Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

ESTRUCTURAS DISIPATIVAS Y EVOLUCION

Por Manuel G. Velarde

Manuel G. VELARDE, nacido en Almería en 1941, es Profesor de *Mecánica Estadística* de la Universidad Autónoma de Madrid y Profesor invitado (1976-78) de la Universidad de Marsella. Como becario de la Fundación Juan March trabajó con Ilya Prigogine, Premio Nobel de Química en 1977 por sus trabajos sobre la interpretación termodinámica de la evolución química y orgánica.

1. De la Biología a la Física

NO HAY RAZON para pensar que los sistemas biológicos escapen a las leyes de la Física y de la Química, y si a veces nos parece que no se rigen por ellas es porque, a buen seguro, ambas ciencias precisan ser ampliadas. Significa ello que quizá haya aún que descubrir nuevas leyes o inventarse nuevos conceptos o nuevas formulaciones en Física o Química para poder entender lo que se nos escapase de la Biología. Apañados estaríamos si los seres vivos

---

* BAJO la rúbrica de «Ensayo» el Boletín Informativo de la Fundación Juan March publica cada mes una colaboración original y exclusiva de un especialista sobre un aspecto de un tema general. Anteriormente fueron objeto de estos ensayos temas relativos a la Ciencia, el Lenguaje, el Arte, la Historia y la Prensa. El tema desarrollado actualmente es la Biología.

En Boletines anteriores se han publicado: *Control electrónico del cerebro*, por José M. Rodríguez Delgado, Director del Departamento de Fisiología de la Universidad Autónoma de Madrid; *Bioquímica de la nutrición*, por Francisco Grande Covián, Director del Instituto de Investigación de Bioquímica y Nutrición «Don Juan Carlos I-Fundación Cuenca Villoro»; *Las fronteras de la Ecología*, por Ramón Margalef, Profesor de Ecología de la Universidad de Barcelona; *Alteraciones del desarrollo cerebral*, por Federico Mayor Zaragoza, Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad Autónoma de Madrid; *La bioconversión de la energía solar y la crisis energética y alimentaria*, por Manuel Losada, Catedrático de Bioquímica de la Universidad de Sevilla; *Aspectos biológicos del abuso de drogas*, por Josep Laporte, Catedrático de Terapéutica y Farmacología Clínica de la Universidad Autónoma de Barcelona; *Evolución y Darwinismo*, por Francisco J. Ayala, Profesor de Genética de la Universidad de California en Davis: *La genética del cáncer y los virus*, por María Luisa Durán-Reynals, Profesora de Patología del Albert Einstein College de Nueva York; *El origen de la vida*, por Juan Oró, Profesor de Bioquímica de la Universidad de Houston; *La genética de poblaciones*, por Antonio Prevosti, Catedrático de Genética de la Universidad de Barcelona; *Los enzimas, agentes de la vida*, por Alberto Sols, Catedrático de Bioquímica de la Universidad Autónoma de Madrid; *Evolución de los conceptos biológicos*, por Antonio García-Bellido, Profesor de Investigación del C.S.I.C.; y *Ecología Molecular y antagonismo microbiano*, por Carlos Asensio, Profesor de Bioquímica de la Universidad Autónoma de Madrid.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

no pudiesen estudiarse como una fase termodinámica más de la materia.

Pero la reducción de la Biología a la Física y Química, y la descripción de sus leyes mediante la Matemática, no supone conflicto alguno. Porque no siendo necesariamente el todo la suma de las partes, cabe bien imaginar que los sistemas biológicos, sistemas muy complejos, posean leyes funcionales, cualitativas y cuantitativas, no directamente extrapolables del conocimiento de las leyes de las partes. La «cosa vital» y su funcionamiento, etc. corresponden a un estado *sinergético* del sistema y su nivel descriptivo está por encima del nivel de la descripción de las partes; el asunto se parece muchísimo a lo que ocurre con algunos sistemas fisicoquímicos, sin relación alguna con la Biología, y que tienen funcionamiento cooperativo, tales como el ferromagnetismo, la superconductividad, la convección hidrodinámica, la turbulencia, el sincronismo puramente fisicoquímico, etc.

2. Sistemas aislados y sistemas abiertos

Principios de la Física, y en particular de la Termodinámica clásica son el de conservación de la materia y el de conservación de la *energía*. Nada se crea, nada se destruye, sino que se transforma. Otro principio es el de crecimiento de la *entropía* o principio de la degradación de la energía y de la evolución temporal irreversible de los sistemas aislados, o sea de aquellos que no intercambian ni materia ni energía con el «exterior». Mecanoestadísticamente este principio es un principio de desorganización progresiva. En un sistema aislado la evolución es hacia la homogeneización de sus partes, hacia su entropía o desorden máximos, hacia su «muerte térmica». Una barra de metal inicialmente calentada por uno de sus extremos, dejada evolucionar libremente, tenderá a tener la misma temperatura por doquier (*grosso modo* ello ocurre en un tiempo en segundos inferior a cien veces su longitud medida en centímetros): la parte fría se ha calentado y la caliente se ha enfriado, alcanzando toda la barra una misma temperatura (que *no* es la media de las dos inicialmente extremas); es el estado de «muerte térmica» y no hay posterior evolución a partir de ese equilibrio termodinámico. ¿Qué ocurre, sin embargo, si el sistema no se deja aislado sino en contacto intenso con su «exterior», por ejemplo, sometiendo la barra continuamente a un fuerte calentamiento? ¿Qué ocurre con un sistema que recibe materia del exterior y la transforma para después echarla degradada al exterior?

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

Intentar una explicación con conceptos y leyes propios del equilibrio o de la vecindad del equilibrio sería seguir lo que Whitehead llamaba la «Fallacy of Misplaced Concreteness». Y desgraciadamente esa norma ha imperado durante casi un siglo en la aplicación de la Termodinámica a los sistemas biológicos.

Cuando un sistema puede intercambiar materia o energía en cantidades grandes con su «exterior», las cosas pueden suceder de diversas maneras. El sistema puede resistir en su «estado», deteriorarse drásticamente o evolucionar a formas «mejoradas». Por de pronto, si el intercambio no es de materia sino sólo de energía, el estado de equilibrio no viene dictado por el máximo de su entropía sino por el balance o competición entre su entropía y su energía interna, a la temperatura en que se realiza el intercambio energético. Tal ocurre con los cristales que se suelen formar a «bajas» temperaturas, frente a los plasmas o gases que suelen corresponder a las «altas» temperaturas donde la parte entrópica domina el equilibrio. Pero aun eso sólo es cierto cuando el intercambio con el «exterior» es débil. Pues si el intercambio es fuerte, de energía o de materia (entrada o salida de reactantes, etc.) o bien, si dentro del sistema hay procesos violentos (autocatálisis, saturación, retroalimentación, etc.) el asunto no es fácil y la predicción sólo es realizable en contados casos. Es el dominio de los procesos muy alejados del equilibrio para los que una teoría general no existe aún. Tal es el caso, termodinámicamente hablando, de los sistemas biológicos, de los seres vivos, y por tanto de la evolución biológica; en tanto que proceso fisicoquímico.

En los procesos fuertemente disipativos o muy alejados del equilibrio que pueden ocurrir en los sistemas abiertos (un ser vivo recibe luz solar, se alimenta, defeca, etc.) nuestra imagen intuitiva carece de perspectiva, pues los *valores medios*, característicos de la propia definición del «equilibrio termodinámico», dejan o pueden dejar de ser relevantes, es decir, pueden ser menos relevantes que sus propias desviaciones, sus «errores», haciéndose la caracterización de estos «errores», de las fluctuaciones de las variables fisicoquímicas, el objeto científico esencial e instrumental de la descripción. Hablar de fluctuaciones, de errores, etc. es hablar de *azar* y lo que decimos equivale a afirmar que el *azar* puede ser primordial en la descripción de un sistema abierto frente al *determinismo* y la evolución clásica de los sistemas aislados. ¿Es posible la evolución hacia formas y funciones «mejoradas», más ordenadas... mediante el azar? Esta es la pregunta que muchos científicos se han planteado a lo largo

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

de la historia de la Humanidad, con poco éxito, sin embargo, de una formulación científica coherente, hasta la última década (los setenta del siglo XX) gracias al trabajo revolucionario, científicamente hablando, de Ilya Prigogine, premio Nobel de Química 1977. El punto de partida de Prigogine (ya en 1945) es que un sistema abierto pudiera muy bien evolucionar disminuyendo su entropía, sin por ello contradecir el segundo principio de la Termodinámica antes enunciado. Para ello es preciso que el intercambio de entropía del sistema con el «exterior» sea negativo; es decir que si admitimos que el sistema y su exterior forman un nuevo sistema *aislado*, entonces el «exterior» se desordena. Por lo que decía Schroedinger en su libro *¿Qué es la Vida?*: un sistema abierto, un ser vivo, existe y *vive* de negaentropía (de entropía negativa). De todos modos cualesquiera que sean los procesos en el «interior», es decir en el propio sistema, estos procesos producen entropía. Guárdese el lector de caer en la trampa —en que muchos científicos, metidos a filosofar, han caído en el siglo XIX y aun en el XX— de considerar que tales argumentos cabe extrapolarlos a todos los seres vivos y luego al Universo, como sistema aislado, y que de ahí se concluya que el Universo, si fuese un sistema aislado, evoluciona hacia su muerte térmica; porque tal extrapolación es metafísica y no consecuencia de los principios de la Termodinámica.

Los esfuerzos de Prigogine y colaboradores, desde 1945, han consistido en evaluar el ritmo de producción de la entropía en los diversos sistemas abiertos: ¿mínimo? ¿máximo? Son las primeras preguntas que, por analogía con la mecánica, se hacen en termodinámica y, por analogía de la termodinámica de equilibrio, en la de los sistemas abiertos alejados del equilibrio. Experimentalmente (Trincher, 1965) se ha podido observar que en las etapas de crecimiento, de ordenamiento, el ritmo de producción de entropía, de gasto energético, de disipación, etc., no era mínimo y ni siquiera constante, sino variable con el tiempo, mientras que en etapas de vida *estacionaria* era mínimo. Fue el primer gran logro de Prigogine, pues la predicción teórica era anterior a los trabajos experimentales en un momento en que no se soñaba en la real utilidad de la termodinámica, antes por el contrario se la daba por incompatible con el entendimiento de la vida y de la evolución de los seres vivos. Desde entonces (1945), se ha recorrido un gran trecho sin que, insistimos, haya una teoría termodinámica bien establecida y completa. Pero algunos aspectos del crecimiento y de la evolución de los sistemas fisicoquímicos abiertos se han entendido y sobre ellos tratamos en las secciones que siguen.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

3. Estructuras disipativas y relojes biofisicoquímicos

Formas espaciales, geométricamente estructuradas, en sistemas reactivos, así como oscilaciones temporales de las concentraciones de reactantes eran ya conocidas en el siglo pasado, tras los trabajos de F. Runge (1855), R. Liesegang (1898) y otros. Su correlación con la biología y los procesos vitales ya fue pioneramente establecida por, al menos, S. Leduc y H. Benard a principios de nuestro siglo, e incluso por Lord Rayleigh (1917), aunque este último, menos metafísico que los otros, no comentó sobre la eventual transcendencia del asunto, a pesar de haber sido junto con Lord Kelvin (1854) quien inició el desarrollo de la termodinámica de los procesos disipativos fuera del equilibrio.

Más tarde, W. Bray (1921) puso de manifiesto que en un cierto proceso reactivo había oscilaciones temporales de los reactantes y atribuyó su origen a mecanismos de autocatálisis. Sin embargo, todavía en 1968 se hacían esfuerzos para achacar las oscilaciones a causas ajenas a la dinámica del proceso químico. Y, además, ¿cuántos químicos o electroquímicos no siguen, aún hoy día, dejando de lado resultados de laboratorio (esporádicos o no) si lo que aparece no son valores estacionarios, cuasiconstantes de las variables en consideración? Más recientemente, ya en 1958, Belusov descubrió que en el proceso reactivo de bromato potásico, sulfato cérico y ácido cítrico, en ácido sulfúrico diluido, la razón de las concentraciones del ión cérico (Ce-4+, amarillento) a ceroso (Ce-3+, incoloro) variaba rítmicamente en el tiempo, constituyendo un auténtico reloj químico. Después Zhabotinskii (1964) puso de manifiesto que lo mismo ocurría si se cambiaba el ácido cítrico por malónico, bromalónico o análogo; e incluso si el Cerio se substituía por el Manganeso u otro catalizador. Tras éstos ha habido numerosos experimentos destinados a ilustrar la gama amplia de estructuras espaciales temporales o espacio-temporales (ondas de concentración, etc.) que pueden obtenerse en reacciones suficientemente fuera de equilibrio (en ocasiones violentamente como en procesos de deflagración o combustión). Como ilustración, en el pie de la fig. 2 (pág. 11) se da el protocolo de la reacción de Belusov-Zhabotinskii.

Teóricamente se demuestra que, en el caso de una reacción química, sin catálisis, toda variación espontánea de la afinidad (cuyo valor dirige el progreso de la reacción) implica una variación de igual signo en la velocidad de la propia reacción; de modo que el sistema busca necesariamente el equilibrio o una prolongación del mismo. Es la consecuencia del principio de moderación de Le Chatelier-Braun-De

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

Donder. Pero si acaso hay autocatálisis, por ejemplo, cabe una oposición en los signos de dichas variaciones. Y esto es lo que nos acerca termodinámicamente a la biología, más que otra cosa. Porque los ciclos biológicos suelen comportar autocatálisis. En el ciclo de la respiración, de la glucólisis,... para fabricar ATP-substancia que permite a la célula acumular energía, es preciso disponer de ella al principio y ella ayuda a generarse. Los ciclos biológicos se realizan claramente a gran distancia del equilibrio termodinámico. Por eso el alejamiento del equilibrio cabe concebirlo como una fuente de posible ordenamiento arquitectónico (forma) o funcional del sistema físicoquímico o biológico.

En esta sección vamos a comentar las diversas posibilidades fenomenológicas de coherencia y cooperatividad o sinergesis en un modelo sencillo de sistema reactivo abierto y funcionando muy alejado del equilibrio. Su «realismo» no es aquí la cuestión, pero lo que sí importa es que contenga algunos de los elementos más básicos, corrientes y relevantes de un sistema biofisicoquímico. Estos van a ser: (i) autocatálisis, que en el caso más sencillo sería un paso de reacción $X + Y \rightarrow 2X$ entre dos reactantes X e Y; (ii) saturación que obedezca a la forma más sencilla de Michaelis - Menten; es decir una velocidad de reacción del tipo $X/(1+qX)$, donde q es un parámetro que da una idea de la potencia de la saturación. Variar q puede significar que tomamos otro enzima en otra vasija; y por último (iii) tanto X como Y pueden difundirse, ir de un punto a otro de la vasija de reacción.

Un esquema *global* que involucre esas características, podría ser el siguiente:

$$A \longrightarrow Y \qquad (a)$$

$$X + Y \longrightarrow 2X \qquad (b)$$

$$X \xrightarrow{\text{enzima}} P \qquad (c)$$

donde A y P se consideran productos cuya concentración mantenemos constante; por eso el sistema es abierto porque continuamente suministramos A desde el exterior y retiramos P. El alejamiento del equilibrio viene claramente expresado porque sólo consideramos pasos de reacción que proceden de izquierda a derecha, sin reversibilidad (estamos de hecho suponiendo un proceso *infinitamente* alejado del equilibrio).

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

En un tal proceso global nos preguntamos: ¿qué puede ocurrir? Puede ocurrir que el sistema evolucione a partir de unas concentraciones iniciales de A, X y P hacia un estado estacionario. No podrá ir a un estado de equilibrio por la restricción que hemos hecho de los sentidos en los pasos de reacción. Efectivamente, un posible estado estacionario es el que corresponde a $Y_0 = 1-qA$ y $X_0 = A/Y_0$ y que además es homogéneo (las concentraciones X_0 e Y_0 son las mismas por doquier en la vasija) y además como estado homogéneo es único (el lector puede encontrar los detalles matemáticos en las referencias del autor). Pero ¿es este estado estacionario homogéneo, único, estable frente a cualquier perturbación externa (variaciones de A) o fluctuación espontánea interna (variaciones de X e Y)? La respuesta es negativa.

En efecto, perturbando A o q (es decir fijado A u observando otra vasija de reacción con otro enzima que se rija por una forma cuantitativamente distinta de la misma ley de saturación) resulta que el proceso puede conducir: (i) a estados estacionarios no homogéneos de modo que la distribución espacial en la vasija de reacción de las concentraciones de los reactantes X e Y, forma una estructura geométrica bien definida: es el caso de la *estructura disipativa espacial.* La figura 1 (pág. 10) ilustra gráficamente el fenómeno que cualitativamente da una idea de lo que ocurre en la reacción de Belusov - Zhabotinskii (fig. 2, pag. 11); (ii) otra posibilidad es que el proceso (a), (b), (c) conduzca, no a un valor estacionario (constante) de las concentraciones de X e Y, sino a variaciones temporales periódicas de las concentraciones de dichos reactantes, con un período bien definido. Estamos entonces en el caso de oscilaciones temporales de un reloj biofisicoquímico mantenido, porque siendo el sistema abierto al exterior, aportamos continuamente el producto A para que el paso (a) del proceso reactivo pueda seguir desarrollándose indefinidamente. Tales relojes se denominan *ciclos límites* del proceso o del sistema y son ejemplo de *estructura disipativa temporal.* La figura 3 (pag. 12) ilustra gráficamente el fenómeno; (iii) la tercera posibilidad es que el proceso dé lugar a una distribución espacial geométricamente bien definida, pero con concentraciones que a su vez oscilan en el tiempo con período bien definido. Es la *estructura disipativa espacio-temporal.* Para sistemas en los que sólo hay dos reactantes intermedios relevantes, X e Y en nuestro caso, sólo son posibles estados estacionarios o fenómenos de período bien definido en el tiempo. Si hubiese tres o más reactantes intermedios, cabría asimismo un funcionamiento *caótico* del proceso. Cuando el comportamiento es coherente, organizado, es interesante

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

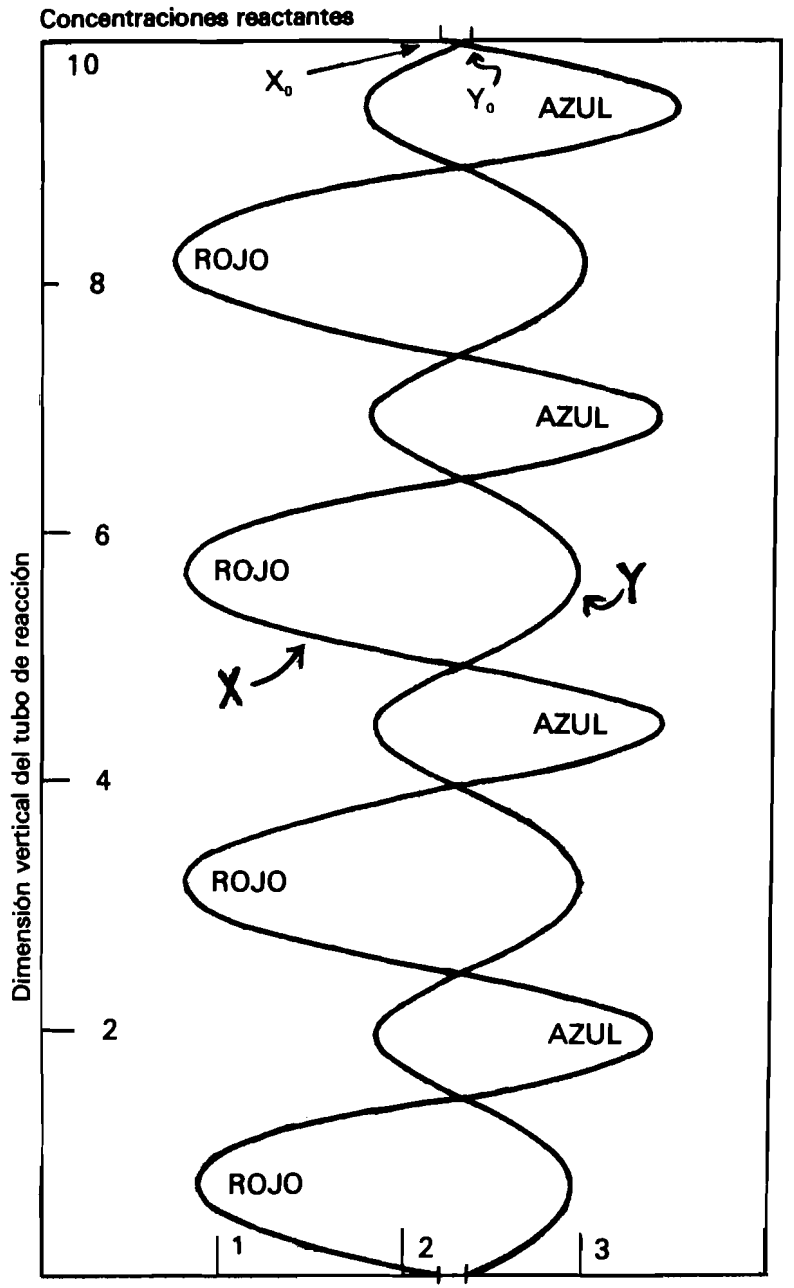

Fig. 1.—Estructura disipativa espacial del proceso reactivo (a) (b) (c) en un tubo de dimensión 10 (en unidades arbitrarias). Cada curva da la variación de la correspondiente concentración a lo largo de la vertical. Por analogía con la reacción de Belusov-Zhabotinskii hemos puesto rojo/azul alternativamente, según los valores alternativamente grandes/pequeños de las concentraciones de X (o Y). Nótese que cuando X es máximo, Y es mínimo y viceversa. (Véase Ibáñez, Fairén y Velarde-1976.)

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

retener que el reactante A se añade desde el exterior al sistema de manera incoherente, diríamos aleatoria, y sin embargo el sistema lo recoge para organizarse, para establecerse en un modo de funcionamiento colectivo y sinergético.

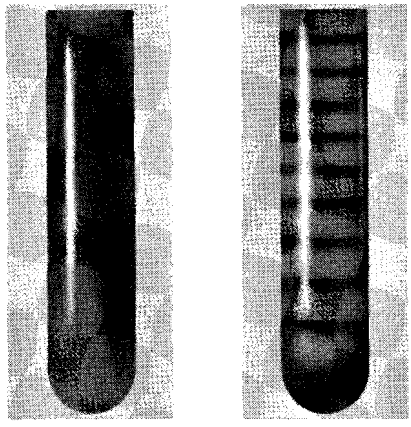

Fig. 2.—Reacción de Belusov-Zhabotinskii.
En un tubo de ensayo de unos 50 ml. de capacidad que se mantiene agitado continuamente (con un agitador magnético por ejemplo) se añaden secuencialmente: (a) 5 ml. de $(SO_4)_2$ Ce- 0.004 M, (b) 1 ml. (aproximadamente) de ferroina, un indicador *redox* cuya labor es poner de manifiesto la presencia de exceso de Cerio-4+ (condiciones oxidantes) mediante coloración azul o en su caso la de Cerio-3- (condiciones reductoras) mediante coloración rojiza. (c)5 ml. de Br O_3 K - 0.35 M, y (d)5 ml. de $CH_2(COOH)_2$-1,2 M. Tras veinte minutos a media hora de agitación vigorosa y continua, se observa el *ciclo límite* del proceso: cambios globales de coloración azul a rojiza, etc. Es la *estructura disipativa temporal* con un período del minuto. De dicho tubo se extraen, entonces, unos 2 ml. de la disolución homogénea y se echan en un tubo lo más delgado posible, tubo que conviene tener en un baño María (a unos 21º C) y en absoluto reposo. En este tubito se verá la formación de bandas horizontales alternativamente anchas (rojizas) y delgadas (azules). La anchura del conjunto rojo y azul es característica de la periodicidad del fenómeno de la *estructura disipativa espacial*. En la figura la imagen de la izquierda es la fase desordenada (inicialmente homogénea) frente a la imagen final, a la derecha, ordenada, estratificadas las concentraciones y que es la fase heterogénea que, de seguir añadiendo los reactantes continuamente, permanecería indefinidamente según está. Agradezco a mis estudiantes José L. Alonso Castellano y Félix Pariente Alonso el haberse prestado a realizar la preparación de esta reacción como ejercicio de examen de la asignatura de Biofísica (1976), de donde tomé este protocolo.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

Ahora cabe preguntarse: ¿cuándo y bajo qué condiciones se da una u otra estructura disipativa?; y una vez dadas, ¿son o no estables?, ¿en qué rango de fluctuaciones de A, X e Y son estables?; e incluso, dado un reloj biofisicoquímico, un ciclo límite, para el enzima q_1, ¿dará lugar el enzima q_2 también a un comportamiento temporal periódico para los mismos valores de A y P? De nuevo el problema demanda el estudio de la estabilidad del reloj frente a perturbaciones externas (A) y frente a variaciones (fluctuaciones) espontáneas de las concentraciones de los reactantes X e Y. Entonces, podría ocurrir que pudiésemos desestabilizar un ciclo límite dado, de modo que el proceso tomase otro comportamiento como otro ciclo límite, o una estructuración espacio-temporal diferente, y así mediante transiciones, unas después de otras, fuese evolucionando. Si al final de una serie de transiciones el

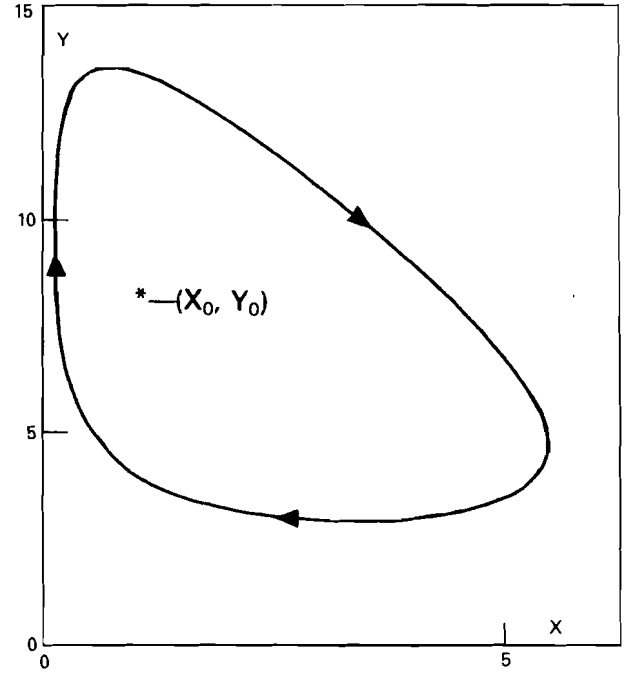

Fig. 3.—Ciclo límite o reloj químico del proceso reactivo (a) (b) (c). Si se dan X e Y valores próximos a los de la curva cerrada (sea por dentro o por fuera) al cabo de un tiempo más o menos corto el proceso sigue la curva cerrada y no sale espontáneamente de ella en lo que sigue. El tiempo de recorrido del ciclo define el período del reloj que en el caso de la reacción de Belusov-Zhabotinskii es del minuto. Tenemos, pues, un reloj que en vez de dar una hora en cada vuelta da del orden del minuto. (Véase Ibáñez, Fairén y Velarde-1976.)

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

sistema *recordase* las etapas intermedias o su situación inicial, entonces tendríamos una forma primitiva de *código genético* del mismo.

Por eso, en la sección siguiente pasamos a ocuparnos de las fluctuaciones y del papel del azar en una transición vía inestabilidad.

4. Ordenamiento a través de fluctuaciones: complementariedad entre azar y necesidad

> «I am inclined to look at everything as resulting from designed laws, with the details, whether good or bad, left to the working out of what we may call chance. Not that this notion *at all* satisfied me. I feel most deeply that the whole subject is too profound for the human intellect».
>
> (C. Darwin, carta a Asa Gray, 22 mayo 1860).
>
> «I cannot think that the world as we see it is the result of chance; and yet I cannot look at each separate thing as the result of Design... I am, and shall ever remain, in a hopeless muddle.»
>
> (C. Darwin, carta a Asa Gray, 26 noviembre 1860).

¿Qué es lo que hace que un sistema desordenado, abierto e interactuante con su exterior, sede de procesos autocatáliticos, de saturación, etc. de pronto, inesperadamente, pase a operar sinergética, coherentemente? ¿Cómo predecir este comportamiento dado el conocimiento de las partes, de la fisicoquímica de los elementos del sistema, si el comportamiento pertenece al nivel genuinamente biológico y por tanto, aparentemente, distinto del nivel de las relaciones fisicoquímicas que rigen la evolución de las partes? ¿Cómo entender que un sistema dado evoluciona, sufre transiciones, ... y acaba por saber autorreproducirse, etc.? He aquí las cuestiones que nos planteamos tras las secciones anteriores. Y la respuesta no es fácil, ni existe una teoría bien desarrollada y completa. Sin embargo es importante lo que se ha logrado: poner de manifiesto el papel esencial jugado por las fluctuaciones y su relación con las leyes deterministas a las que la termodinámica o cualquier ciencia «dura» (como dice Margalef en otro ensayo) nos tienen acostumbrados.

Inicialmente la materia, la energía, están simétrica, uniformemente distribuidas por igual entre todas las partes del sistema, o incluso si hay distribución heterogénea no se puede hablar de organización dinámica, viviente. El paso de una distribución uniforme, aleatoria, homogénea, a otra espacial o temporalmente organizada supone una transición con ruptura de simetría. En un sistema heterogéneo dinámico, en una estructura disipativa, en un ser biológico, cada

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

parte juega un papel propio o coordinado con las otras. Esta analogía físico-biológica introducida por Prigogine en la reunión «De la Física Teórica a la Biología» celebrada en Versalles (1967) tiene ya precedentes en proposiciones del filósofo H. Spencer, para quien en 1880 «evolutions is an integration of matter, and a concomitant dissipation of motion during which the matter passes from an indefinite incoherent homogeneity to a definite coherent heterogeneity, and during which the retained motion undergoes a parallel transformation».

Es indispensable separar las etapas de *desarrollo* de los momentos de *transición*, en los que una inestabilidad conduce a nueva forma y/o nueva función. En el primer caso podemos limitarnos básicamente a leyes macroscópicas deterministas, aunque continuamente el sistema experimente fluctuaciones que intentan desestabilizarlo. Aquí pequeñas variaciones en causas originan pequeños cambios en los efectos. Lo que es muy distinto cuando en un punto de transición con inestabilidad los elementos estocásticos en las ecuaciones predominan sobre los deterministas. Y aún incluso la disipación, usualmente determinista, puede no jugar un papel únicamente estabilizador del estado anterior. Por eso puede considerarse que determinismo (necesidad) y fluctuaciones (azar) cooperan para hacer «evolucionar» el sistema y para el establecimiento del nuevo estado. Entonces pequeñas variaciones en causas puede que produzcan enormes cambios en efectos. Incluso en equilibrio tal ocurre en un sistema paramagnético cerca de su temperatura de Curie. Basta variar muy poco la temperatura de un sólido paramagnético por debajo de su temperatura de Curie para que se haga un imán, es decir un sistema ferromagnético capaz de atraer las limaduras de hierro lo que no ocurre por encima de la temperatura citada.

Las fluctuaciones espontáneas, o forzadas, del sistema le permiten continuamente explorar nuevas posibilidades, nuevos posibles estados. La «selección» tiene sentido claro inmediato si de entre ellos hay alguno de alcance más rápido que los otros, o es más estable relativamente, o tiene una estructuración menos costosa, etc. Pero desgraciadamente, al menos en la fisicoquímica, no es cierto que siempre se pueda argumentar tal enunciado, que no es sino el de un principio variacional. Los principios variacionales suelen ser enunciables cuando la nueva estructura, el nuevo estado de postinestabilidad resulta del conflicto entre dos causas opuestas (una *catástrofe*, como se dice en Matemáticas) tal y como sucede en algunos ejemplos hidrodinámicos y fisicoquímicos. Pero tal suele ser lo particular y no lo general.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

Lo importante es que si una fluctuación pasa el nivel *umbral* de la inestabilidad y se establece dominando a todas las otras posibilidades del sistema, entonces el estado de partida desaparece por ser ya inestable y el nuevo estado toma el relevo de la estabilidad, aunque siempre el anterior estado permanece como una solución subyacente del sistema.

Así, el azar juega su papel al ofrecer al sistema la exploración de nuevas alternativas a su estado actual y el determinismo toma el relevo cuando estabiliza un nuevo estado, para el que las leyes macroscópicas son básicamente las mismas, aunque forma (arquitectura, estructura, etc.) y función (funcionamiento, legislación social, conductas, cultura, etc.) pueden ser drásticamente diferentes e incluso «diametralmente opuestas». Y este control del determinismo, de la necesidad, permanece hasta que una nueva inestabilidad surge, etc. La selección natural, el principio darwiniano de la óptima adaptación, sólo es aplicable a partir de la formación del nuevo estado y no antes. Ni siquiera puede ser reminiscente de un posible principio variacional que controle el paso por la situación inestable. La supervivencia del toro quizá provenga, entre otras cosas, del uso que hace de sus cuernos, y ello se justifica con la «selección natural», pero los cuernos le aparecieron como un algo espontáneo, una fluctuación que progresó sin prejuzgar que le fuese a ser útil, como Goethe observó agudamente y Darwin nos recuerda en una nota de pie de página (pag. 46 de la traducción castellana citada al final). Una mutación, una fluctuación estabilizada aparece vaya o no vaya a ser beneficiosa para el organismo en el lugar y momento en que aparece. Y eso es azar. pero un azar que actúa en el sistema según su «preparación», su «historia», de modo que una vez en su posesión el organismo puede hacerlo valer en su beneficio.

Cabe pensar que la «vida» o el «pensamiento» hayan intentado aflorar como fluctuaciones que sólo han alcanzado la «talla crítica» en lo que vemos que funcionan. Es imaginable que el «pensamiento», la «conciencia de sí mismo»,... existan en todo ser viviente de forma protopsíquica, como fluctuación no cuajada, incapaz, salvo en el hombre (?), de nuclear la fase psíquica cuando la complejidad del medio (sistema nervioso central, cerebro) lo permite. Por debajo de la talla crítica capaz de nuclear la nueva fase, la fluctuación disipa energía; pero esa disipación tiende a aniquilarla, mientras que por encima de una dimensión crítica la misma disipación tiende a mantenerla, a hacerla estabilizarse liquidando el estado anterior. Todo sistema biológico, todo sistema social, a pesar de su apariencia segura y estable, conlleva continuamente tentativas de cambio, fluctuaciones de amplitud y

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

crecimiento variables. ¿Cuál sea el tamaño crítico de esas fluctuaciones por encima del cual el sistema toma efectivamente un nuevo estado, una nueva fase (mejor, peor)?; ésta es una pregunta que ya se planteó J. W. Gibbs a finales del siglo pasado en su intento de entender la nucleación de fases termodinámicas de equilibrio. Y ahí sigue como uno de los grandes problemas pendientes de la Mecánica estadística y de la Termodinámica.

5. ... Y de la Física a la Biología

Cabe bien afirmar que la estructuración supone un nivel de cooperatividad que surge por transición mediante inestabilidad, de modo que, previa a ésta, la materia y la energía están distribuidas de forma menos ordenada. Al pasar la inestabilidad, mayor parte de ambas se organiza espontáneamente. Cerca del punto de transición suele poder distinguirse entre modos colectivos del sistema que son estables e inestables. Por encima de la transición los modos estables son dominados por los inestables y ello permite, reduciéndose a los últimos, eliminar numerosas variables del problema. Es para los modos inestables, también llamados *parámetros de ordenamiento* por el físico L. Landau (1937, 1944), que se suelen escribir escuaciones de evolución con términos deterministas (disipativos) y estocásticos (fluctuaciones), de modo que azar y necesidad compiten y cooperan en el paso de un estado antiguo a uno nuevo. (El lector encontrará detalles técnicos en el reciente trabajo de Normand, Pomeau y Velarde, 1977).

Así, cabe demostrar que la «presión externa», los gradientes de potencial químico, la autocatálisis, etc., impiden la equiprobabilidad de todas las permisibles fluctuaciones del sistema; e impone, si cabe decirlo, cierta direccionalidad al proceso o incluso cierta selección entre las fluctuaciones realizables.

Una estructura disipativa es, pues, una fluctuación gigante. ¿Es nuestra vida una *fluctuación gigante fuera de equilibrio,* cuya aparición y permanencia proviene del juego sútil, competición y cooperación entre azar y necesidad? Su evolución termodinámica, como la de cualquier sistema abierto muy alejado del equilibrio no es puramente determinista, a diferencia de lo que ocurre en los sistemas aislados o sede de procesos cercanos al equilibrio. Un ciclo como el de la figura 4 (pág. 17) podría ser uno cualquiera de los eslabones de nuestra Historia biofisicoquímica y hasta socioeconómicocultural.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

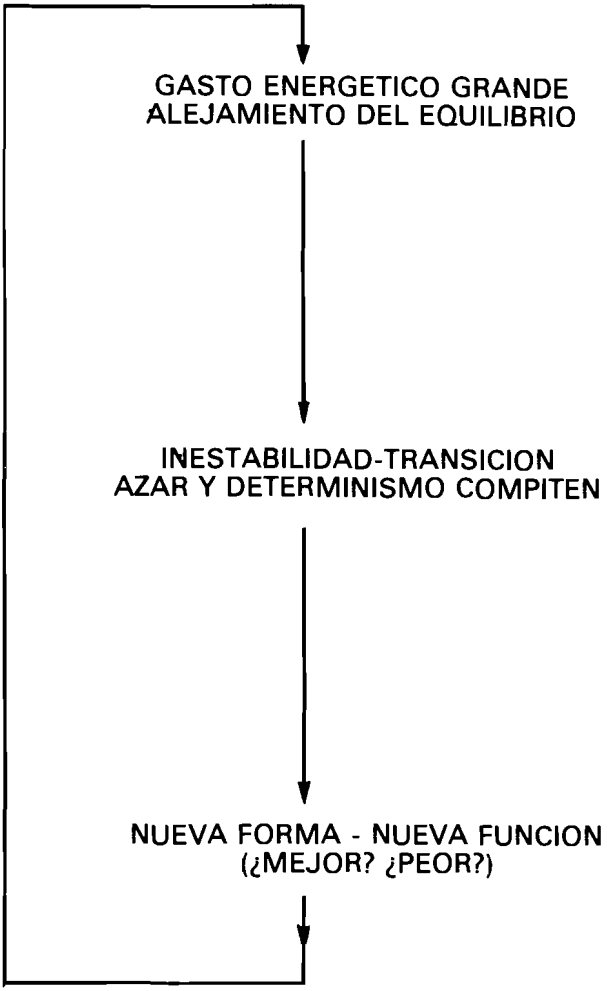

Fig. 4.

Referencias de interés general

AYALA, F. J. y T. DOBZHANSKY, Studies in the philosophy of Biology, Univ. California Press, Berkeley, 1974.
DARWIN, C., El origen de las especies (trad.) EDAF, Madrid, 1965.
JANTSCH, E. y C. H. WADDINGTON, Evolution and Consciousness (Human Systems in transition), Addison-Wesley, Reading, Mass., 1976.
PRIGOGINE, I., en *La Recherche*, **3** (1972) 547.
PRIGOGINE, I., G. NICOLIS y A. BABLOYANTZ, en *Physics Today*, **25** (1972) 23; 38.

Colección Ensayos.Fundación Juan March(Madrid)

PRIGOGINE, I., «Physique et Métaphysique», Colloque «Connaissance scientifique et Philosophie», *Académie Royale de Belgique* (1973) 291.
PRIGOGINE, I., Introducción a la termodinámica de los procesos irreversibles, (trad.) Selecciones Científicas, Madrid, 1974.
SCHROEDINGER, E., ¿Qué es la vida? (trad.), Avance, Barcelona, 1976.

Otras referencias

EIGEN, M., en *Die Naturwissenschaften*, **58** (1971) 465.
GLANSDORFF, P. e I. PRIGOGINE, Structure, Stabilité et Fluctuations, Masson, París, 1971.
IBAÑEZ, J. L., V. FAIREN y M. G. VELARDE, en *Physics Letters*, **58A** (1976) 364.
IBAÑEZ, J. L. y M. G. VELARDE, en *Journal of Mathematical Physics*, **19** (1978) 151.
NICOLIS G. e I. PRIGOGINE, Self-Organization in Nonequilibrium Systems (from dissipative structures to order through fluctuations), Wiley-Interscience, Nueva York, 1977.
NORMAND, Ch., Y. POMEAU y M.G. VELARDE, en *Reviews of Modern Physics*, **49** (1977) 581.
ROWLAND, V. y R. BLUMENTHAL, Dynamic Patterns of Brain cell assemblies, M.I.T., Cambridge, Mass., 1974.
TRINCHER, K. S., Biology and Information (Elements of Biological Thermodynamics) trad. Consultants Bureau, Nueva York, 1965.

NOTA (1)

En la página 474 (traducción castellana) de su libro *El origen de las especies*, Darwin afirma que «diversos autores han sostenido que es tan fácil creer en la creación de un millón de seres como en la de uno solo; pero el axioma filosófico de Maupertuis de la *menor acción* mueve a la mente a admitir de mejor grado el menor número», y como dicho principio es de mecánica teórica, tenemos con ello un admirable ejemplo de argumento de plausibilidad por transposición analógica de un enunciado de Física a la Biología. Es notable, por otro lado, que Maupertuis un físico matemático, se interesó asimismo por la formación de especies proponiendo una noción de transformación que ciertamente es precursora del concepto moderno de mutación. Digamos, de paso, que sería interesante estimar la influencia que las ideas variacionales (principios de mínima acción, de mínima trayectoria, etc.) debidos a fisicomatemáticos como Maupertuis (1698 - 1759), Fermat (1601 - 1665), Euler (1707 - 1783), Hamilton (1805 - 1865) e incluso Herón de Alejandría (60 a de C.), tuvieron en el establecimiento por Wallace y Darwin del principio de la selección natural o de supervivencia de los mejores adaptados, que no es sino el enunciado cualitativo de un principio variacional, por lo que, aparentemente, es una tautología.

NOTA (2)

Para acabar con optimismo bien vale la pena recordar un cuento: «Había una vez un rico negociante cuyo interés se volvió hacia la cría de caballos de carreras. Hombre inteligente, pidió consejo a tres expertos: un veterinario, un ingeniero mecánico y un físico teórico, a fin de encontrar las propiedades óptimas que habría que conseguir. Al cabo de un año dichos expertos rindieron sus conclusiones: el veterinario, un científico moderno empapado de bioquímica, tras un estudio profundo de genética concluyó que los caballos oscuros eran los más veloces, el ingeniero concluyó que patas delgadas eran preferibles para la carrera; y por último el físico teórico no trajo conclusión alguna sino que solicitó un plazo mayor a fin de continuar en lo que ya estaba punto de resolver: el interesantísimo problema del caballo redondo.» La anécdota proviene de una charla de Aharon Katchalsky, quien con Prigogine y Eigen fue uno de los adalides del puente entre Biología y Física, vía la Termodinámica de los sistemas abiertos muy alejados del equilibrio.