

"No, yo no diría eso", dijo Alicia sintiéndose sorprendida al darse cuenta de que estaba contradiciendo a la Reina.  
 "Una colina no puede ser un valle. Eso es una tontería".

La Reina Roja meneó la cabeza y dijo: "Puedes llamarle tontería si así lo deseas, pero yo he oído tonterías de tal magnitud que ésta resulta ser algo muy sensato si la comparamos con aquéllas".

(L. Carroll, "Alicia en el país de las maravillas".)

# EVOLUCION E IRREVERSIBILIDAD

Desde su aparición, las ideas de Darwin han sido tan atractivas como polémicas. Por algún tiempo se consideró la evolución darwiniana como antitermodinámica. El doctor Manuel G. Velarde, profesor agregado del Departamento de Física de la Universidad Autónoma de Madrid, presenta aquí algunas aclaraciones sobre esta aparente dificultad o más bien malentendido. Con diferentes ejemplos indica cómo las nociones termodinámicas actuales pueden englobar a la noción de evolución biológica. Esta discusión se hace con motivo del centenario de un fundamental, y asimismo polémico, trabajo de L. Boltzmann.



materia aun antes del advenimiento de la Física Cuántica. El trabajo de Boltzmann ha originado también interesantes, y aún no resueltos, problemas puramente matemáticos. La importancia de dicho trabajo, en muy diferentes dominios de la Física, ha sido proclamada recientemente en un congreso de la Sociedad Internacional de Física Pura y Aplicada celebrado en Viena (Austria) del 4 al 8 de septiembre de 1972. En este artículo describimos algunos aspectos de la personalidad humana de Boltzmann, así como situamos sus ideas en el contexto de la ciencia actual, o sea, cien años después de su magistral trabajo.

## El profesor Boltzmann

Ludwig Eduard Boltzmann nació en Viena el 20 de febrero de 1844, y se suicidó, arrojándose al Duino, cerca de Trieste (Italia), el 5 de septiembre de 1906.

Ludwig Boltzmann, al igual que sus hermanos (Albert, dos años más joven que él, muerto de pulmonía siendo niño, y Hedwig, más joven que Albert), fue bautizado en la Iglesia católica.

**E**N 1872 apareció el trabajo de L. Boltzmann, *Weltere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmoleulen* (más sobre el equilibrio térmico de un gas de moléculas). Este trabajo abrió las puertas al entendimiento estadístico de la termodinámica de los sistemas fuera de equilibrio y en particular del segundo principio o principio de crecimiento de una magnitud física denominada la entropía (\*). Dicho trabajo de Boltzmann ha sido asimismo el punto de partida de la teoría de los fenómenos de transporte en gases, líquidos y sólidos. Constituye el primer intento de entendimiento sistemático de los fenómenos disipativos a partir de un modelo atómico, a partir de primeros principios no fenomenológicos. Da fundamento físico definitivo al atomismo como sustrato de la

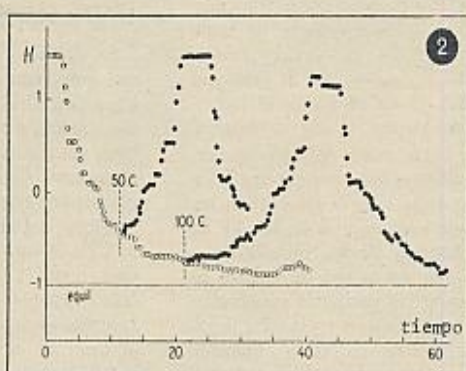
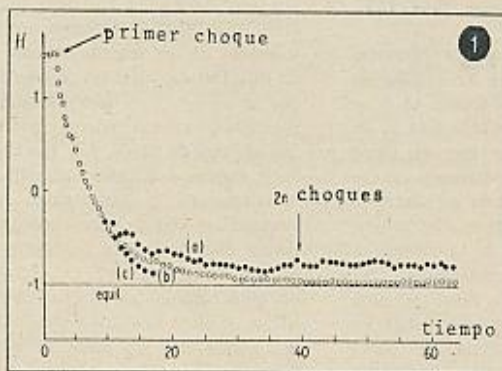


FIGURA 1: IRREVERSIBILIDAD EN UN SISTEMA AISLADO

1. Estudio con un ordenador electrónico de la evolución temporal de la funcional de Boltzmann,  $H$  para un «gas de discos duros» (rodajes de bolas de billar de igual diámetro) en un plano (a) el número total de discos es  $n = 100$ , (b) cuando  $n = 484$ , (c) cuando  $n = 1225$ . Obsérvese que la evolución irreversible hacia el valor de equilibrio es tanto más rápida y pronunciada cuanto mayor es el número de discos considerados, y, en consecuencia, mayor el número de choques moleculares.

2. Efecto de la inversión de las velocidades sobre la evolución temporal de la funcional de Boltzmann. Experimento realizado con un ordenador tomando cien discos duros en un plano (a). Cuando la inversión se realiza después de 50 choques, (b) después de 100 choques.

En ambas figuras (1 y 2) el «gas de  $n$  discos duros» es un sistema aislado, y la evolución es hacia la muerte térmica de «ese universo» (aislado), o sea, hacia su equilibrio termodinámico. Figuras tomadas de A. Bellemans y J. Orban, *Physics Letters*, 24 A (1967), 620.  $H$  es con signo menos y multiplicada por una constante el valor de la entropía termodinámica del gas. El mínimo de  $H$  corresponde, pues, al máximo de la entropía.

(\*) La palabra entropía, introducida por R. J. E. Clausius (1822-1888), puede provenir de las griegas  $\epsilon\tau\rho\pi\eta$  (cambio) o  $\delta\upsilon\tau\rho\epsilon\pi\eta\sigma\iota$  (tendencia al cambio en un sentido). Hay quien simplemente la interpreta como «evoluciones». De esta palabra se ha usado y abusado a placer en muy diferentes campos de la Física e incluso de las Matemáticas. Más aún, el contenido asociado a la misma ha jugado un papel, quizá mágico, para algunos filósofos o pseudofilósofos.

# ILIDAD

confesión religiosa de su madre (aunque sus antepasados fueron protestantes).

La primera enseñanza le fue dada a Boltzmann en su casa por un profesor particular. Después su padre se trasladó de Viena a Wels, y luego a Linz, donde Boltzmann ingresó en el *Gymnasium* (probablemente lo que hoy se conoce como Instituto de Enseñanza General Básica). Allí, Boltzmann dio muestras de gran capacidad, siendo, salvo una vez, el primero de su clase. En Linz, Boltzmann recibió clases particulares de piano del organista y compositor Anton Bruckner (1824-1896). Boltzmann perdió a su padre (muerto de tuberculosis) a los quince años. En 1863 entró en la Universidad de Viena, donde estudió Matemáticas y Física. Obtuvo su doctorado en 1866. Un año después era algo quizá equivalente o un poco más, por la independencia, que profesor ayudante, y ya en 1867 ingresó en el Instituto de Física, creado en 1851 por C. Doppler (1805-1853), algo así como profesor adjunto. Un gran físico, J Stefan (1835-1893), era entonces director del mismo. A los veinticinco años de edad, Boltzmann fue nombrado catedrático de Física matemática de la Universidad de Graz. No obstante, su trabajo en Graz durante cuatro años (1869-1873), que parece ser le fueron muy felices, no fue sólo teórico, sino que hizo labor experimental, resultado de la cual fue una publicación aparecida en 1873. Después, también como catedrático, volvió a Viena (1873-1876) para enseñar Matemáticas. Antes de dejar Graz se casó con Henriette von Aigentler, diez años más joven que él, hija de un juez de Graz. Henriette era, según un nieto suyo, mujer bella, de cabello suave y largo y ojos azules. Tuvieron dos hijos y tres hijas.

Entre las formalidades de la petición de mano, se cuenta que Boltzmann envió una misiva a Henriette, donde se hacía constar el consabido problema de los sueldos en la Universidad y el de la inflación: «El año pasado mi salario fue de 5.400 florines. Tal dinero podía ser suficiente para mantener la casa; sin embargo, teniendo en cuenta el alza de los precios en Viena, no llegará para garantizarte muchas distracciones y entretenimientos».

Boltzmann era más bien grueso, pero no muy alto. De pelo

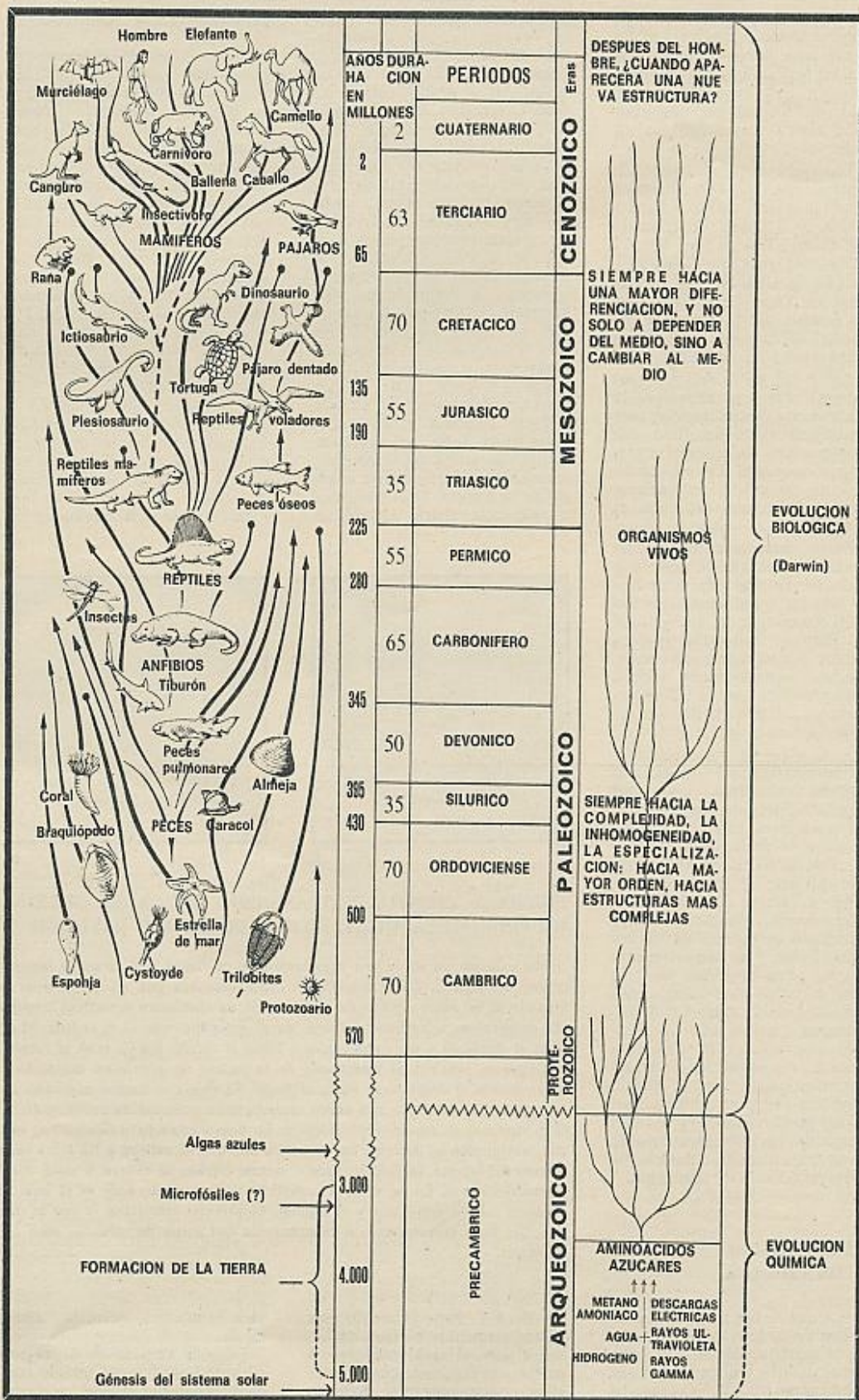


FIGURA 2: ESQUEMA APROXIMADO DE LA EVOLUCION (QUIMICA Y BIOLOGICA)

Signos: ↘ indica la extinción; ↗ indica que persiste la línea hasta nuestros días (según M. Calvin).

tirando a rizado y ojos azules. Un hombre dulce y emotivo, de los de incluso llorar al despedirse por un período largo de la novia, dice un nieto suyo. Al par con ello, en sus cursos, casi nunca o nunca suspendían sus estudiantes.

En Viena fue catedrático de matemáticas (1873-1876), luego en Graz (1876-1889) de Física Experimental y a partir de entonces de Física Teórica en Munich (1889-1893), en Viena (1894-1900), en Leipzig (1900-1902) y, por último, en Viena (1902-1906), donde además dictó cursos de Filosofía, sustituyendo a E. Mach (1838-1916) a su jubilación.

Entre sus publicaciones (unas setenta), hay una colección de conferencias de divulgación sobre problemas físico-filosóficos que bien merecen su traducción a la lengua castellana. En mi conocimiento, no existe, desgraciadamente, ni siquiera traducción ni al francés ni al inglés.

Entre numerosas distinciones académico-científicas, dentro y fuera de Austria, cabe citar que en 1894 fue nombrado doctor Honoris Causa por la Universidad de Oxford. Visitó los Estados Unidos dando numerosas conferencias, llegando hasta incluso California, donde en Berkeley participó en 1905 en una «escuela de verano».

Se dice que fue un excelente y extraordinariamente imaginativo profesor y científico, y que jamás se mostró pedante con sus colegas y alumnos, entre los que fomentaba la discusión y la crítica. Este ardoroso polemista no fue «profeta en su tierra», llegando a hacerse su actitud científico-filosófica bastante radical. La miopía de muchos de sus colegas frente a su temperamento y a su genio científico no hizo sino aislarle. Este aislamiento científico, unido a una salud quebrantada (casi ceguera al final, continuos dolores de cabeza, asma...) y a un exceso de trabajo (investigación a la vez que un elevado número de clases por semana) pueden considerarse como elementos para el entendimiento de su trágica decisión tomada durante un período de vacaciones.

## El atomismo y Boltzmann

Boltzmann fue un ardiente defensor de la descripción atomista de la materia. Frente a él hubo oponentes de gran relieve local, tales como F. W. Ostwald (1853-1932) y Mach. Situémosle en el contexto del atomismo (que en épocas pasadas iba a la par

con el materialismo). En la época «heroica», y como precursor, probablemente el primer nombre relevante sea Tales de Mileto (hacia 624-548 a. de C.), para quien todo lo que hay en el Universo se puede reducir al agua como elemento primario. La tierra proveniría del agua por condensación, el aire por evaporación y el fuego sería una etapa a partir del aire caliente. Por ridícula que pueda hoy parecer al hombre de la calle tamaña teoría, no deja de ser un paso trascendente en la evolución del pensamiento científico (racional). La importancia de Tales de Mileto reside, sin duda, en que eliminó todo elemento mitológico (dioses, etcétera...) de su descripción del Universo, introdujo una hipótesis para explicar otras cosas. Será quizá difícil encontrar un punto tan claro como éste para establecer el nacimiento de la ciencia. Otro precursor es Heráclito (hacia 540-475 an-

Físico-química a partir del siglo XIX.

Entrando ya en el atomismo propiamente dicho, los puntales son Leucipo (hacia 480 a. de C.) y su discípulo Demócrito (murió hacia 361 a. de C.). Para ellos, la materia está constituida por partículas pequeñas e indivisibles (átomos) de diferentes tamaños y formas, siendo, por ejemplo, las de agua redondas y lisas, de modo a no aglomerarse como en el hierro, para el que serían rugosas e irregulares. Hoy, a esos átomos se los denomina moléculas. Epicuro (hacia 341-271 antes de C.) poseía ideas similares. Sus escritos no llegaron directamente a la posteridad, sino a través de un maravilloso poema *De rerum natura*, debido a Lucrecio (hacia 95-55 a. de C.). Assignaba a los átomos movimiento continuo, pequeño en los sólidos y grande en los gases. Ese movimiento se describe hoy mediante lo que se denomina en Fi-

gión, y por varios siglos nadie estudió (o no pudo estudiar sin peligro a perder la vida) las teorías atomistas clásicas. Fue preciso esperar hasta el siglo XVII con el doctor en Teología, sacerdote e incluso profesor de Matemáticas padre Gassendi, (1592-1655), para ver el renacimiento de las ideas de Epicuro (Gassendi publicó una biografía del filósofo griego, así como un panfleto contra las ideas aristotélicas). Para Gassendi, los átomos eran lo primario de la materia. Bolas rígidas de diferentes tamaños, formas y pesos. Con esta hipótesis llegó a explicar la existencia de la materia en sus tres fases: sólido, líquido y gas y sus transiciones. Es el fundador de lo que hoy se denomina teoría cinética (una de las versiones de la Física estadística). Desgraciadamente no se le puede atribuir el descubrimiento de las fuerzas intermoleculares, puesto que para él las combinaciones entre áto-

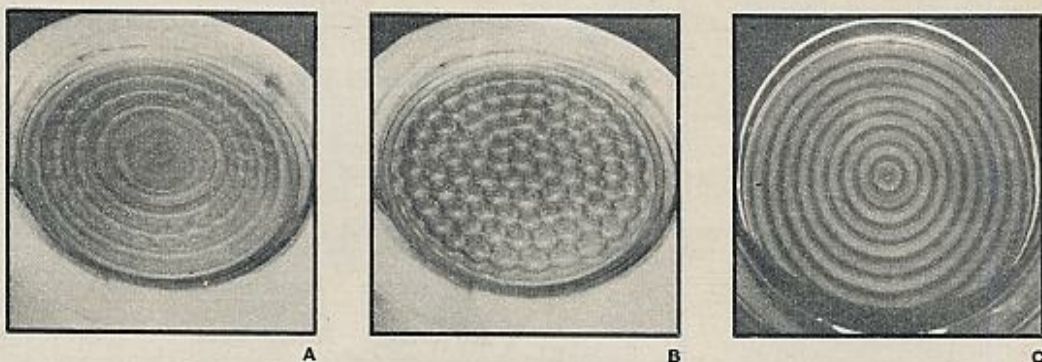


FIGURA 3: EJEMPLO DE TRANSICION «DESORDEN ORDEN» (ESTRUCTURA DISIPATIVA) EN HIDRODINAMICA: INESTABILIDAD DE BENARD RAYLEIGH

Se calienta por abajo una capa horizontal de fluido. Debido a esta interacción con el «exterior», el estado inicial de reposo del sistema pierde estabilidad, experimentando una transición a un estado más «organizado». Esto sólo ocurre a partir de un valor umbral de la diferencia de temperatura vertical. Uno puede pensar las cosas así: Imaginemos una fila de personas apagando un fuego por el procedimiento de la cadena. Al primero le dan un cubo con agua que éste pasa al siguiente y así sucesivamente hasta el último que la echa al fuego. Si damos demasiado de prisa los cubos con agua al primero, el mecanismo de la cadena no puede ser mantenido, y el primero y los siguientes encuentran más cómodo el desplazarse hasta el fuego. Se dice que hemos superado el valor crítico de la cadena de personas en reposo y se establece una nueva estructura de personas en movimiento. En el líquido la cadena estática se refiere al mecanismo de conducción calorífica. La nueva estructura (disipativa) es un movimiento convectivo del líquido. Dicho movimiento se describe en el gráfico 3d., que se refiere a las fotos 3a. y 3b. Las flechas en 3d. indican el movimiento del líquido. La foto 3c, para el mismo líquido, se refiere a unas condiciones externas diferentes dinámica y geométricamente. En 3a y 3b la superficie horizontal superior es el aire. En la 3c es una placa de plástico y hay contacto íntimo entre éste y el líquido. El proceso constituye lo que se denomina un proceso con ruptura de simetría. Las fotos corresponden a experimentos con aceite de silicona, pero se puede conseguir con una taza de café en casa.

tes de C.). Para Heráclito hay cuatro elementos básicos: la tierra, el aire, el agua y el fuego. A partir de combinaciones, entre ellos podría obtenerse todo lo demás. Aunque parezca poco creíble, Heráclito es probablemente el precursor de lo que se llama

sica estadística, recorrido libre medio.

Después vino la época negra. El atomismo fue confundido con el materialismo, y éste, en parte debido al activismo antirreligioso de Lucrecio, confundido desgraciadamente con la antirreli-

mos eran debidas a «enganches», y sus movimientos al deseo divino.

Posterior próximo a Gassendi es R. Hooke (1635-1703), quien explicó la elasticidad (o compresibilidad) de un gas. Intentó describir la relación entre la pre-

# EVERSIBILIDAD

sión y el volumen de un gas (lo que hoy llamamos una ecuación de estado). Daniel Bernoulli (1700-1782) obtuvo la ecuación de estado de un gas y sentó bases firmes a las especulaciones de Gassendi y Hooke. El modelo matemático de Bernoulli es el de un gas de «bolas de billar» (esferas duras), y aún hoy se utiliza en teoría cinética. Después se suceden nombres ilustres, como J. Herapath (1790-1869), J. J. Waterston (1811-1883), J. P. Joule (1818-1889), A. K. Krönig (1822-1879), culminando en Clausius. Algunos de estos científicos no llegaron, desgraciadamente, a publicar sus trabajos tal y como hubieran deseado, y no tienen, por tanto, el crédito que merecen en los libros de Física. Después de Clausius aparecen dos de los grandes pilares de la Física clásica: J. Clerk Maxwell (1831-1879) y L. Boltzmann. Ambos constituyen una etapa de mayor perfección que Clau-

sius, etapa que no ha sido básicamente superada. Grandes detractores del atomismo, ya lo hemos señalado anteriormente, fueron Ostwald y Mach. Mach pensaba que la ciencia ha de buscar relaciones entre observables macroscópicos, y para él el atomismo era una hipótesis de la que se podía prescindir, sirviendo exclusivamente para efectuar cierta economía de

## Sistemas aislados e irreversibilidad (Boltzmann)

pensamiento. Ostwald intentó fundamentar la Química sobre premisas exclusivamente fenomenológicas y macroscópicas (lo que se llama Termodinámica a secas). La necesidad del atomismo como descripción básica de la materia sólo apareció con el advenimiento, en el siglo XX, de la Física Cuántica, sobre una base experimental sólida. Físicos ilustres, como M. Planck (1858-1947) y A. Einstein (1879-1955), entre otros, potenciaron esta última, pero aquí no entraremos en ello, pues nos llevaría muy lejos del propósito de este artículo.

Principios básicos de la Física clásica, y en particular de la termodinámica, son el de conservación de la materia y el de conservación de la energía. En pocas palabras, para un sistema macroscópico, por ejemplo, una vasija que contiene un fluido, un pedazo de sólido..., la materia o energía del sistema sólo puede variar si se añade o se quita del sistema desde el «exterior» al mismo. Otro principio básico de la termodinámica es el de crecimiento de la entropía, y no es un principio de conservación. Supongamos que el sistema macroscópico es un sistema aislado; entonces se postula que el sistema, sea cual fuere su situación inicial, tenderá a establecerse en un estado de entropía máxima. La entropía es una magnitud del sistema, al igual que son magnitudes del sistema la presión, la temperatura, la energía. Conviene recalcar que hemos supuesto el sistema aislado, lo que significa que no intercambia ni materia ni energía con el «exterior». Un sistema aislado es una ficción, pues todo sistema se encuentra rodeado de otros sistemas, pero la ficción puede ser aproximada suficientemente bien en el laborato-

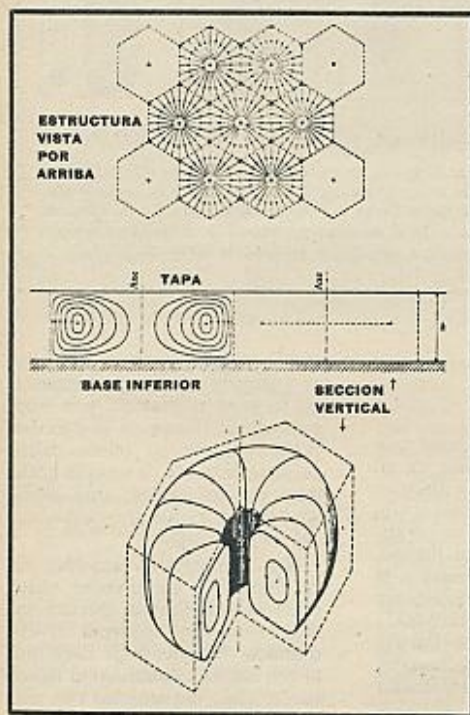
rio y por eso se usa. Si el sistema no se encontrase aislado, sino en contacto con un baño térmico grande cuya temperatura sea T, pero sin intercambiar materia con él, entonces la entropía no es la magnitud física relevante, sino la energía libre de Gibbs,  $G = E - TS$ , donde E y S designan respectivamente la energía y la entropía del sistema. El sistema, en contacto con el baño térmico evoluciona hacia un estado de energía libre mínima, y ese estado define su equilibrio. Así vemos que para ciertos sistemas no aislados su evolución implica una concurrencia entre los valores que tiene su energía y su entropía. Para un sistema aislado cuyo equilibrio viene definido por un estado de su entropía máxima, ese estado es asimismo su estado de máxima homogeneidad o, en otras palabras, de máximo desorden. Por ejemplo, supongamos que un gas en un recipiente sea un conjunto de moléculas y que inicialmente las colocamos en un rincón de la vasija. Dejado el sistema aislado, las moléculas tienden a distribuirse uniformemente en la vasija. El sistema tiende hacia su máximo de entropía. El sistema era inicialmente fuertemente inhomogéneo; cada uno de los puntos de la vasija no jugaba un papel análogo, pues había puntos donde no habíamos colocado moléculas. Cuando el sistema alcanza el equilibrio, la probabilidad de encontrar una molécula es la misma, cualquiera que sea el punto escogido dentro de la vasija. Esto define, «grosso modo», la homogeneidad. Otro ejemplo es el de una barra de hierro calentada por un extremo. La diferencia de temperatura de un punto a otro hace al sistema inhomogéneo. Dejado el sistema aislado, al cabo de un cierto intervalo de tiempo ocurrirá que la parte más fría se ha calentado (por conducción) y la más caliente ha disminuido su temperatura. Por doquier, entonces, la temperatura de la barra es la misma. Es el estado homogéneo. Esta evolución temporal es irreversible. Una vez que el sistema aislado alcanza su estado uniforme, y por tanto de máximo desorden, ya no evoluciona; permanece en ese estado, diciéndose que constituye su estado de muerte térmica. Estas son las ideas fenomenológicas que Boltzmann explicó, basándose en el modelo atomista de la materia, y del que una ilustración mediante análisis de la evolución de un gas molecular con un ordenador electrónico se da en la figura 1.

## Sistemas abiertos y evolución (Darwin)

¿Qué ocurre con un sistema abierto (aquel que puede intercambiar materia y energía con el «exterior»)? Tal es el caso de un ser vivo que recibe la radiación solar, y se alimenta devolviendo materia y energía al exterior. ¿Hacia qué estado evoluciona? Todo sistema vivo tiende a sobrevivir, a adaptarse al medio, a reproducirse, a sufrir mutaciones, y en la medida de una mejor adaptación al «exterior», tanto mejor para el mantenimiento de la especie antigua o nueva. Así podría explicarse la extraordinaria evolución descrita en la figura 2. Estas son las ideas de A. R. Wallace (1823-1913) y C. R. Darwin (1809-1882). El título de un trabajo de Wallace es bien significativo: *On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely from the Original Type* (1858). Estas ideas remontan, en cierto sentido, a las ideas de Tales, y de manera mucho más interesante a Anaximandro (hacia 611-547 antes de C.), pero no haremos historia.

Desde una etapa más bien uniforme (y desordenada), el ser orgánico tiende a crecer, a diferenciarse entre sus partes, a ordenarse, o sea, a hacerse más inhomogéneo, tanto arquitectural (la forma física) como funcionalmente. De modo obvio, hasta ahora los sistemas vivos abocan hacia su muerte como etapa final. Pero esta muerte no tiene nada que ver con la muerte térmica que anteriormente hemos mencionado.

Incluso a escala socioeconómica, la evolución hacia la inhomogeneidad es un hecho trivialmente observable. Pongamos por ejemplo un taller de automóviles. En la época heroica, cada mecánico hacía de todo: primero de recepcionista, luego las reparaciones de pura mecánica, de electricidad; incluso un buen mecánico hacía de tornero, y si el caso llegaba, de chapista y de pintor. ¿Cuál es el panorama que se nos ofrece hoy en un taller? Hay recepcionistas que pueden no ser capaces de reparar lo más elemental de un coche, hay electricistas que pueden no saber lo que es una biela y así, dependiendo del estado evolutivo del taller. Más aún: uno encuentra talleres especializados en una marca u otra de coches. Observamos la evolución desde un estado homogéneo del «mecánico para todo» (todos los mecánicos son equivalentes, y ese estado es un estado de desorden) hacia el «mecánico especialista», cuya mi-



del sistema, al igual que son magnitudes del sistema la presión, la temperatura, la energía. Conviene recalcar que hemos supuesto el sistema aislado, lo que significa que no intercambia ni materia ni energía con el «exterior». Un sistema aislado es una ficción, pues todo sistema se encuentra rodeado de otros sistemas, pero la ficción puede ser aproximada suficientemente bien en el laborato-

sión aparece totalmente diferenciada de la de otro mecánico especialista. La última situación decimos que es un estado de mayor orden termodinámico. Podemos aún entender el desorden y el orden termodinámicos del siguiente modo. Supongamos que en un taller de la época heroica (y, por lo tanto, un sistema homogéneo) uno o varios mecánicos hacen huelga. Esto constituye una fluctuación «local». ¿Se afecta esencial y drásticamente la marcha del sistema? Más bien no. Incluso en el momento en que esa fluctuación tiene lugar, el taller sigue en marcha. Se recarga el trabajo de los demás, pero no hay más; salvo, claro está, si la solidaridad profesional origina la transmisión de la fluctuación, produciendo un conflicto «colectivo». En cambio, supongamos que los electricistas de un gran taller actual originan una fluctuación local, un paro. La perturbación del sistema originada localmente se transmite a todo el sistema debido a la cadena del trabajo especializado. Un coche que precise una reparación global, incluyendo, por ejemplo, todo lo que hay ligado al motor (electricidad comprendida), no puede ser acabado. Hay, pues, tanto más orden termodinámico en un sistema cuanto más afecta al mismo una fluctuación local. Los ejemplos no son siempre lo precisos que uno quisiera, pero las ideas básicas quizá resulten claras.

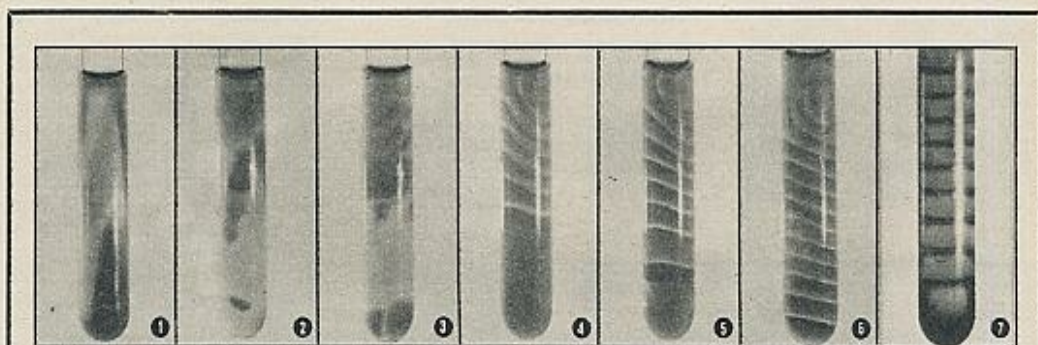
Un fluido homogéneo en reposo es un sistema desordenado. Forzándolo del exterior se puede conseguir que evolucione hacia un sistema inhomogéneo y ordenado. El mecanismo en la figura 3 es un mecanismo físico. Pero lo mismo ocurre si el mecanismo fuese una reacción química, como se presenta en la figura 4. La nueva estructura surge de la lucha entre las fluctuaciones internas del sistema, espontáneas y debidas a la perturbación que viene del exterior, y los mecanismos que en la misma tienden a estabilizar la estructura previa a la perturbación exterior. En los sistemas termodinámicos (como los descritos en las figuras 3 y 4), tales mecanismos estabilizadores suelen ser mecanismos disipativos, como la conducción calorífica, la difusión de la materia..., que son mecanismos que tratan de homogeneizar el sistema. Si la perturbación exterior es suficientemente grande, las fluctuaciones producidas en el sistema abierto pueden llegar a amplificarse enormemente, y en consecuencia la estructura de partida pierde su estabilidad, dando lugar a una

nueva. El problema es que, sobre todo en los sistemas vivos, no siempre la estructura nueva es más ordenada.

Para que en el período subsiguiente a una transición la especie llegue a mantenerse le es preciso adaptarse al medio, y para una especie dada cuando el medio cambia el readaptarse al nuevo medio. La figura 2 es en ese sentido muy significativa, pues vemos cómo la interacción con el medio ha hecho, efectivamente que algunas estructuras desaparezcan, mientras que otras han hecho transiciones a mejor.

nuevas estructuras más ordenadas, y puesto que exigen la participación del exterior y un gasto de energía no recuperable íntegramente, han sido denominadas por Prigogine **estructuras disipativas**. En la teoría de Prigogine se establecen dos criterios complementarios para los sistemas abiertos: uno de **evolución** y otro de **estabilidad**, contrariamente a lo que ocurre con los sistemas aislados, para los que el principio de crecimiento de la entropía hacia su máximo es a la vez un criterio de evolución y de estabilidad.

del otro. En 1905, Boltzmann iba hasta a decir: «En mi opinión, cualquier progreso en la Filosofía hay que esperararlo de las enseñanzas de Darwin». ¿Hay contradicción entre ambas nociones de evolución? Obviamente, no. Sino que hay más bien complementariedad. Esta opinión no era la opinión general en el siglo XIX, ni siquiera en el XX, hasta muy recientemente. Quizá el origen del conflicto aparente entre la evolución biológica y la evolución (irreversibilidad) termodinámica (según el segundo principio en su forma decimonónica)



**FIGURA 4: EJEMPLO DE ESTRUCTURA DISIPATIVA QUIMICA: REACCION DE ZHABOTINSKY**

La primera foto corresponde al estado inicial (casi) homogéneo. Después, en el tubo, se realiza la oxidación del ácido malónico mediante el bromato de potasio en presencia de iones Cerio (Ce). Las horizontales nítidas son líneas de acumulación de iones Ce (3+), y las zonas difusas, de iones Ce (4+). Si se siguen añadiendo elementos iniciales de la reacción, la estructura se mantiene. Pero si se aísla el sistema, entonces, la estructura desaparece, puesto que el sistema tiende a su estado de homogeneidad, o sea, hacia su muerte térmica.

Una causa de diversificación o de desaparición de estructuras biológicas sobre nuestro planeta, invocada por los paleontólogos es la separación de continentes en la Tierra. El cambio del medio externo fuerza al sistema vivo a «adaptarse» y sólo los que se adaptan, lo que superan el cambio, sobreviven. Bien podría pensarse, como L. Leakey (muerto hace unas semanas, en 1972) afirma, que en el caso del hombre el punto determinante de su existencia actual es el inicio de su autodomesticación cuando comenzó a hacer utensilios de acuerdo con una forma fijada. Así creó para su especie aquellos factores necesarios para estabilizar y permitir el progreso de una transición evolutiva. Ese método luego lo utilizó con otros animales que hoy denominamos domésticos.

Es preciso acudir a otros conceptos físicos que la entropía para describir la evolución de los sistemas abiertos, y ello ha constituido el trabajo muy reciente de I. Prigogine (nacido en 1917) y colaboradores. Las

## Darwin y Boltzmann

Es curioso, pues, observar que dos nociones de evolución; de un lado la de los sistemas aislados hacia su muerte térmica (equilibrio), y de otro lado la de los sistemas abiertos hacia su mejora, o sea, en dirección opuesta a la muerte térmica (\*\*), aparecieron casi al mismo tiempo (1859-1872). Más aún, el trabajo de Darwin era bien conocido de Boltzmann, siendo éste un gran admirador

reside en que las ideas de Wallace y Darwin eran muy avanzadas, no ya para la Biología y la Filosofía de su tiempo (a la primera probablemente no puede calificarse seriamente de ciencia hasta muy recientemente), sino incluso para la Física (termodinámica) de su tiempo.

Han sido precisos cien años para empezar a comprender cómo las ideas de Darwin pueden incluirse en un esquema físico-químico. Ni que decir tiene que al retraso ha colaborado el haber identificado darwinismo con materialismo, habiendo sido éste confundido con la antirreligión. Conviene, de paso, señalar que Boltzmann venía a decir que él no negaba la existencia de Dios.

Hablando de Biología, Boltzmann comentaba: «El hombre no tiene el monopolio de la percepción. La analogía entre las sensaciones del hombre y aquellas de los animales superiores es tan perfecta que no podemos menos de asignar existencia objetiva a estas últimas. Pero, ¿dónde está el límite con los animales? De vez en cuando se oyen dudas so-

(\*\*) Durante el período de vida, digamos, de un hombre, este es un sistema abierto; su evolución es, pues, biológica. Es al morir biológicamente que se convierte en un sistema aislado y, en consecuencia, a partir de ese instante evoluciona irreversiblemente hacia su equilibrio termodinámico, su muerte térmica. El problema, pues, de alejar o eliminar la muerte biológica podría pensarse como un problema de «engrasa», reparaciones y, eventualmente, sustitución de «piezas» lo que, hoy por hoy, sólo es del dominio de la especulación.

# IRREVERSIBILIDAD

bre si los insectos o los gusanos, por ejemplo, poseen sensaciones. Desgraciadamente no es fácil, sino imposible, señalar un límite de separación con nosotros. Llegamos finalmente a organismos tan elementales que no podemos sino considerarlos como incapaces de todo pensamiento. Incluso eliminando los procesos mentales, hemos de admitir la existencia de las sensaciones en la materia viva organizada más elemental aunque no pensante. Y entonces aún me parecería injustificado el no aceptar que incluso posea sensaciones la materia orgánica sin estructura. Sin embargo, su Física no llegó a explicar, ni siquiera a esbozar una explicación, de sus especulaciones darwinianas. Sobre los mecanismos biofísico-químicos de la materia, y en particular de los seres vivos, aún nos queda mucho por aprender para que un análisis termodinámico coherente (fenomenológico o estadístico) pueda ser presentado. Ahora bien, parece no haber duda en que finalmente los problemas de la evolución biológica y de su etapa anterior, la evolución química, podrán encuadrarse en un tal análisis, contrariamente a las ideas del siglo XIX. Tampoco las ideas de Boltzmann sobre el atomismo encontraron eco unánime y sí una fuerte oposición en su tiempo. Y entramos así en unos comentarios finales sobre el papel de la ciencia.

## A guisa de conclusión

Cuando se mira una rosa roja o una mujer bella, cuando se experimenta placer o dolor, se siente algo de cuya realidad subjetiva parece absurdo dudar. Hay en ello un valor indiscutible, pero para uno solo. Son algo, digamos, absoluto, pero subjetivo. Suele orientarse la aspiración científica hacia la exteriorización de esos hechos subjetivos, o sea, hacia sacar el conocimiento del círculo estrecho del «yo», del círculo estrecho del «yo momentáneo» para llegar a una comunicación con otros seres análogos o incluso correlacionar nuestro «yo» en instantes diferentes. Así se objetiva o se intenta objetivar lo primitivamente subjetivo.

Al establecer una ciencia, lo que se intenta es dar una tabla organizada según reglas fijadas de antemano (y que depende de la estructura y funcionamiento natural del cerebro humano), de proposiciones objetivas, dejando el posible análisis de su valor absoluto para la especulación filosófica. Se presentan claramente, insistimos, dos actividades opuestas. Una, la de aquellos que rehu-

san sacrificar lo absoluto y que les conduce a una imagen del Universo, que no entiendo cómo pueda ser transmisible a seres análogos, sino únicamente por la fuerza incomprensible de las impresiones religiosas, artísticas o poéticas. La otra es la de aquellos que al sacrificar lo absoluto intentan establecer un acuerdo y un entendimiento en la zona de lo accesible. El método es el razonamiento matemático en Física; por ejemplo, estableciendo correlaciones entre hechos experimentales, hipótesis o leyes que ligan finalmente números unos a otros resultados de medidas. Es el dominio de la forma lógica: «Formas enchufadas unas en otras, formas y formas de estas formas en proceso inacabable en que se busca lo cuantitativo de que brotan las cualidades», como decía ¡Unamuno! Científicamente, la altura de una catedral no es algo profunda y solemnemente sentido, sino que se mide en metros y centímetros. La duración de una vida no se mira como la huida del tiempo, sino que se cuenta por años y días. Resulta así el mundo científico un mundo estrecho, parcial, claramente limitado, desprovisto de toda impresión sensible, de toda verdad absoluta. Pero esta concepción tiene una ventaja sobre aquella de lo absoluto, y es que es transmisible sin ambigüedad. Esto es, es «objetiva».

Ya claramente Boltzmann decía: «La teoría no es sino una imagen de los fenómenos naturales y que obviamente corresponde como un signo al objeto significado». «No se debe en modo alguno cegar uno sobre las imágenes tratando de ver en ellas los hechos. Toda teoría conduce a este obstáculo cuando se explota abusivamente». «Las estrellas no se adaptan a leyes que les fijamos, sino que aprendemos de ellas según las reglas de nuestra mente (cerebro)». «Quizá la hipótesis atomística será reemplazada un día por otra hipótesis, diferente quizá, pero probablemente no». ■ MANUEL G. VELARDE. Departamento de Física. Universidad Autónoma de Madrid.

Con placer agradecemos al profesor I. Prigogine, de la Universidad Libre de Bruselas, el haber nos suministrado las fotos de la figura 4. Asimismo, al profesor E. L. Koschmieder, de la Universidad de Tejas, en Austin, por las de la figura 3, y al profesor M. Calvin, de la Universidad de California, en Berkeley, por el permiso para reproducir la figura 2. Parte de las reproducciones han sido hechas por gentileza de las compañías Vistabella y Arte Industrial (Pérez-Vaquero), ambas de Madrid.

# La Capilla Sixtina

## FELIZ AÑO NUEVO

Ha pasado unos días en España Menelao el Aeropagita. Me ha dicho que las cosas se les ponen mal a los humanistas en Estados Unidos. Los presupuestos de las Universidades se destinan, sobre todo, a los departamentos de investigación científica y tecnológica ligados al esfuerzo bélico. En cambio, se reducen las asignaciones para «humanidades» o «ciencias sociales».

—El sistema ha descubierto que estas disciplinas sólo les proporcionan críticos o desgastados históricos. ¿Por qué ha de nutrir a sus propios termitas?

Los profesores también empiezan a ser víctimas de esta nueva lucidez del «establishment». En general se va a reducir en un 20 por 100 el profesorado destinado a las disciplinas impugnadas. Esta disminución ha provocado un cierto pánico profesional, y los profesores se pasan el día escribiendo a las Universidades de todo el país para garantizarse un puesto en el próximo curso.

—Y tú, ¿vas a tener dificultades?

—Todavía no. Los exiliados griegos aún despertamos cierta expectación. Los americanos nos utilizan como un justificante para vivir.

—No te entiendo.

—Sí, hombre. Cada vez que ven a un exiliado de las Grecias de este mundo, le miran con cara conmisericordia y exclaman: «Gracias, Dios mío, por no haber nacido griego».

—No me creo demasiado este argumento. Entonces estarían contentísimos ante las minorías negras, o la de hispanoparlantes. También podrían decir ante un negro: «Gracias, Dios mío, por no haber nacido negro».

—Es que los negros no están de paso.

Menelao dice que la democracia americana camina hacia el fascismo si no se frena el poder político de Nixon y compañía.

—Bueno. Aunque se frene a Nixon, el fascismo es irremediable para un sistema poderosísimo y que cada vez más se va a mover a la defensiva en el mundo entero.

—¿Y qué harás tú, pobre Menelao, cuando el fascismo te siga hasta los Estados Unidos?

—Volveré a Grecia. Fascismo por fascismo, prefiero el de mi casa. No toleraría el «Heil Hitler!» en inglés.

Menelao estaba en plena forma, como ustedes mismos han podido deducir. El hombre ya tiene programa histórico para rato. Incluso para siempre. Yo le he informado de la fiebre de fuga al extranjero que se ha desatado en España.

—¿Ha llovido mucho este año?

—Sí, ha sido un año oscuro y lluvioso.

—Es el clima. Un español no puede soportar los días grises. Ya verás. En cuanto llegue la primavera, los fugitivos presuntos se reconciliarán con el país y de aquí no se mueve nadie.

Menelao me ha explicado su plan de supervivencia para los veinte años aproximados que le quedan de vida. Augurar en los países de democracia formal que queden hasta la primavera, y en verano viajar hacia los países del Sol.

—Por las realidades históricas hostiles hay que estar de paso, de vacaciones, querido Sixto, y el resto del año marcharte a las placentas propicias.

Pasamos juntos la noche de Fin de Año. Menelao se pasó horas hablando de la influencia del «marketing» en todas las manifestaciones de la vida norteamericana, incluso en el seno de la política «contestataria». Hablábamos de comunicación y soledad de las masas sin hacer mucho caso de los prolegómenos de las doce campanadas. Pero al sonar la primera, tanto él como yo hemos comido las uvas protocolariamente. Después, en el restituido silencio, Menelao se ha secado una lágrima furtiva, y me ha deseado un feliz año 1973.

—Que también sea feliz para ti, Menelao.

Ha sido entonces cuando se ha quitado la máscara anímica, ha dado un puñetazo sobre mi pobre mesa camilla y ha gritado:

—¡Este será nuestro año, Sixto! ¡Sal al balcón! ¡Escúltala la noche! ¡Han brotado las incontenibles flores de la libertad!

—¿Cavafis? ¿Seferis? ¿Nazim Hikmet? ¿Ginsberg? ¿Ferlinghetti?

—Mío.

Me ha contestado un Menelao definitivamente derrumbado.

## SIXTO CAMARA