

Materia viva y materia inerte

LUIS BRÚ *

EL interés y la necesidad de conocer la estructura íntima de la materia data del siglo V antes de JC., cuando Demócrito de Abdera inició la concepción atomista, vigente todavía en el momento actual. Los progresos recientes de la Biología Molecular hacen necesario tratar de establecer dónde radica la diferencia entre las llamadas materias VIVA e INERTE. Esta última se consideraba hasta hace poco como imperecedera, pero las conclusiones a las que están llegando los físicos teóricos, y cuya comprobación experimental se persigue con creciente interés, hacen dudar de tal aserción. En efecto, el *protón*, constituyente fundamental de los núcleos atómicos, parece que no es una: partícula estable. Su vida media es de 10^{32} años y su desintegración traería consigo el fin de todo el mundo material; es decir, la propia Naturaleza. La Física Estadística está sirviendo aquí como piloto, ya que, como es fácil de imaginar, no podemos esperar aquel intervalo de tiempo para contemplar la desintegración de un protón, pero sí podemos operar con 10^{32} protones y confiar en asistir al fascinante espectáculo que supondría la desintegración de uno de ellos.

La *materia viva* se caracteriza por su inexorable camino de nacer, reproducirse y finalmente morir. Sucede, además, que nuestro conocimiento del llamado ESTADO SÓLIDO de la materia, un sistema en el que reina el orden y cuenta con la belleza de la simetría, es cada vez más profundo. Sus aplicaciones están a la orden del día. Basta citar el *láser*, los *semiconductores* y los *superconductores*, que han revolucionado muchos aspectos de la vida actual, para justificar el contenido de estas líneas que, creo, pueden ser de interés para muchos de los lectores de *CUENTA Y RAZÓN*.

La estructura de la materia ha sido objeto de un debate histórico entre los defensores de una estructura continua y la atomista citada anteriormente, según la cual, cualquier sustancia es una colección de átomos o de moléculas que puede manifestarse en sus tres estados clásicos de sólido, líquido o gaseoso, que dependen de las intensidades de las fuerzas, de las *interacciones*, que reinan entre ellos, así como de ciertas condiciones externas, como pueden ser la presión o la temperatura.

Tanto la materia viva como la inerte están formadas de manera análoga por un conjunto de elementos que, en un lenguaje vulgar, podríamos considerar como ladrillos, con los que lo mismo puede construirse una simple cerca, una catedral gótica o románica, los edificios de una ciudad como Brasilia o un vertebrado. ¿Dónde radica

* Almería, 1909. Catedrático de Física de la Universidad Complutense. De la Real Academia Nacional de Medicina.

entonces la diferencia? ¿Cómo se pasa de una a la otra? Los átomos son los mismos, como también lo son las leyes fundamentales que los gobiernan. La diferencia no está ligada a la materia por ella misma, sino a su ORGANIZACIÓN. La frontera de separación es a veces delgada y permeable. Los *virus*, por ejemplo, la franquean alegremente. Estas pequeñas cápsulas proteicas que encierran un fragmento de ADN o ARN se forman espontáneamente a manera de cristales moleculares, cuando se ponen en presencia sus diferentes constituyentes, pero el virus no revela sus propiedades de viviente hasta que infecta un organismo más evolucionado. Es ahora cuando utilizan la máquina celular del «cliente» para poner de manifiesto su propio material genético que asegura su reproducción; es decir, su supervivencia.

La vida puede originarse a partir de la materia no viva, mediante un proceso que ha sido llamado de *generación espontánea*. Pocos científicos dudan de él. Aristóteles, Newton, Descartes y van Helmot, entre otros, lo aceptan sin cuestionar nada. Incluso los teólogos, Turberville es una buena muestra, lo suscriben. No están conformes, como indica el Génesis, que Dios crease las plantas y los animales pero sí que preparó la tierra y las aguas para que tal cosa sucediera. Tampoco es herético creer que el proceso continúa.

La «fabricación» de un organismo es un proceso complicado en extremo. Se requiere que, en circunstancias apropiadas, se junten en correcta formación las debidas sustancias: agua, ciertas sales y compuestos de carbono; es decir, *materiales orgánicos* que contienen, en su mayor proporción, carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, que entre los cuatro conforman el 99% del material vivo. Estos materiales orgánicos se agrupan en cuatro grandes clases: *grasas, proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos*. Si se analiza a fondo la probabilidad de que se den las circunstancias especiales antes aludidas, se llega a la conclusión de que es un hecho imposible. Pero la probabilidad que se maneja aquí tiene una característica especial, pues *basta que el suceso ocurra una sola vez*. Contemplada a nuestra escala de tiempo caemos en lo imposible, pero a escala cósmica lo imposible se transforma en posible, lo posible en probable y lo probable en cierto. Es cuestión de esperar. Alguien ha dicho que *el tiempo por sí mismo, conduce a milagros*.

Los progresos recientes de la Biología Molecular, describiendo por vez primera la organización microcósmica del viviente, tratan de explicar la tendencia a la organización de la materia viva. Los biólogos atribuyen la auto-organización de los seres vivos a las propiedades «inteligentes» de las moléculas biológicas y sólo a ellas. La organización de los seres vivos complejos nacería, dicen, de la capacidad del reconocimiento espacial de las proteínas y del ADN. Pero la escala de la evolución, la formación del código genético sigue siendo un misterio. Los cálculos conducen a que el tiempo necesario para conseguir una buena configuración es del orden de 10^{50} segundos, muy superior a la edad del Universo que se cifra en 10 segundos.

Al llegar aquí no se puede silenciar el experimento de Miller, discípulo del premio Nobel de Química, Harold Urey. Dispuso en un

GENERACIÓN ESPONTÁNEA

recipiente apropiado vapor de agua, metano, amoníaco o hidrógeno, que son los elementos que formaban la atmósfera primitiva, y que aún reina en algunos planetas, y lo sometió a la acción de fuertes descargas eléctricas y a la luz ultravioleta de gran intensidad. Se trataba de sustituir la influencia pertinaz del tiempo aumentando de manera espectacular la acción de las condiciones exteriores. El resultado fue la aparición de una mezcla de aminoácidos que se *habían formado espontáneamente, como* hemos indicado, a partir de materia no orgánica.

Después de un período de estabilidad, debe así mismo aparecer una *disolución*, también espontánea, que contrarreste aquella generación. Habida cuenta de que la disolución es más rápida que la generación, es preciso que el medio exterior suministre grandes cantidades de energía para permitir su existencia. Se ha definido un organismo vivo como una complicada máquina capaz de cumplir de manera exacta esta función. No precisan seguir contando con la acumulación de la materia orgánica del pasado, la fabrican por sí mismos. Con la energía que reciben del Sol realizan la síntesis orgánica que, mediante una fermentación, puede producir la energía que precisan.

REACCIONES QUÍMICAS OSCILANTES

Existen reacciones químicas en la materia inerte que se comportan en cierta manera como las que tienen lugar en la materia viva. Son reacciones lentas, en las que interviene muy poca energía. Se caracterizan por reparticiones inhomogéneas de los productos de reacción que se traducen en formas geométricas sorprendentes. Una gota de tinta que se deja caer en un vaso lleno de agua se dispersa de manera progresiva por difusión. Al cabo de algunas horas, el líquido toma una coloración uniforme al repartirse la tinta por todo el agua. La operación es irreversible, y de forma espontánea la tinta jamás volverá a aparecer en forma de gota. La propiedad de la *irreversibilidad* es una característica capital de muchas evoluciones de la vida diaria. Una casa destruida por el fuego nunca podrá volver a resurgir de sus cenizas.

Parece entonces necesario introducir en nuestra descripción de la Naturaleza una ley que encierre esta *irremediable irreversibilidad*. La ley fue introducida por Clausius en 1850 al enunciar su famoso segundo principio de Termodinámica, y completada por Boltzman, a finales del siglo **XIX**, al darle una interpretación estadística. La idea general es bien conocida: toda evolución espontánea de un sistema aislado conduce obligatoriamente a la homogeneidad; es decir, al estado de máximo desorden que tiende a destruir cualquier forma de organización inicial. La materia inerte no sabe evolucionar de otra manera pero, ¿qué ocurre en el seno del mundo viviente en el que los fenómenos de la organización del medio y de la autoorganización aparecen constantemente? ¿Es que por razones que ignoramos los seres vivos pueden escapar al rigor del segundo principio? Volveremos sobre ello, pero queremos ahora recalcar que también la materia inerte presenta comportamientos coherentes a escalas de tiempo y espacios macroscópicos. Veamos un ejemplo: para que un fenómeno de organización espontánea de la materia sea observable es preciso que esté sometido a acciones que lo alejen lo

suficiente del equilibrio. Así sucede en algunas reacciones químicas que, en fase líquida, oscilan en el curso del tiempo. Se separan de la monotonía de las usuales porque consumen y producen de forma alternativa ciertas especies químicas. Un modo sencillo de observarlas es como sigue: se disponen, uno al lado del otro, diez vasos que contienen una disolución de una reacción oscilante. Se añade sucesivamente una gota de reactivo que tiene por objeto crear una *diferencia de fase* de oscilación entre cada dos vasos consecutivos. Cada vaso se comporta como un reloj ligeramente adelantado y retrasado, respectivamente, de sus vecinos de la izquierda y de la derecha. La solución produce yodo y vira al azul. Más tarde, al consumirse este elemento, lo hace hacia el amarillo. Con intervalos de seis horas se aprecia el paso sucesivo de una fase a la otra que se manifiesta por la propagación aparente de un cambio de color. Ocurre como en los anuncios luminosos, que dan la sensación de que algo está en movimiento cuando en realidad no sucede así.

Una reacción muy célebre que da lugar a la aparición de *ondas químicas* es la conocida con el nombre de Belousov-Zhabotinsky, en la que pueden apreciarse figuras geométricas que nacen de forma espontánea motivadas por la interacción de la reacción química y la conducción hidrodinámica. Belousov observó estas reacciones en 1950, pero sus trabajos fueron rechazados hasta que en 1970 su discípulo Zhabotinsky realiza su tesis doctoral basándose en ellos, que fue premiada por la Academia de Ciencias de la URSS con el premio Lenin. Este tipo de reacciones mantienen una cierta semejanza con lo que acontece en el lóbulo central de un mamífero. Nada autoriza, como es natural, a establecer una analogía formal entre ambas, pero vale la pena recalcar que la riqueza y la variedad de las formas capaces de nacer de manera espontánea en el seno de la materia inerte nada tienen que envidiar a aquellas que se encuentran en los seres vivos. Henri Bergson, en su célebre libro *L'évolution creative*, escribe: «Sólo la experiencia establece que lo más complejo ha podido salir de lo más sencillo por vía de la evolución».

La Termodinámica está gobernada, como se sabe, por dos grandes principios: I. En un sistema aislado la energía permanece constante. II. Se define una función, llamada *entropía*, que sólo puede crecer o permanecer constante en el curso de una transformación que tenga lugar en un sistema aislado. Viene a medir el grado de irreversibilidad del proceso o si se quiere el estado de desorden de un sistema que, si está aislado, es el más probable. Las transformaciones irreversibles, dichas de *no equilibrio*, se caracterizan por un aumento de entropía. La evolución hacia el caos parecen contradecirla los seres vivos. La evolución de las especies y el desarrollo del embrión son dos ejemplos de la tendencia de tales seres vivos a formar estructuras cada vez más y más complejas, volviendo la espalda al segundo principio. ¿Cómo es esto posible? La realidad es que los seres vivos no son sistemas aislados sino *abiertos* que intercambian materia y energía con el exterior. Aun cuando la entropía del sistema no puede disminuir, nada se opone a que una parte de ese sistema evolucione en el sentido de entropía decreciente, mientras que la del sistema global continúa aumentando. Es así como los se-

EL PRINCIPIO DEL DESORDEN

res vivos desarrollan estructuras más y más organizadas sin contradecir el citado principio.

SISTEMAS EN DESEQUILIBRIO

Nada tiene que ver el modelo que utilizó Miguel Ángel (sistema en evolución) con la famosa escultura, conocida como el esclavo, que es una obra terminada (sistema en equilibrio insensible al tiempo). El desequilibrio termodinámico debe ser considerado como un dato permanente del Universo y la premisa indispensable para la comprensión de los vivientes no es más que un ejemplo de organización compleja gobernada por el desequilibrio. En este aspecto los trabajos del premio Nobel, Ilya Prigogine, son esenciales puesto que demuestran que la organización es una consecuencia natural del desequilibrio, cualquiera que sea la naturaleza del sistema considerado. La experiencia de Rayleigh-Benard suministra la aparición de un sistema que no está en equilibrio. Consiste en disponer un líquido entre dos placas metálicas paralelas. Al calentar la inferior se establece un gradiente térmico vertical. Lo más destacable es que según el valor de este gradiente el sistema reacciona de diferente manera. El resultado final es que las corrientes de convección se *organizan* dando lugar a células que forman imágenes más o menos regulares, alcanzándose una configuración conocida con el nombre de *células de Benard*.

El sentido de la rotación de los remolinos que aparecen en el experimento, depende de fluctuaciones microscópicas incontroladas. Ambas posibilidades de rotación, igualmente probables, son estables y simétricas y el sentido de la rotación sólo puede ser modificado mediante una perturbación importante. En Biología, el paso de lo simple a lo complejo se pone bien de manifiesto, por ejemplo, en el desarrollo de las amebas *Dicyostelin Discoideum*. Son organismos monocelulares pero que cuando les falta el alimento se agregan en forma de un organismo multicelular diferenciado. Parece que el proceso depende del metabolismo de un mensajero químico conocido como CAMP que, al faltar el alimento, induce en ciertas células la capacidad de generar indicios de él y en otras el desarrollo de receptores de membrana que les permite percibir ciertas señales.

LAS FORMAS

La naturaleza nos obsequia con facetas que parecen sencillas pero que no son de fácil comprensión. Veamos algunos ejemplos: la simetría del cuerpo humano, la presencia de espirales en las conchas de algunos moluscos o el arrollamiento de los cuernos de una gacela o la forma que presentan algunas galaxias o las que aparecen en algunas reacciones químicas. Apartándose de ciertas concepciones de tipo filosófico, o incluso «mágico», no hay más remedio que acudir, con timidez pero con confianza, a las leyes que gobiernan la Termodinámica y la Cristalografía.

RÁPIDA VISIÓN DE LOS ESTADOS DE LA MATERIA

La Naturaleza se va conociendo tanto mejor cuanto más se profundiza en el estudio de las interacciones entre los elementos que constituyen la materia, la estructura de los sólidos y de los líquidos y las propiedades macrocósmicas de aquéllos.

El vasto dominio de la Química consiste en «jugar» con los electrones situados en las capas exteriores de los átomos para entender la configuración de las moléculas. El orden de magnitud de las energías que se precisa para ellos es muy pequeño, de tan sólo algunos electrones-volt. En el caso del hidrógeno, del agua o el amoníaco, por poner un ejemplo, las moléculas correspondientes son muy sencillas; están formadas por dos, tres y cuatro átomos, pero en las especies biológicas, cada molécula puede contener varios cientos de átomos. Son las interacciones entre estos componentes las que los ligan entre sí, al igual que hace el mortero con las piedras que conforman una construcción las responsables de la estructura de la materia condensada. Son de naturaleza varia, existiendo una relación entre la correspondiente energía y la distancia que separa los elementos componentes. Dos moléculas muy alejadas una de otra apenas interaccionan. Por el contrario, a distancias cortas se repelen y a distancias intermedias se atraen.

El estado de equilibrio formado por dos átomos es aquél en que sus compañeros respectivos distan entre sí una *distancia crítica*. Se concibe entonces que, para un conjunto constituido por un gran número de moléculas, el estado más estable corresponde a un ordenamiento regular en el que cada molécula es situada a la distancia crítica de su vecina más próxima. El estado termodinámico, estable a baja temperatura, es un estado *denso*, en el que los elementos componentes distan entre sí una distancia próxima a su propio tamaño, y donde reina un orden a partir de un *motivo*, que se repite con regularidad a lo largo de tres direcciones.

La difracción de los rayos X, llevada a cabo por Laue en 1912, abrió las puertas de la Cristalografía actual, sobre la que intervino de manera sucesiva la difracción y la microscopía electrónica, y más recientemente el microscopio efecto túnel. Con el microscopio electrónico de alta resolución, es «relativamente fácil» ver directamente los átomos, las moléculas y muchos virus. Hasta no hace muchos años, el norte de los que investigábamos en esa importante rama de la Ciencia, que es la Cristalografía, era conocer el *edificio cristalino* que pronto se vio que estaba lejos de ser perfecto. En sus estructuras existen *defectos* que influyen de manera notoria en sus propiedades físicas y que pueden, y esto es lo más importante, modificarse a voluntad introduciéndolos de manera artificial. Los defectos pueden consistir en *vacantes* (falta un átomo en algún lugar), *intersticiales* (un átomo está en donde no debe), *impurezas* (un átomo extraño se ha introducido en la red cristalina) y *dislocaciones*, que no son *defectos puntuales*, pues se refieren a anomalías que ocurren en los planos cristalográficos.

El orden que reina a grandes distancias en los sólidos cristalinos, se reduce a un *orden parcial* en los líquidos, que son isótropos; es decir, no existen direcciones privilegiadas y las propiedades son las mismas a lo largo de cualquier dirección. Como es bien sabido, el paso del estado sólido al líquido puede lograrse mediante un aporte de calor. El fenómeno inverso, el de enfriar un líquido con rapidez puede conducir a la formación de un sólido *amorfo*, del que el vidrio es un buen ejemplo. Su estructura es desordenada a distancias

SOLIDOS CRISTALINOS

largas y su importancia crece a diario a la vista de sus muchas aplicaciones. El estado amorfo parecía carecer de interés para los físicos, pero investigaciones recientes han permitido encontrar nuevos materiales y nuevas aleaciones que influyen de forma decisiva en la tecnología actual. Habría que describir, si hubiera espacio para ello, otros estados de la materia tales como los *cuasicristales* provistos de simetría de orden cinco, contraviniendo una de las leyes fundamentales de la cristalografía, los *cristales líquidos*, el *plasma*, los *materiales provistos de memoria* y, por fin, *los/raciales*, así como dos características de la materia condensada, los *semiconductores* y los *superconductores*.

Los objetos fractales, que tanto preocupan ahora a los físicos y a los matemáticos, popularizados por Mandelbrot (cuya paternidad se debe al matemático alemán Hausdorff), son un *sistema cuya dimensión no está entera*. Se ha utilizado la costa de Bretaña como ejemplo de desorden, y utilizando un doble-decímetro y un mapa a cierta escala deducir la longitud global de la costa. Empleando mapas a escalas crecientes se pueden afinar más y más los detalles. Si se considera un gran sistema en el que se yuxtaponen diferentes escalas y se proyectan sobre una pantalla, un observador no será capaz de identificar el aumento utilizado. La *autosimilaridad* caracteriza el comportamiento siempre idéntico de una estructura, cualquiera que sea la escala a la que se observa. Pueden servir como ejemplo las gotas de lluvia o la colección de muñecas, tan frecuentes en Rusia, en el que cada una está dentro de otra idéntica pero ligeramente mayor.

Los fractales se caracterizan porque son el *producto de una medida por la escala de medida en una constante*. Además, cuando se pasa, por ejemplo de la escala del centímetro a la del decímetro, el número de centímetros no es diez veces superior al de decímetros, como sucede con un objeto lineal; una regla, por ejemplo.

Los físicos son capaces de conseguir nuevos materiales, llamados *microestructuras*, dotados de sorprendentes propiedades y aplicaciones. La operación es una verdadera *ingeniería material*, análoga a la temida ingeniería genética, pero carente de peligros.

Los médicos identifican «la buena salud» con la ausencia de manifestaciones del cuerpo humano que, *teóricamente*, es un organismo perfecto. Sin embargo, no sucede así, también contiene defectos, mucho más variados que los que aparecen en la materia inorgánica. Los tratan de corregir suministrando fármacos apropiados que, al fin y al cabo, son también defectos que se introducen de manera artificial.

Los *semiconductores*, sin los cuales no hubieran sido posibles los fascinantes logros de la electrónica, son sólidos cuyas propiedades pueden alterarse de forma drástica si se introducen en un seno átomos extraños. Se caracterizan por tener un coeficiente de resistividad eléctrica comprendida en el rango entre conductores y aisladores, y además su valor, lejos de crecer, disminuye con la temperatura. Un semiconductor, cuyas propiedades dependen de la presencia y naturaleza de las impurezas, es un semiconductor *extrínseco*. Reciben el nombre de semiconductores *n*. Ocurre que son los electrones extras de los átomos de valencia de las impurezas los responsables de la conducción eléctrica. La impureza recibe el nombre de *dona-*

dora. Cuando existen vacantes en el material, son los «huecos» que dejan los que, al comportarse como cargas eléctricas positivas, causan la conducción eléctrica. Son los semiconductores de tipo *p*.

Son materiales capaces de conducir la corriente eléctrica sin consumir energía; es decir, en ellos el coeficiente de resistividad eléctrica es prácticamente nulo. El fenómeno fue descubierto por el físico holandés Kamerlingh-Onnes, que lo observó en algunos metales —el mercurio, el aluminio y el zinc, entre otros— cuando se encontraban a temperaturas muy bajas, próximas al cero absoluto. La importancia de esta propiedad es incalculable, y sus aplicaciones en la tecnología podrían alcanzar cotas insospechadas. Es por ello por lo que en el momento actual se investiga febrilmente la posibilidad de obtener superconductores a temperaturas lejos de la del hielo líquido. Se están consiguiendo a pasos agigantados resultados fundamentales, y ya son algunos los materiales que gozan de la superconductividad a la temperatura próxima al la del nitrógeno líquido, mucho más fácil de obtener que el helio en ese estado, cuyo manejo carece de peligro y cuyo coste es cientos de veces menor.

La explicación del fenómeno no es sencilla. En el momento está aceptada la teoría llamada BCS, iniciales de los físicos Barden, Cooper y Schrieffer que la han elaborado. El comportamiento magnético de estos materiales es extremadamente complicado, parece radicar en el hecho de que en ellos los electrones no se mueven independientes, se aparean formando los famosos *pares de Cooper*.

Los físicos suizos Bednorz y Mueller consiguieron el premio Nobel de Física del pasado año de 1987 por su enorme contribución a la posibilidad de conseguir superconductores a temperaturas más altas cada vez.

Como tanto los semiconductores como los superconductores ya han sido tratados por mí mismo en esta revista, no vamos a extendernos más en esta cuestión. No queremos dejar de citar, sin embargo, los esfuerzos que nuestros colegas Alario y Vicent, de la Universidad Complutense, están realizando para «no perder el tren» en este apasionante problema.

SUPERCONDUCTORES