.

La segunda similitud entre las ideas de Darwin y las de Boltzmann tiene que ver con dónde poner la atención: ambos lo hacen sobre el conjunto y no sobre cada elemento. Para explicar cómo actuaba la selección natural, Darwin estudió poblaciones y no individuos. De la misma forma, Boltzmann comprendió que era imposible entender en detalle los comportamientos individuales de las partículas. Sin embargo, si estas se miraban con perspectiva, era posible encontrar regularidades en los fenómenos. Así, Boltzmann se convirtió en el primer científico en aplicar análisis estadísticos a los sistemas físicos.

1. Charles Darwin comparte el mérito de idear el mecanismo de selección natural con el naturalista Alfred Russel Wallace, quien había llegado de forma independiente a la misma idea. De hecho, Darwin presentó por primera vez su célebre teoría en conjunto con Wallace en 1858, en la Sociedad Linneana de Londres. Sin embargo, la comunidad científica de la época atribuyó el grueso del mérito a Darwin, primero porque era un naturalista mucho más conocido que Wallace, y segundo porque *El origen de las especies* presentaba observaciones que apoyaban de forma contundente la nueva teoría.

A pesar de las estrechas semejanzas entre sus ideas, la suerte de Boltzmann fue muy diferente a la de Darwin. El enfoque estadístico aplicado a la física fue visto como absurdo por los científicos de su época. La idea de que las leyes físicas más fundamentales dependían de probabilidades les pareció directamente idiota. Y, sin pruebas experimentales que dieran validez a su trabajo, Boltzmann no encontró cómo defender su propuesta. Los ataques a su figura se hicieron cada vez más ácidos. Parecía tener a toda la comunidad en contra. Y él, con una personalidad muy frágil y emotiva, no podía evitar que esto lo afectara profundamente. La salud mental de Boltzmann fue mermando con los años al punto de acabar con su vida en 1906.

Es muy lamentable que Boltzmann no haya aguantado un poco más. Apenas un par de años después de su suicidio, comenzaron a surgir pruebas que respaldaban sus ideas. Con el tiempo, los experimentos le fueron dando la razón y todos sus postulados fueron aceptados por la comunidad científica.

La historia de Boltzmann tiene una belleza poética. Aunque en vida nunca pudo convencer a sus pares, el legado póstumo de sus ideas es comparable al de Darwin. En la actualidad, la noción de irreversibilidad de los sistemas físicos, introducida por Boltzmann, es el concepto central de la termodinámica y una descripción de cómo funciona el universo en su esencia. En particular, la segunda ley de la termodinámica, cuya formulación moderna está basada en las ideas de Boltzmann, se considera como la idea científica más aceptada de todas las que existen. De hecho, esta ley tiene más aceptación en la comunidad científica que la propia teoría de Darwin. Seth Lloyd, un destacado profesor de Física del MIT, ha ilustrado ingeniosamente el grado de aceptación de esta ley: “Nada es seguro en la vida, salvo la muerte, los impuestos y la segunda ley de la termodinámica” (Lloyd, 2000, p. 971).

Este libro utiliza las ideas de Darwin y de Boltzmann para explicar el proceso de complejización que ha ocurrido desde el inicio de los tiempos hasta la actualidad. La aparición de la vida, luego de los animales, después de los seres humanos y, finalmente, de las sociedades puede entenderse como efecto de ese larguísimo proceso.

Sin embargo, para comprenderlo, debemos empezar por el principio. Y el principio de nuestra historia es el principio del universo, hace aproximadamente trece mil ochocientos millones de años. Abordaremos el misterio de la aparición de los átomos y, con ello, de las estrellas, de las galaxias y de los planetas. La pregunta que guiará este primer capítulo es la siguiente: *¿cómo se formaron los objetos que existen en el universo?*

El gran protagonista de este capítulo será el átomo. Observaremos atentamente su proceso de complejización. Para ello, utilizaremos el modelo Clarity de cuatro etapas: aparición, selección, cooperación y especialización.



ETAPA I LA APARICIÓN DEL ÁTOMO

Al principio no existía nada. Ningún objeto, nada. Al principio no existía nada salvo un punto, un punto solo. Y en ese punto solo, infinitamente denso e indescriptiblemente caliente, se contenía todo el universo.

En el inicio de los tiempos, el espacio empezó a expandirse, y lo hizo rápido, increíblemente rápido. Hoy sabemos que en esos primerísimos instantes el espacio se duplicaba cada 10^{-35} segundos. Para entender esto claramente, pongámoslo en perspectiva: esa fracción de tiempo es a un segundo lo mismo que un segundo es a trescientos veinte trillones de años. Eso es, en efecto, increíblemente rápido. Debido a su velocidad, esta expansión ha sido descrita para fines ilustrativos como una gran explosión o *big bang*. Sin embargo, esta descripción puede llevar a confusiones. En realidad, nunca hubo ninguna explosión. No hubo ningún estallido, ningún objeto fulminado. Lo que ocurrió fue una expansión rapidísima del espacio y, con ello, la separación de los objetos que había en él.

He aquí una pregunta frecuente: ¿qué produjo el *big bang*? Por definición, no hubo nada que ocurriera antes de ese evento. De hecho, el tiempo mismo se creó gracias a él. Por ello, parece imposible encontrarle una *causa*.

Esto ha llevado a muchos pensadores a proponer que el *big bang* debió ser provocado por una voluntad sobrenatural. Si nada en nuestro universo pudo haberlo producido, se ha visto como probable, y hasta segura, la acción de un dios. Sin embargo, los científicos más renombrados del mundo disienten radicalmente de este razonamiento. Por ejemplo, Stephen Hawking, célebre cosmólogo de Cambridge, planteó que el universo pudo crearse de la nada, y que la evidencia señala que en efecto así lo hizo (Hawking, 2010).













La idea de un universo que se crea a sí mismo puede ser incómoda para la intuición humana. No obstante, si pensamos en el asunto con profundidad, invocar a un dios creador es aún más problemático. Si el universo hubiera necesitado un diseñador, bajo el mismo argumento, habría hecho falta un diseñador del diseñador. Y antes un diseñador del diseñador del diseñador. Y así *ad infinitum*. Las religiones suelen responder a esta paradoja apelando a una misteriosa mente divina autocreada. Pero si esta les parece una respuesta

plausible, ¿no sería más simple saltarnos ese paso y concebir directamente un universo autocreado?

La formación de los primeros objetos del universo

Aunque no tenemos idea de por qué ocurrió el *big bang*, sí sabemos lo que ocurrió después de él. Al principio, el universo en expansión no era más que un gran enjambre de partículas fundamentales moviéndose a velocidades increíblemente rápidas.

Según nuestro conocimiento científico actual, existen doce partículas que constituyen la materia, llamadas fermiones. A su vez, los fermiones se dividen en dos clases: los quarks y los leptones. Cada uno de estos dos tipos, presenta tres “generaciones” o, sencillamente, tres versiones de sí mismos. La siguiente tabla muestra los doce fermiones:

	I	II	III	
Quarks				
	Arriba $M = 2,4 \text{ MeV}$	Encanto $M = 1,27 \text{ GeV}$	Cima $M = 171,2 \text{ GeV}$	
				
	Abajo $M = 4,8 \text{ MeV}$	Extraño $M = 104 \text{ MeV}$	Fondo $M = 4,2 \text{ GeV}$	
	Leptones			
		Electrón $M = 0,511 \text{ MeV}$	Muon $M = 105,7 \text{ MeV}$	Tau $M = 1,777 \text{ GeV}$
				
Neutrino electrónico $M < 2,2 \text{ eV}$		Neutrino Muónico $M < 0,17 \text{ MeV}$	Neutrino Tauónico $M < 15,5 \text{ MeV}$	

La masa de cada una de estas partículas aparece expresada en letras cursivas. La masa de los quarks es mucho mayor que la de los electrones; a su vez, los neutrinos son muchísimo más leves, con un millón de veces menos masa que un electrón. Además, como muestra la tabla, las partículas de la primera generación son las más livianas; les siguen las de la segunda generación; y las de tercera generación son las más pesadas para cada fermión.

Estas doce partículas poseen masa, pero también existen partículas sin masa, como fotones o gluones. Estas no les dan sustancia a los objetos físicos, pero aun así son importantes explicando el modo en que funciona nuestro universo, y son relevantes en la formación de los objetos. Sin embargo, el detalle de esto va más allá del alcance de este libro.

De los doce fermiones, ocho son partículas inestables y aparecen para desaparecer casi al instante. Solo las cuatro partículas de la primera generación existen el tiempo suficiente como para dar forma a los objetos. Una de esas partículas son los neutrinos, que vuelan libres por el universo sin formar ningún objeto, casi sin interactuar con el resto de la materia. De ahí que no sean muy relevantes para nuestra historia. De hecho, mientras el lector repasa esta única frase, mil billones de neutrinos han atravesado ya su cuerpo y la mayor parte de sus átomos ni siquiera lo ha notado.

Lo que es relevante para nosotros, es que solo tres partículas componen todos los objetos que conocemos en el universo, de estrellas a personas y de montañas a libros. Se trata de los *electrones*, los *quarks arriba* y los *quarks abajo*. Así, todo está hecho de estas tres piezas básicas²:



Quark
arriba



Quark
abajo



Electrón

Para entender el proceso de aparición de los átomos y la posterior formación de los objetos del universo, podemos utilizar una analogía, una imagen mental. Imaginemos un salón de baile de proporciones cósmicas en el cual de pronto aparece un gran número de bailarines. Todos son bailarines expertos, pero aparecieron en el salón sin haber recibido antes la más mínima instrucción. Por eso mismo, al principio, todo es confuso para ellos. Los bailarines

2. En rigor, esto no es del todo verdad. Existen objetos que no sabemos de que están hechos y que de hecho ni siquiera podemos observar. A tipo de materia se le conoce como *materia oscura*, y sabemos que existe solo por los efectos gravitacionales que esta tiene sobre la materia visible. Se ha calculado que al interior de las galaxias, este tipo de materia desconocida constituye entre un 80 % y un 90 % del total.

comienzan a deambular frenéticamente, se mueven de forma errática en diferentes direcciones, intentan encontrar compañeros de baile propicios, pero se chocan unos con otros en incesante tumulto.

Los primeros momentos del universo fueron algo parecido a esto. Durante un corto tiempo, no hubo más que una gran sopa de partículas fundamentales deambulando como vagabundos perdidos que chocan entre sí. En ese tumulto, ningún bailarín podía establecer ningún tipo de vínculo permanente con otro. El movimiento de las partículas era demasiado rápido para que estas pudieran interactuar de forma permanente entre sí. Afortunadamente, segundos después del *big bang*, la temperatura bajó lo suficiente e hizo posible el inicio del gran baile cósmico.

¿Por qué debía bajar la temperatura para que las partículas comenzaran a interactuar de formas más estables, de formas más interesantes? Para saberlo, debemos entender qué es la temperatura. En realidad, este concepto solo se entiende a escala macroscópica. A una escala microscópica, al nivel de cada partícula, la temperatura no existe, no tiene ningún sentido. El incremento de la temperatura de un material no es más que la aceleración y el distanciamiento de las moléculas o átomos que lo conforman. Ninguna molécula por sí misma puede estar más caliente o más fría: para estarlo, depende de su relación con las otras. Así, cuando decimos que la temperatura del universo bajó lo suficiente y permitió a las partículas interactuar de forma permanente, lo que decimos es que estas partículas empezaron a moverse más lento y así se hizo más sencillo que influyeran unas sobre otras, y generarán lazos permanentes entre sí.

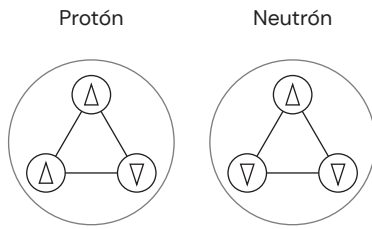
Los tres tipos de partículas que forman los objetos de nuestro universo solo pueden interactuar de cuatro maneras distintas³. En la analogía del baile, solo existen cuatro pasos. Los bailarines se relacionan únicamente a través de ellos. Los cuatro pasos son la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil, el electromagnetismo y la gravedad. Virtualmente, todo lo que ocurre en el universo, desde lo más insignificante hasta lo más gigantesco, es el resultado de esas cuatro interacciones. Y la aparición del átomo se explica también por ellas.

La primera interacción que vinculó las partículas fue la denominada interacción nuclear fuerte. Esta permitió que los quarks de ambos tipos (es decir, los quarks arriba y los quarks abajo) se atrajeran de forma sumamente poderosa. A diferencia de las otras interacciones fundamentales, la interacción nuclear fuerte tiene un alcance bastante corto. Su fuerza de atracción actúa a muy

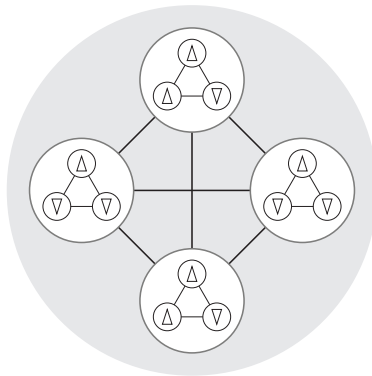
3. Existe cierta evidencia de un quinto tipo de interacción. Hoy sabemos que el universo se expande constantemente y, para nuestra sorpresa, este impulso no mengua, sino que se acelera y se acelera sin parar. Es como si algo lo impulsara a expandirse a una velocidad cada vez mayor y de una forma que no puede ser explicada por ninguna de las cuatro interacciones fundamentales. Como no conocemos qué tipo de energía impulsa esta expansión, la comunidad científica la ha llamado *energía oscura*.

breve distancia, una distancia que no es mayor a la del núcleo de un átomo. Con todo, a esa escala, esta es la fuerza más poderosa: es 10^{60} veces mayor que la fuerza electromagnética (es decir, un diez con sesenta ceros a la derecha).

Como producto de esta interacción, los quarks formaron hadrones. Los hadrones no son más que eso mismo: conjuntos de quarks. Dos tipos de hadrones fueron cruciales para la historia del universo. El primero es el *protón*, con dos quarks arriba y un quark abajo. El segundo es el *neutrón*, con dos quarks abajo y un quark arriba. Como se muestra en el siguiente esquema, los protones y los neutrones son simples combinaciones de quarks unidos entre sí por la interacción nuclear fuerte:



Luego de que se formaran los protones y los neutrones, llegó el siguiente momento en la formación de los objetos. Unos tres minutos después del inicio del universo, la temperatura bajó hasta un punto en que la interacción nuclear fuerte comenzó a acercar quarks de neutrones y protones distintos. El resultado fue la formación de estructuras un poco más complejas que los hadrones, compuestas en total por dos protones y dos neutrones. Es decir, estas estructuras contaban con doce quarks interactuando entre sí de manera permanente. Esto se puede observar en el esquema siguiente. Cuatro coreografías, cada una de tres bailarines, se unieron para formar una de doce bailarines:

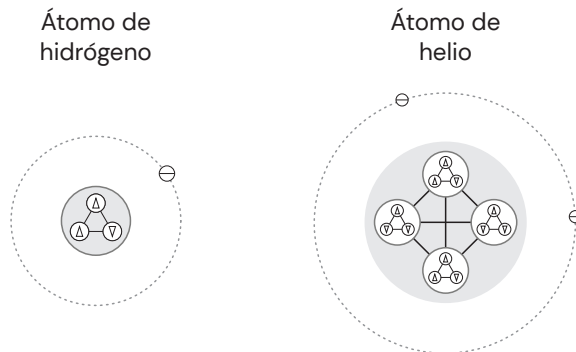


Pero esa no fue la única interacción que se puso en marcha. La segunda interacción, la interacción nuclear débil, es importante para entender una serie de fenómenos físicos. Ella supone un proceso de transformación de las partículas, que generalmente mutan a sus versiones más livianas. Sin embargo, esto no es relevante para la historia que estamos contando. Por esa razón, dejaremos reposar esta interacción.

En cambio, el electromagnetismo, que es el tercer paso de baile, sí resulta capital para los fines de nuestro relato. Este recién comenzó a operar muchísimo tiempo después, cuando el universo llegaba a la edad de treientos cincuenta mil años. Hasta entonces, las estructuras formadas por doce quarks eran lo más complejo que existía en el universo. Sin embargo, esto cambió con el electromagnetismo. Y todo se debió, una vez más, a la temperatura.

Cuando la temperatura cayó lo suficiente, algunos protones empezaron a “capturar” electrones. Para ello, se valieron de la interacción electromagnética. Esta sigue una lógica que es bastante conocida: cuando tienen la misma carga, las partículas se repelen y, cuando tienen carga opuesta, las partículas se atraen. Esto fue precisamente lo que sucedió entonces. Dado que los electrones tienen carga negativa y que los quarks arriba tienen carga positiva, los protones (que en su estructura contienen dos quarks arriba) tendieron naturalmente a capturar electrones.

El resultado de este hecho fue crucial para el universo, porque formaron dos objetos que hasta entonces no existían. El primero contenía un protón y un electrón, y el segundo, más complejo, dos protones, dos neutrones y dos electrones. Actualmente, a estos dos objetos los conocemos como átomos. El primero era un átomo de hidrógeno y el segundo, uno de helio. Podemos observar su composición en el siguiente esquema:



Esta representación en los esquemas es solo referencial. En realidad, los átomos no lucen así. A pesar de su tamaño absolutamente pequeño, los átomos

están hechos casi de puro vacío. En efecto, los quarks y los electrones interactúan a una distancia enorme, relativa al tamaño del átomo. Incluso si pensáramos en un núcleo “lleno”, la proporción de espacio vacío que habría dentro del átomo sería de 99,99999999999999 %. Como ilustración de esto, podemos decir que si comprimieramos todos los átomos de las personas para evitar espacios vacíos entre los núcleos y las órbitas de electrones, es tal la cantidad de vacío, que toda la humanidad cabría en un terrón de azúcar.

A pesar de las grandes distancias entre sus piezas constituyentes, los átomos son objetos minúsculos. Tienen un radio menor a la diezmillonésima parte de un milímetro. Si agrandásemos una cabeza humana hasta alcanzar el tamaño de la Tierra, un átomo sería del tamaño de una canica.

¿Qué es en realidad un átomo?

Ahora hagamos una pausa para reflexionar sobre el concepto mismo de átomo. ¿Qué es un átomo? En realidad, un átomo no es más que una determinada coreografía desplegada por electrones, quarks arriba y quarks abajo. No es una suma de partes: es un patrón de interacciones. Todas las partículas que constituyen un átomo existen desde antes de la formación de dicho átomo. Es decir, para que haya átomos, no basta con sumar partículas. Los átomos solo aparecen cuando surge el patrón específico de interacciones de quarks y electrones que propicia su existencia. Es ese patrón específico el que los hace posibles. Podemos decir, entonces, que los átomos solo surgen cuando quarks y electrones interpretan una coreografía determinada. Es esa coreografía la que permite su existencia, no la mera aglomeración de sus piezas constituyentes.

Al entender los átomos de este modo, cabe preguntarnos por qué solo se formaron dos tipos: los de hidrógeno y los de helio. Si bien es posible que también se formaran algunos escasos átomos de otros tipos, como por ejemplo los de litio —compuestos por dieciocho quarks y tres electrones—, por millones de años el universo estuvo repleto de solo dos tipos de átomos: helio e hidrógeno. (Matheuws et al., 2017) ¿Por qué? ¿Por qué los quarks y los electrones solo siguieron esos patrones? ¿Por qué no practicaron otras coreografías? ¿Acaso no existía una infinidad de patrones en que los quarks y los electrones podían interactuar? Y aún más importante, ¿cómo surgió el resto de los objetos de nuestro universo? ¿Cómo aparecieron las estrellas, las galaxias y los planetas? Para responder a estas preguntas, debemos pasar a la segunda etapa en la historia de este capítulo: la etapa de *selección*.



ETAPA II

LA SELECCIÓN DEL MÁS ESTABLE

En realidad, los quarks y los electrones pueden formar coreografías muy distintas. No se limitan solo a formar átomos de helio y átomos de hidrógeno. De hecho, el número de posibles interacciones entre quarks y electrones es casi infinito. El problema es que casi todos esos patrones son inestables; es decir, solo resisten brevísimos lapsos de tiempo. La gran diferencia entre los átomos de hidrógeno y helio y la mayoría de los otros patrones posibles de interacción, radica en eso. Los átomos de hidrógeno y de helio son estables. Persisten en el tiempo. Los demás patrones no. Así, podemos decir que hubo una especie de *selección* de los patrones más estables que podían formar las partículas. Por eso el universo se pobló de esos dos átomos. No es que ganara el más fuerte: es que ganó el más estable.

Este principio puede ser extendido a todos los objetos del universo. Estrellas, planetas y galaxias son eso finalmente: enormes grupos de quarks y electrones interactuando en determinados patrones que son estables. El destacado biólogo evolucionista Richard Dawkins precisó esta idea al decir que en nuestro universo opera una suerte de ley de “supervivencia del más estable” (Dawkins, 1976). En efecto, todo lo que percibimos como “existente” no es más que el resultado de un patrón de interacciones con suficiente estabilidad. Todo patrón de interacción entre quarks y electrones que no logre ser estable no formará ningún objeto. Fue en ese sentido que Jorge Wagensberg, el físico español, señaló que “hay muchas más maneras de no ser que de ser” (Wagensberg, 2002, p. 22)

Dada esta noción de objeto, cabe preguntarse: ¿cómo sabemos cuáles son los límites de un objeto? Es decir, si todo está hecho con las mismas partículas, ¿cómo sabemos dónde empieza y dónde termina un objeto? ¿Cómo determinamos qué partículas son parte del objeto y qué partículas son solo parte del entorno? En realidad, no existe una respuesta taxativa. Toda definición dependerá de las distinciones que establezca el observador. La única consideración objetiva que podemos realizar tiene que ver con la frecuencia de interacción: las partículas que constituyen un objeto interactúan estadísticamente con mucha mayor frecuencia entre ellas que con las partículas del entorno. Podemos pensar en un ejemplo sencillo. El asiento de un coche interactúa más con el

volante y con las ruedas del mismo coche —de hecho, tienden a desplazarse todos juntos por el espacio— que con el letrero de una autopista o con el cemento de una acera; de ahí que surja la definición de auto como objeto. Un objeto, entonces, sería un conjunto de partículas, que interactúan con cierta frecuencia, en un determinado patrón que permanece en el tiempo⁴.

De estrellas a galaxias: los objetos son el resultado de la estabilidad

Para entender el principio de selección, tomemos el caso de las estrellas. Estas comenzaron a formarse unos doscientos cincuenta millones de años después del nacimiento del universo, cuando la temperatura bajó lo suficiente como para que la gravedad comenzara a ejercer influencia entre partículas muy distantes (Hashimoto et al., 2018).

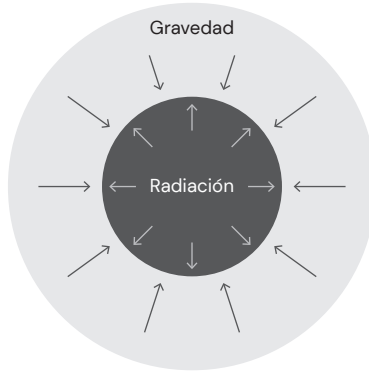
La gravedad es la interacción que más experimentamos en nuestra vida diaria. Sin embargo, es al mismo tiempo la interacción menos poderosa. En efecto, la gravedad es absurdamente débil si la comparamos con cualquiera de las otras tres interacciones. Su poder de atracción es alrededor de 10^{41} veces más débil que el de la interacción electromagnética (que, a su vez, es mucho más débil que el de la interacción nuclear fuerte). A pesar de esta debilidad, la gravedad tiene una ventaja: puede atraer quarks y electrones a larguísima distancia.

Fue esta cuarta interacción la que ayudó a formar las estrellas. Muy lentamente, comenzó a atraer entre sí a átomos que estaban en zonas muy alejadas del espacio. Así, con el tiempo, fue formando enormes nubes de materia que, por efecto de la gravedad, eran cada vez más densas. Este proceso siguió durante algunos miles de años. Una vez que estas nubes tuvieron la densidad suficiente, pudieron formarse objetos relativamente densos. El resultado fue la aparición de grandísimas esferas compuestas por átomos de hidrógeno y helio. Estas reciben el nombre de estrellas.

Las estrellas son objetos estables porque presentan dos grandes fuerzas que se contrarrestan a la perfección. Por un lado, la gravedad empuja los átomos de las estrellas hacia el centro. Por otro, las condiciones al interior de las estrellas provocan que los átomos emitan fotones; este fenómeno es conocido con el nombre de *radiación* y genera, a su vez, una presión expansiva (hacia afuera). De esta manera, la fuerza expansiva se opone a la gravedad, lo cual

4. Esta definición presenta aun la limitación de que la definición de lo que es un objeto y lo que no, dependerá del umbral requerido en el grado de interacción entre las partes. Así, en nuestro ejemplo, si requerimos un mayor nivel de interacciones, para entonces ahora el auto no será un objeto, sino que cada asiento será un objeto por separado, y el volante otro objeto, y el timón otro objeto. Con esta limitación, volvemos al punto de inicio: la definición de qué es un objeto depende *exclusivamente* del criterio y de las distinciones que establece el observador.

lleva a que se alcance lo que se conoce como *equilibrio hidrostático*. Este balance, permite que el conjunto de átomos no se expanda ni se contraiga. En otras palabras, la estrella se convierte en un objeto estable.



Lo que permite la estabilidad de las estrellas es que las dos fuerzas que les dan forma se autorregulan. Si la gravedad es muy grande, esto genera mayor presión y temperatura en su centro, lo cual impulsa la radiación y, con ella, la fuerza expansiva. De esta manera, se mantiene el equilibrio. Si esto no ocurriera, la gravedad creciente haría colapsar rápidamente a las estrellas, por lo que no podrían mantenerse a largo plazo. El contrapeso entre las dos fuerzas —la gravedad y la radiación— permite que las estrellas sigan existiendo. Es decir, fueron seleccionadas por su gran estabilidad.

Una vez que se habían formado suficientes estrellas en el universo, empezó a hacer su aparición un nuevo tipo de objeto. La gravedad comenzó a atraer a las diferentes estrellas que se encontraban relativamente cerca entre sí. Así, estas estrellas empezaron a interactuar en patrones cada vez más estables. El resultado de ese proceso es lo que hoy llamamos *galaxias*. Una galaxia puede contener una gran cantidad de estrellas: desde miles de millones hasta miles de billones. Todas ellas forman un fino patrón de interacciones dinámicas, lo cual hace que las galaxias continúen existiendo.

Las galaxias son objetos que también se encuentran en un fino equilibrio. Diversos estudios demuestran que la producción de estrellas en su interior es un proceso que se autorregula (Parravano, 1989). ¿Cómo ocurre esto? Por fuerzas que se contrarrestan. Cuando la tasa de formación de estrellas es demasiado elevada, su radiación ultravioleta calienta el polvo y el gas interestelar. Ocurre que la gravedad es más eficaz para condensar el polvo cuando este está frío, pues así son más lentos los átomos. Si el polvo y el gas están calientes, la gravedad pierde eficacia y, como efecto natural, se forman menos estrellas.

De este modo, se mantiene el equilibrio en las galaxias. Es decir, las múltiples interacciones en su interior —tanto a nivel de estrellas como a nivel de átomos— siguen un patrón exacto que preserva el equilibrio y asegura, por sí mismo, la persistencia de las galaxias.

Pero el principio de “selección del más estable” puede servirnos para explicar la existencia de objetos aún mayores. Si las galaxias se unen, forman objetos llamados *cúmulos galácticos*. Estos son a las galaxias lo que las galaxias a las estrellas. Por ejemplo, la Vía Láctea, junto con otras cien mil galaxias, forma parte de un cúmulo galáctico llamado Laniakea. Los cúmulos, a su vez, forman *supercúmulos*, objetos de unos quinientos millones de años luz de ancho. Y, por su parte, estos supercúmulos también tienden a agruparse en una especie de filamentos de proporciones cósmicas. Sin importar cuál sea el objeto, desde el más grande al más pequeño, en todos ellos la selección del más estable sigue cumpliéndose. Este principio funciona para los átomos de hidrógeno y helio, para las estrellas, para las galaxias, para los cúmulos galácticos y para supercúmulos. Y funciona también para los grandes filamentos que conforman el “ovillo de lana” de nuestro universo. Todos los objetos del universo poseen un patrón específico que asegura su estabilidad y, precisamente por ello, existen.

El misterio más grande de la ciencia

Sinteticemos dos grandes ideas que hemos visto hasta el momento.

En primer lugar, hemos abordado el concepto de interacción. Ahora sabemos que los primeros objetos que aparecieron en el universo —átomos, estrellas, galaxias y demás— lo hicieron como un resultado natural de la interacción permanente entre quarks y electrones en patrones cada vez más grandes. Todos estos objetos se formaron como consecuencia de coreografías cada vez más multitudinarias y más complejas. En ellas, los bailarines eran siempre los mismos: las tres partículas fundamentales que dan forma a los grandes objetos del universo (quarks arriba, quarks abajo y electrones). Incluso, como el elenco de bailarines nunca ha cambiado, bien se podría decir que toda la historia del universo no es más que la historia de la formación de nuevas coreografías, es decir, de nuevos patrones de interacción para esas mismas partículas. Desde esta perspectiva, lo único que ha ocurrido, y lo que viene ocurriendo desde el principio de los tiempos, es que el universo se ha ido ordenando a sí mismo por medio de la interacción de sus mismas piezas básicas. A los resultados de esa

interacción en patrones determinados solemos llamarlos átomos, o estrellas, o galaxias⁵.

En segundo lugar, hemos hablado de estabilidad. Los objetos del universo que conservan su forma son aquellos que se producen por una disposición estable de los quarks y los electrones. Sin esa estabilidad, estos objetos se perderían. No duraría su forma. No existirían para nosotros. Una estrella cúbica, una galaxia piramidal, un átomo con mil protones o con diez mil electrones no existen porque sus patrones no son suficientemente estables y, por lo tanto, no son objetos que se preserven en el tiempo.

Esta manera de entender cómo se forman los objetos nos lleva a una pregunta importante: ¿por qué las interacciones de nuestro universo tienden a producir los patrones que producen? O, dicho de otro modo, ¿por qué los quarks y electrones interactúan precisamente de la forma correcta para producir los patrones estables que conocemos? ¿Por qué, de forma espontánea, dan forma a átomos, estrellas o planetas? Podemos volver a emplear la analogía del baile, para entender lo extraordinario de este hecho. Imaginemos a bailarines que no se conocen, que no han ensayado juntos, que no siguen pautas previas, y que de pronto, al juntarse, pueden formar coreografías, coreografías espontáneas, pero muy complejas. ¿Cómo es que los bailarines que aparecieron en el baile cósmico conocían precisamente los pasos de baile necesarios para formar esas coreografías que moldearon nuestro universo? ¿Cómo pudieron hacerlo? ¿Qué fue lo que los ayudó?

En principio, la ciencia moderna postula que existen solo veinte parámetros fundamentales que determinan todo el proceso de ordenamiento del universo (entre ellos se encuentran la masa de las partículas, la intensidad de las interacciones, su alcance). Estos veinte parámetros pueden ser considerados como verdaderas constantes cosmológicas y constituyen los “datos” fijos con los que se forma nuestro universo.

Para nuestro asombro, la ciencia ha descubierto que estos veinte parámetros fundamentales tienen los valores exactos para favorecer la formación de objetos complejos, sean átomos, estrellas, galaxias, cúmulos o supercúmulos. Si solo uno de esos parámetros tuviera un valor diferente, nunca se habría

5. En este punto, podríamos preguntarnos si los quarks y los electrones no están formados por partículas aún más pequeñas. Durante las últimas décadas, los físicos se han dedicado a investigar qué es lo que se esconde en los niveles más ínfimos y profundos de la materia. Una respuesta sugerida es la llamada *teoría de cuerdas*, la cual establece que incluso las partículas subatómicas podrían estar constituidas por objetos más pequeños. Estos objetos minúsculos tendrían una sola dimensión, por lo que han sido denominados como *cuerdas*. Esta teoría sostiene que tales cuerdas pueden vibrar de diferentes maneras y que eso es lo que produce las propiedades de lo que nosotros percibimos como las diferentes partículas. Por muchos años, la teoría de cuerdas pareció un enfoque promisorio, pero aún no ha podido ser comprobada. Por eso, en este libro consideraremos a los quarks y a los electrones como las piezas fundamentales del universo.

formado un solo objeto en el universo. Este habría seguido siendo una sopa de partículas vagando erráticamente por toda la eternidad. Si retomamos la analogía del baile, podemos decir que estamos en un salón en que los bailarines no solo conocen los cuatro pasos de baile correctos, sino que además tienen la altura correcta, el peso correcto, la fuerza correcta y todo en su punto para propiciar la formación de coreografías complejas y estables.

Existen innumerables muestras de la exactitud de los parámetros fundamentales. Por ejemplo, si el *big bang* hubiera sido una millonésima parte más fuerte de lo que fue, todo se habría expandido excesivamente rápido y la gravedad no habría podido formar estrellas ni planetas. Asimismo, sabemos que los neutrones son exactamente 0,1 % más pesados que los protones. Si fueran un poco menos pesados, se convertirían en inestables y no formarían átomos de hidrógeno. En cambio, si fueran un poco más pesados, entonces no se produciría radiación dentro de las estrellas; la consecuencia de esto es que las estrellas no existirían, y menos las galaxias, ni los cúmulos galácticos, ni los supercúmulos. Por su parte, la gravedad es exactamente 10^{41} veces más débil que la fuerza electromagnética, y esto debe ser así, exactamente así, para que la gravedad conjunta de los trillones y trillones de átomos de una estrella se equipare perfectamente con la fuerza expansiva que se produce por la radiación nacida en el interior. Si ocurriera de otra forma, las estrellas colapsarían.

El margen de error que podrían permitirse en el valor de los parámetros fundamentales para que igual se formen objetos es tan minúsculo, que resulta casi imposible que todo este proceso se haya producido por puro azar. Se ha estimado que la probabilidad de que todos los parámetros fundamentales adopten por puro azar los valores necesarios para formar un universo con objetos tan complejos como el nuestro, es de una en 10^{229} . Así, es evidente que los parámetros fundamentales no pueden estar calibrados por casualidad (Smolin, 1999). La ciencia llama a este misterio el *problema del ajuste fino* y, para algunos, es el enigma más grande que enfrenta la ciencia (Dawkins, 2006).

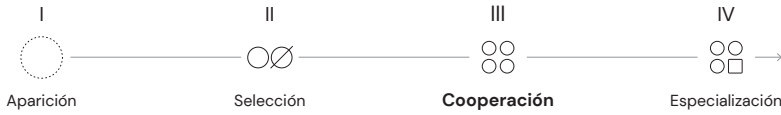
Ante este gran misterio, resurge la tentación: ¿no habrá sido todo producto de una voluntad suprema? Naturalmente, muchos teólogos contemporáneos han señalado que la explicación más simple a este misterio es la existencia de un ser divino que calculó y fijó los parámetros para así favorecer la complejidad en el universo. Este ser divino sería el responsable de la aparición de absolutamente todo lo que conocemos, desde átomos y estrellas y planetas y galaxias hasta células y animales y, por supuesto, el ser humano. De hecho, esto no ha sido exclusividad de teólogos. Incluso algunos científicos han seguido ese razonamiento. Por ejemplo, según el físico australiano Paul Davies, el ajuste fino es “la consecuencia de que Dios [haya] diseñado el universo de forma que fuera posible [...] la emergencia de la vida y la conciencia” (Davies, 1992, p. 213).

Si pretendemos ser intelectualmente rigurosos, la explicación de Paul Davies no puede ser satisfactoria. Richard Dawkins ha dicho el motivo. Según Dawkins, “un dios capaz de calcular los valores correspondientes [...] tendría que ser al menos tan improbable como la propia sintonía en la combinación de las constantes cosmológicas” (Dawkins, 2006, p. 143). En otras palabras, si lo que queremos es explicar un sistema increíblemente complejo e increíblemente ajustado —eso es, en buena cuenta, el universo completo—, no es de mucha utilidad recurrir a otro sistema que necesariamente es tanto o más complejo que el anterior. Por eso, recurrir a un dios como explicación al problema del ajuste fino no hace más que complicar la resolución del problema⁶.

Pero, aunque no hayamos resuelto el problema del ajuste fino, sí conocemos bien lo que ocurrió gracias a él. Hablamos de la historia de complejización del universo, por la cual se formaron todas las cosas que existen.

Volvamos, pues, a los protagonistas de este capítulo: los átomos. Hemos visto cómo estos aparecieron tras el *big bang*. Hemos visto también cómo fueron seleccionados los átomos más estables, los de hidrógeno y los de helio. Pasado cierto tiempo, en esta parte de la historia, los átomos empezaron a interactuar entre sí de formas cada vez más complejas. En lo que resta de este capítulo, entenderemos cómo formas cada vez más sofisticadas de interacción entre los átomos generaron las condiciones para que aparecieran los objetos realmente interesantes y complejos que veremos en los próximos capítulos, como seres vivos, personas o sociedades.

6. Un segundo tipo de respuestas al problema del ajuste fino obedece al llamado *principio antrópico*. Este establece que, si los valores de los parámetros fundamentales fueran diferentes, entonces sencillamente no habría nadie para darse cuenta. En otras palabras, solo pueden existir seres humanos en un universo que tiene aquellas constantes capaces de producirlos. Por lo tanto, nuestra misma existencia determina que los parámetros fundamentales deben tener los valores que tienen. Sin embargo, existe un problema serio con el principio antrópico en el contexto de este libro: no es una respuesta científica, porque esta explicación no está sujeta a la constatación empírica (Smolin, 1999). Así, aunque el principio antrópico pueda ofrecer la verdadera respuesta al misterio, nunca podremos confirmar esa verdad.



ETAPA III

LOS ÁTOMOS TRABAJAN EN EQUIPO

Los átomos de hidrógeno y los de helio interactúan entre sí de formas muy limitadas. Los únicos objetos claros que pueden formar a partir de su interacción son las estrellas. También podríamos considerar como objetos las nebulosas, compuestas de helio e hidrógeno en forma de gas y polvo flotando en el espacio. Sin embargo, para que se formaran los planetas, y para que en ellos ocurrieran cosas más interesantes, tuvieron que aparecer átomos mucho más complejos. La pregunta que nos importa es muy simple: ¿cómo así?

En las páginas anteriores, hemos visto que en el espacio, los quarks y los electrones solo pueden establecer dos tipos de coreografías estables: como átomos de hidrógeno y como átomos de helio. Sin embargo, la ciencia sabe que estos no son los únicos átomos. Existen por lo menos ciento dieciocho tipos de átomos, algunos con decenas de quarks y electrones interactuando entre sí de maneras muy complejas. Pero ¿cómo se formaron todos los átomos restantes? ¿Cómo apareció el grueso de átomos del universo? ¿Cómo nacieron los átomos de oro o de plata? ¿Cómo los de silicio? ¿Cómo los de carbono? Hay una respuesta para ello, felizmente.

El nacimiento de los átomos complejos

La respuesta a las preguntas anteriores yace al interior de las estrellas. En ese lugar existen condiciones muy diferentes a las del espacio exterior. Esas condiciones permitieron que los quarks y los electrones formaran patrones mucho más complejos. La gravedad y la temperatura son mucho más poderosas allí. Esto provocó que los núcleos de los átomos de hidrógeno se acercaran entre sí, de un modo imposible afuera de las estrellas. El resultado fue que los núcleos de los átomos de hidrógeno terminaron por fusionarse y formar átomos de helio. Esto quiere decir que el hidrógeno de las estrellas se transformó lentamente, progresivamente, en helio. (Recordemos que el helio es más complejo que el hidrógeno; en su estructura hay, en total, doce quarks y dos electrones). Cuando las estrellas produjeron las temperaturas y presiones necesarias, la fusión de núcleos continuó y eso produjo nuevos átomos: primero de tres protones, luego de cuatro, luego de cinco; el proceso continuó, así,

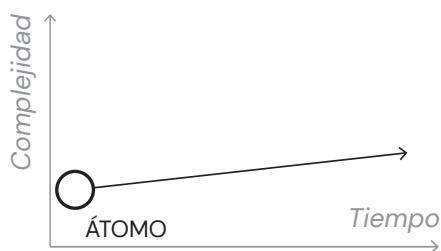
sucesivamente. Pasados millones de años de constante repetición, la fusión de núcleos atómicos produjo átomos más pesados. “Más pesados” quiere decir “con más protones y neutrones en su interior”. Así nacieron los átomos de oxígeno, de neón, de magnesio y de silicio.

La creación de átomos pesados mediante la fusión de núcleos tiene un límite en el interior de las estrellas de tamaño promedio. Cuando se forman átomos de hierro —con un total de veintiséis protones—, la temperatura y la presión no alcanzan para seguir fusionando núcleos. Entonces, ¿cómo se formaron los átomos más pesados que el hierro? La respuesta yace en el proceso de muerte de las estrellas realmente grandes. Cuando el combustible de las estrellas gigantes se agota, ellas colapsan sobre sí mismas, lo que provoca una gran explosión. Este fenómeno es conocido con el nombre de *supernova* y, si bien no es muy frecuente, es un evento espectacular. En nuestra galaxia, una supernova se presenta cada treinta o cuarenta años. Y, durante un breve periodo, de más o menos un mes, las supernovas brillan lo mismo que millones de estrellas normales (Krauss, 2012).

Lo importante para nosotros es que, justo antes de explotar, la presión y la temperatura descomunales de las supernovas permiten que se fusionen entre sí los átomos de hierro y con ello se forman los átomos más pesados. Tras ello, las supernovas producen fuertes ondas de choque que expulsan hacia el exterior todos estos átomos pesados. Así, los materiales que son más pesados que el hierro —como el cobre, el oro, el estaño y tantos otros— nacieron de estrellas gigantes, en sus momentos de agonía.

La formación de átomos complejos al interior de las estrellas es un hito trascendental para la historia que estamos relatando. Gracias a ello, el universo pudo contar con nuevas piezas para armar objetos cada vez más interesantes. Todos los átomos de nuestro cuerpo, a excepción de los de helio y los de hidrógeno, fueron producidos al interior de alguna estrella. Y es probable que los átomos que forman nuestra cabeza sean de una estrella distinta que la de los átomos de nuestros pies.

El siguiente esquema sintetiza el proceso de complejización de los átomos, ocurrido a través del tiempo. Este gráfico es importante, porque es la primera piedra de un esquema mucho más completo, que iremos construyendo con el correr de los capítulos y que ilustrará la historia general de complejización del universo.



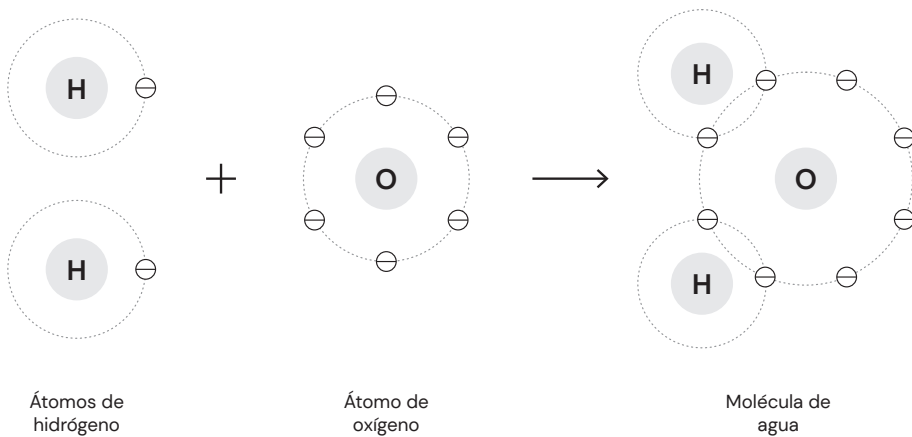
Los átomos empiezan a cooperar entre sí

Los átomos más complejos son capaces de interactuar de formas mucho más interesantes que los de hidrógeno y los de helio. Esto puede ser visto como una especie de *cooperación* entre los átomos. ¿Qué significa esto de la cooperación entre átomos? ¿Cómo objetos inanimados pueden cooperar entre sí?

Los átomos complejos cooperan de forma muy simple: se enlazan entre sí para formar objetos más grandes y más complejos que ellos mismos. Estos objetos, formados por múltiples átomos, nosotros los conocemos con el nombre de *moléculas*. Pero ¿por qué se juntan los átomos? ¿Para qué forman moléculas? La respuesta también es simple: porque buscan estabilidad. Algunas moléculas son más estables que los átomos individuales que las conforman. Por ello, tras ensamblarse de manera fortuita, las moléculas en conjunto tienen más chances de sobrevivir. De ahí que la formación de moléculas pueda ser entendida como un modo de cooperación entre átomos poco estables. Sencillamente, ese tipo de interacción favorece su propia subsistencia.

Al respecto, cabe preguntarse: ¿cómo puede ser que las moléculas sean más estables que los átomos que las conforman? Es como si un edificio fuera más estable que sus ladrillos. Pero esto obedece a un motivo. Ocurre que los electrones alrededor del núcleo de un átomo tienen ciertas configuraciones que resultan más estables. Por ejemplo, para que un átomo sea realmente estable, lo mejor es que tenga dos u ocho electrones alrededor de su núcleo. Si tiene un número diferente, perderá estabilidad. Como algunos átomos no cumplen con esta regla, se enlazan entre sí para empezar a cumplirla.

Una muestra de lo explicado es la molécula de agua: la unión de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno es mucho más estable que los tres átomos por separado. El siguiente esquema revela la razón. En principio, cada átomo de hidrógeno tiene solo un electrón. El de oxígeno, por su parte, tiene solo seis electrones. Pero cuando los tres se ensamblan como molécula de agua, cada átomo empieza a cumplir con la regla de estabilidad: hay dos u ocho electrones alrededor de cada núcleo.



La formación de las moléculas es capital para nuestra historia, pues todos los objetos interesantes están hechos de ellas. En efecto, las moléculas constituyen todos los objetos que protagonizarán nuestro relato en los siguientes capítulos (las células, los animales, las comunidades y las civilizaciones). No obstante, esto no invalida lo dicho anteriormente: todos los objetos no son más que quarks y electrones interactuando entre sí en patrones específicos. Las moléculas también, como antes los átomos. De igual modo, sigue siendo cierto que la historia del universo es la historia de la formación de nuevas coreografías: los bailarines son los mismos, solo que cada vez son más y cada vez interactúan en patrones más complejos.

Pero ¿qué significa exactamente que un patrón se haga más complejo? ¿De qué hablamos exactamente cuando hablamos de complejidad?

¿Qué es la complejidad?

Definir con precisión este concepto nunca ha sido fácil, ni desde un punto de vista filosófico ni desde un punto de vista empírico. Por ello, a fin de tener un soporte para nuestra historia, tomaremos un acercamiento muy simple e intuitivo. Se trata de lo señalado por el futurólogo Ray Kurzweil. Dicho autor propone entender la complejidad como la cantidad de información necesaria para describir un patrón por completo (Kurzweil, 2005). Mientras más larga tenga que ser esta descripción, más complejo será el patrón y, por tanto, el objeto mismo (Fisher, 2009). En otras palabras, los objetos más complejos son aquellos que presentan un patrón más intrincado de interacciones y aquellos que, por ende, requieren más información para ser descritos.

¿Cómo se logra esa mayor complejidad? La mayor complejidad en un objeto se alcanza en un punto intermedio entre la uniformidad total y la aleatoriedad total. Ninguno de esos dos extremos es verdaderamente complejo. Si un sistema cuenta con uniformidad total, para describirlo bastará decir que todos

sus elementos interactúan entre sí, del mismo modo. Eso es una descripción breve. Por su parte, si un sistema presenta aleatoriedad total, bastará decir que todas sus interacciones ocurren al azar. Esto también es una descripción breve. Para que un sistema sea lo más complejo posible, este debe alejarse de los dos extremos mencionados. Por tanto, la mayor complejidad posible se alcanzará en un punto intermedio entre la uniformidad total y la aleatoriedad total. Si un sistema está, en efecto, lejos de esos dos extremos, presentará un intrincado patrón de interacciones. Esto se traducirá en una descripción necesariamente larga, en la que habrá que ir definiendo las interacciones casi una por una: “El primer elemento interactuando con el tercero y el quinto”, “el segundo interactuando solo con el séptimo”, y así sucesivamente. Esa es la razón de que, por ejemplo, el cuerpo humano sea un objeto tan complejo. Si bien está formado por átomos —como ocurre con cualquier objeto del universo—, la forma en que estas piezas interactúan entre sí es extremadamente precisa e intrincada: está muy lejos de la uniformidad total, y muy lejos del azar total.

Con el concepto de complejidad más claro, podemos ahora retomar el objetivo de nuestra historia. Podemos volver a hacernos las preguntas de rigor. ¿Cómo se fueron formando patrones tan increíblemente complejos? ¿Cómo pudieron surgir coreografías tan grandes y tan coordinadas de quarks y electrones, que nosotros las percibamos como células, como animales, como personas o como sociedades completas? Durante el resto de capítulos, explicaremos ese proceso.

No obstante, esta no será una tarea sencilla. Sucede que estos objetos no pueden haberse formado del mismo modo que los átomos, las estrellas o las galaxias. Mientras que estos últimos se formaron por una aglomeración espontánea de sus piezas constituyentes, esto no puede haber ocurrido con los animales o las personas. No importa cuán ajustados estén los veinte parámetros fundamentales. La probabilidad de que solo una célula se haya formado así es casi inexistente. El astrónomo Fred Hoyle lo ilustró muy claramente: “Crear que la primera célula se originó por casualidad equivale a creer que un tornado que pase por un depósito de partes de aviones puede ensamblar por sí solo un Boeing 747” (Hoyle, 1981, p. 105). En efecto, se ha calculado que la probabilidad de que todas las moléculas necesarias para la vida se ensamblaran espontáneamente formando la primera célula es de alrededor de $10^{40.000}$ contra 1 (Davies, 2000).

Entonces, ¿cómo podemos explicar la formación de los objetos complejos de nuestro universo?

El principio más aceptado de todos

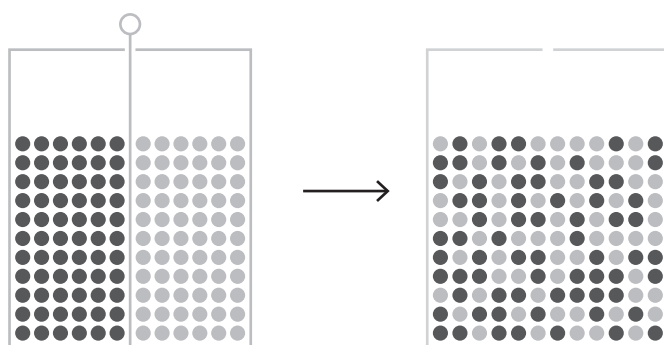
Como vimos en la introducción, la segunda ley de la termodinámica es el principio científico más aceptado de todos. Al serlo, alguna luz podrá darnos sobre este problema. Pero, para que ello ocurra, debemos saber de qué se trata. En términos formales, la segunda ley de la termodinámica se puede expresar del siguiente modo: la evolución espontánea de un sistema cerrado se traduce siempre en el aumento de su entropía.

La frase, dicha así, parece algo complicada. Sobre todo si nos preguntamos: ¿qué querrá decir *entropía*? En realidad, se trata de un concepto bastante accesible. De forma intuitiva, la entropía se puede entender como el *grado de desorden* que hay en algún sistema. Por ejemplo, una ruma de cartas tiradas al azar tiene más entropía que un mazo de cartas ordenadas por color y por número. A más desorden hay en un sistema, decimos que tiene más entropía. Considerando esto, lo que la segunda ley de la termodinámica establece es que todas las cosas avanzan espontáneamente de un estado de orden (es decir, de baja entropía) a uno de desorden (de alta entropía). En otras palabras, que todo avanza hacia el caos.

Un ejemplo de la acción de la segunda ley de la termodinámica es lo que sucede cuando se juntan dos objetos de temperaturas diferentes. Si estos están en contacto por el tiempo suficiente, ambos terminarán a la misma temperatura. De este modo, la entropía del conjunto habrá aumentado. Pasamos de un sistema ordenado (caliente a la izquierda y frío a la derecha) a uno que ha perdido dicho orden (todo a la misma temperatura). Una vez que se llega a este equilibrio térmico, no hay marcha atrás. No se puede retroceder. Jamás ocurrirá que, espontáneamente, uno de los lados comience a calentarse mientras que el otro comienza a enfriarse. El orden se ha perdido de manera irrevocable. La entropía ha subido y ya no puede bajar.

En este punto, es evidente la relación inversa que existe entre los conceptos de complejidad y entropía. Mientras más baja es la entropía de un objeto, mayor es su complejidad, y viceversa. Si, por ejemplo, un conjunto de quarks interactúan de un modo intrincado y preciso, formando patrones dispuestos en forma de estrellas, su entropía será baja y su complejidad, alta. En cambio, si esos quarks interactúan erráticamente, caóticamente entre sí, su entropía será alta y baja su complejidad.

Pensemos en otro ejemplo de la segunda ley de la termodinámica. Imaginemos un recipiente con dos cámaras separadas por una pared de plástico. En la cámara izquierda solo hay pintura negra y en la cámara derecha solo hay pintura blanca. Esto puede considerarse como un sistema relativamente complejo: todas las partículas negras están a un lado y todas las partículas blancas a otro lado. Pero ¿qué ocurre si retiramos la pared que divide ambas cámaras?



Sin que tengamos que hacer nada más, las pinturas empezarán a mezclarse. De forma espontánea, el sistema avanzará a un estado con más entropía, de menos complejidad, en el que habrá partículas negras y blancas por todas partes. Al cabo de poco tiempo, veremos cómo se forma una uniforme pintura gris. Las partículas de ambos colores estarán desperdigadas y ya no existirá el orden que antes había. No importa cuánto esperemos o cuánto batamos el recipiente, no podremos volver atrás: la pintura seguirá siendo gris y homogénea. El nuevo estado, de entropía alta y de complejidad baja, es, como puede verse, del todo irreversible. Así, el aumento de la entropía en un sistema cerrado es irrevocable, y es inherente al modo en que funciona nuestro universo.

Si miramos el universo en toda su amplitud, notaremos que la segunda ley de la termodinámica sigue siendo válida. En efecto, el universo va del orden al desorden o, lo que es lo mismo, de lo más complejo a lo menos complejo. El destino final e inevitable del universo es perder todo tipo de complejidad en su interior. En miles de millones de años a futuro, las estrellas y los planetas comenzarán a disolverse. Quedarán pocos, poquísimos objetos distinguibles, como estrellas de neutrones o como agujeros negros. Sin embargo, en un lapso de trillones de años, incluso los agujeros negros comenzarán a evaporarse. Y todo ello producto de la segunda ley de la termodinámica. Más tarde aún, en unos 10^{100} años —un periodo de tiempo inimaginable para nosotros—, todo en el universo se habrá por fin disipado, incluso los mismos átomos o las partículas fundamentales. Finalmente, la entropía habrá llegado a su punto más alto y todo el universo será perfectamente homogéneo. A partir de ese momento, ningún evento podrá ocurrir en un cosmos eternamente frío, y eternamente vacío⁷.

7. Si bien existe un consenso absoluto dentro de la comunidad científica sobre el hecho de que la entropía aumenta de manera irreversible, hay dos escenarios posibles en los que el universo podría morir antes de que la entropía llegara a su estado máximo. El primer escenario postula que el proceso de expansión del universo podría acelerarse tanto que, en algún momento lejano, toda la materia existente, se disgregaría por completo. En esta teoría, conocida como *big rip* (“gran desgarramiento”), todo estaría tan apartado de todo lo demás que ya nada podría

He aquí una paradoja: estamos comenzando un libro dedicado a explicar el incremento de la complejidad y nos encontramos con que el principio científico más aceptado de todos establece que el universo avanza siempre hacia el desorden. Es decir, que la complejidad del universo no se incrementa, sino que se reduce, y de manera irreversible. Si esto es así, ¿cómo fueron apareciendo objetos cada vez más complejos e interesantes en nuestro universo? ¿Cómo aparecieron células con vida? ¿Cómo aparecieron los animales y sus cerebros? ¿Cómo se cubrió nuestro planeta de complejas sociedades?

Afortunadamente, hay una respuesta para todo esto. Para entender cómo aparecieron estos objetos cada vez más complejos, debemos prestar atención a un átomo en especial: el átomo de carbono, del que hablaremos a continuación. Este pequeño átomo, en apariencia normal, dio un giro inesperado a la historia del universo. En la siguiente sección, entenderemos cómo sucedió. Veremos cómo y por qué el átomo de carbono se especializó en formar moléculas increíblemente complejas. Veremos cómo esto produjo una propiedad inédita en ellas. Y veremos cómo este evento, esta nueva propiedad molecular, le otorgó al universo un mecanismo para incrementar la complejidad.

ocurrir, pues ninguna partícula interactuaría con otra. El segundo escenario señala que, de existir suficiente masa en el universo, en algún punto crítico este alcanzará su tamaño máximo y luego, inevitablemente, empezará a colapsar. Su tamaño se reducirá y quedará como en un inicio, convertido en un solo punto sin tamaño. A esta teoría se la conoce como *big crunch* (“gran implosión”).



ETAPA IV CARBONO, EL ALMA DE LA FIESTA

¿Qué es lo que hace tan especial al carbono? Esa parece ser la pregunta del millón de dólares. Ocurre que el carbono tiene dos grandes cualidades que son perfectas para formar moléculas muy complejas. En principio, se trata del único tipo de átomo capaz de vincularse simultáneamente con otros cuatro átomos. Los demás solo pueden vincularse con dos o hasta con tres átomos. Esto le otorga al carbono un lugar de privilegio⁸. Por otra parte, el carbono puede unirse simultáneamente con diferentes tipos de átomos, lo cual es una propiedad que pocos tienen. Así, por esas dos razones, el carbono es singular.

Las dos cualidades mencionadas le permitieron al carbono convertirse, por decirlo coloquialmente, en el alma de la fiesta. Comenzó a actuar como el eje que conectaba a todos los demás tipos de átomos. Que pudiera conglomerar eficazmente a sus compañeros permitió que las moléculas ganaran complejidad. Su capacidad para formar moléculas con intrincadas figuras geométricas era, en realidad, absolutamente portentosa: de los cien millones de tipos de moléculas que conocemos, más de noventa millones tienen carbono en su interior. De hecho, el rol del carbono en la formación de moléculas complejas es tan importante, que la química moderna separa las moléculas en dos grupos: las que tienen carbono y las que no lo tienen. Si una molécula tiene carbono se la conoce como *orgánica*, mientras que si no tiene carbono se la conoce como *inorgánica*. Y, por norma general, las moléculas orgánicas pueden ser mucho más complejas que las moléculas inorgánicas.

Las moléculas orgánicas pueden formarse en el espacio exterior. La ciencia ha identificado más de ciento cincuenta tipos de moléculas que se forman en dicho ambiente⁹. Sin embargo, fue en los planetas donde se dieron las con-

8. En realidad, el átomo de silicio también puede conectarse con otros cuatro átomos. Sin embargo, carece de la efectividad del carbono, pues sus enlaces son mucho más débiles. Además, los átomos de silicio son un 50 % más grandes, lo cual es una desventaja para armar moléculas intrincadas.

9. Algunos experimentos recientes han mostrado que las condiciones del espacio exterior podrían permitir la creación de moléculas orgánicas más complejas que las que se forman en la Tierra (Chaisson, 2006). En particular, las combinaciones de agua, metano, amoníaco y monóxido de carbono expuestas al frío extremo y a radiación ultravioleta —justamente lo que encontramos en el vacío interestelar— son excelentes condiciones para la producción de moléculas orgánicas más complejas (Marlaire, 2015). Por ello, algunos científicos han planteado que algunas

diciones necesarias para ensamblar los diseños más altamente complejos. Y, como es natural, el lugar que mejor conocemos como escenario de ese proceso es nuestro planeta, la Tierra.

La historia de la complejidad en la Tierra

La Tierra se formó hace unos cuatro mil quinientos millones de años como resultado de la aglomeración de materiales pesados que un día fueron cocinados al interior de alguna estrella. El proceso de conglomeración de materia que le dio forma duró alrededor de cien millones de años e incorporó principalmente cuatro tipos de átomos: hierro (32 %), oxígeno (30 %), silicio (15 %) y magnesio (14 %), además de pequeñas cantidades de otros átomos. Primero, estos átomos comenzaron a conglomerarse en motas de polvo, las cuales con el tiempo fueron formando pequeñas piedras, que luego se amontonaron en rocas más grandes. De ese modo alcanzaron el tamaño de pelotas de fútbol; luego, el tamaño de casas; luego, el de montañas; y después todo el material terminó por dar forma a una grandísima esfera del tamaño de la Tierra. Por efecto de la gravedad, los átomos más pesados se fueron hacia el centro de esta enorme bola —formando el pesado núcleo de nuestro planeta—, y fueron dejando a los más livianos en las capas exteriores. En la superficie, quedó el material más liviano. Esto es lo que hoy conocemos como *atmósfera*. El paso final en la creación de nuestro planeta fue la formación de los océanos. No sabemos exactamente cómo ocurrió, pero se piensa que la mayor parte del agua provino de asteroides hechos de hielo que bombardearon la Tierra por millones de años.

¿Por qué el carbono pudo mostrar toda su capacidad en la Tierra? ¿Qué había dentro de ella que la hiciera tan especial? Nuestro planeta fue como un oasis en el desierto para el carbono. En ella encontró por fin donde mostrar todo su talento. Esto ocurrió por dos razones centrales. Por un lado, en el agua líquida, las condiciones son perfectas para favorecer las interacciones entre los distintos átomos. Los ambientes gaseosos tienden a alejar a los átomos, por lo que estos apenas interactúan; y los ambientes sólidos no permiten que los átomos se muevan con libertad para encontrar nuevos compañeros. De modo que el agua líquida de la superficie terrestre fue la primera circunstancia favorable para el carbono. Por otro lado, los grandes océanos de nuestro planeta tenían la temperatura justa para perpetrar enlaces químicos interesantes. Si la Tierra fuera solo un poco más caliente, todo se movería demasiado rápido y los átomos no podrían interactuar de forma estable. Por el contrario, si fuera solo un poco más fría, todo se movería demasiado lento y no se podrían formar

de las moléculas orgánicas complejas de la Tierra llegaron ya ensambladas desde el espacio exterior.

moléculas realmente complejas. Así que la temperatura fue la segunda circunstancia favorable para el carbono.

Como consecuencia de estas perfectas condiciones de la Tierra, los átomos comenzaron a interactuar en sus mares. El carbono se especializó en promover estas interacciones. Funcionaba, ya se ha dicho, como el eje de esas uniones. La concentración de componentes químicos diversos habría impulsado aún más la formación de interacciones, por lo que este proceso se fue autorreforzando. Así, con el liderazgo inigualable del carbono, los átomos de la Tierra se mezclaron y se remezclaron. De ese modo fueron surgiendo coreografías cada vez más complejas, que dieron forma a moléculas cada vez más complejas.

Emerge algo completamente nuevo

Después de millones de años, este larguísimo proceso de continua complejización molecular gracias al carbono terminó por dar forma a una molécula muy especial. Esta molécula era capaz de algo extraordinario. Algo que ninguna otra molécula había hecho antes y que supuso un avance gigantesco en el camino hacia lo que hoy conocemos como *vida*. En algún momento del pasado, en un rincón de algún océano, una molécula utilizó los átomos que se hallaban en su entorno para hacer lo que por entonces parecía aún imposible: replicarse a sí misma, generar una copia de sí.

Esto, así enunciado, quizá parezca poco importante. Pero el día en que una molécula pudo copiarse a sí misma, las reglas básicas de la existencia cambiaron para siempre. La propiedad de la *copia* (en inglés, *copy*) produjo un clic en el universo. Permitió que la complejización darwiniana empezara a operar. Y permitió que la famosa segunda ley de la termodinámica ya no limitara el proceso, sino que empezara a guiarlo. Todo porque una molécula pudo copiarse a sí misma.

Pero ¿cómo es que la propiedad de la copia hizo todo esto? En el próximo capítulo, encontraremos la razón y haremos un zoom en la Tierra para mejor observarla. Así veremos cómo aumentó la complejidad de los objetos en nuestro planeta y cómo ello ocurrió gracias a la propiedad de la copia. Asimismo, veremos cómo entran en relación la selección natural y la segunda ley de la termodinámica, y cómo esto nos ayuda a comprender de forma clara el mecanismo de complejización que propone este libro. El primer paso de este viaje será explicar el origen de la vida en nuestro planeta. Para ello, nos centraremos en una nueva protagonista: la primera molécula capaz de autocopiarse, la molécula de ARN.

SÍNTESIS DEL CAPÍTULO 1

Desde que apareció el átomo hasta que emergió la propiedad de la copia

