

Taller y laboratorio

Sistemas químicos que permiten oscilar de un color dado a otro

Jearl Walker

Si se mezclan perfectamente diversas sustancias químicas, lo lógico es esperar que la mezcla adopte un color único y uniforme. Sin embargo, algunas reacciones químicas producen una sorprendente oscilación de colores. Unas veces cada minuto y otras veces de hora en hora, las soluciones cambian de color pasando de uno a otro ciclicamente.

Uno de los más famosos osciladores de este tipo fue descubierto en 1958 por el químico ruso B.P. Belousov, e investigado posteriormente por A.M. Zhabotinsky y otros. La reacción original tenía lugar al mezclar bromato potásico, sulfato cérico y ácido cítrico en ácido sulfúrico diluido. La oscilación iba del incoloro al amarillo. Desde entonces se han encontrado otras mezclas que oscilan del rojo al azul, del violeta al azul, del rojo al verde e incluso del incoloro al dorado y, posteriormente, al azul. En este trabajo se describirá cómo hacer varios osciladores de éstos y cómo investigar las causas o motivos que provocan la periodicidad de los cambios.

En este trabajo el lector podrá entretenerse con cuestiones que aún no han sido totalmente resueltas. Cabría esperar oscilaciones cromáticas en mezclas no homogéneas, ya que en ellas el motivo puede ser la posterior difusión de un ingrediente en otro. Pero las oscilaciones de un sistema cerrado consistente en una mezcla homogénea siempre se habían visto como una cosa imposible, sobre la base de que lo contrario violaría una ley fundamental de física y química, según la cual toda reacción espontánea debe hacer descender regularmente la energía libre de Gibbs del sistema (más adelante hablaremos de la energía libre de Gibbs).

En 1970 Zhabotinsky y A.N. Zaikin comunicaron que habían encontrado estructuras periódicas (ondas circulares) que recorrían de una parte a la otra una solución, cuya composición era un tanto distinta de la solución primitiva que sirvió como punto de partida. Más tarde, Arthur T. Winfree, que está ahora en la Purdue University, mejoró la fórmula con la que

obtener la solución y examinó ampliamente las estructuras periódicas de las ondas espirales rotativas que aparecían en dicha solución. Winfree redactó para mí unas normas de trabajo con las que poder realizar las reacciones con un mismo, que a continuación paso a describir.

Winfree sugiere la siguiente forma de mezclar los reactivos para obtener un oscilador del rojo al azul. Añadir dos mililitros de ácido sulfúrico concentrado y cinco gramos de bromato sódico a 67 mililitros de agua pura (destilada o desionizada) con lo que se obtendrán 70 mililitros de solución. *Como norma de seguridad añadir siempre lentamente el ácido al agua y nunca el agua al ácido, ya que existe el peligro de que explote.*

Verter seis mililitros de esta solución en un recipiente de vidrio y añadirle 0,5 mililitros de una solución de bromuro sódico, obtenida agregando un gramo de bromuro sódico a 10 mililitros de agua. A continuación añadir un mililitro de solución de ácido malónico (malonato) hecha poniendo 1 gramo de ácido malónico en 10 mililitros de agua. Una vez que haya desaparecido el color del bromo poner a la solución un mililitro de solución 0,025 molar de sulfato ferroso de fenantrolina (un tinte también llamado a veces "ferroin"). Incorporar una pequeñísima cantidad (aproximadamente un gramo por litro) de, por ejemplo, Triton X-100, un modificador de la tensión superficial o "photoflo" (sustancia empleada en fotografía para los trabajos en el cuarto oscuro) con el fin de reducir la tensión superficial y, por tanto, ayudar a que el fluido pueda extenderse en una capa delgada.

Extender dicha capa de líquido en un recipiente limpio, como pudiera ser, un plato de los que se usan para preparar cultivos. Agite bien la solución y verá cómo, después de cinco minutos más o menos, el color comienza a oscilar. A partir de entonces y de vez en cuando, haga girar suavemente en el plato la solución, dándole vueltas o bien agitándola, suavemente también. Los colores se sucederán

con un período de aproximadamente un minuto, aunque el azul sólo permanecerá durante unos cinco o diez segundos cada vez. También aparecerán pequeñas burbujas de dióxido de carbono en la solución: son producto de una de las reacciones involucradas en la oscilación y pueden eliminarse agitando el fluido de vez en cuando.

El hecho de que las concentraciones sean muy exactas no es fundamental, pero en cambio sí debe ponerse mucho cuidado en que los recipientes que se usen estén muy limpios y en procurar que los dedos no toquen la solución ni la superficie de los recipientes que posteriormente estarán en contacto con dicha solución. El cloruro presente en las sales de la piel humana puede entorpecer las reacciones oscilantes.

Antes de usar el bromato sódico en las soluciones, Winfree lo suele recrystalizar con el fin de quitarle cualquier impureza que pudiera interferir en las oscilaciones. Dicha recrystalización se hace disolviendo bromato sódico hasta la saturación en agua destilada caliente, colocada dentro de un recipiente muy limpio, teniendo cuidado de no poner directamente a la llama nada que esté empapado o bien contenga bromato sódico ya que existe el peligro de una oxidación rápida. Envolver el recipiente cerrado con un material aislante, como por ejemplo Styrofoam, y dejarlo en reposo sin moverlo durante una o dos semanas. Una vez transcurrido dicho tiempo, quítese del recipiente el líquido y, con un instrumento limpio, recójase el bromato sódico que se haya quedado pegado en las paredes y en el fondo del recipiente. El líquido sobrante guárdelo, pues le puede ser útil para otra recrystalización.

Antes de examinar las posibles variaciones de la mezcla original debo explicar el por qué tienen lugar las oscilaciones de color. Las reacciones que parecen ser las responsables de dichas oscilaciones resultan un tanto complicadas. En solución, tanto el bromuro como el bromato reaccionan con el malonato para formar el

bromomalonato. Si no fuera por un efecto inhibitor del bromuro, el bromato también reaccionaría con el colorante de fenantrolina oxidando el hierro que contiene (quitando un electrón al orbital de electrones más exterior de cada átomo de hierro). El colorante en su estado reducido (ferroso) es rojo mientras que en su estado oxidado (férrico) es azul, de manera que si el bromuro dejase de inhibir la oxidación, la solución pasaría del rojo al azul.

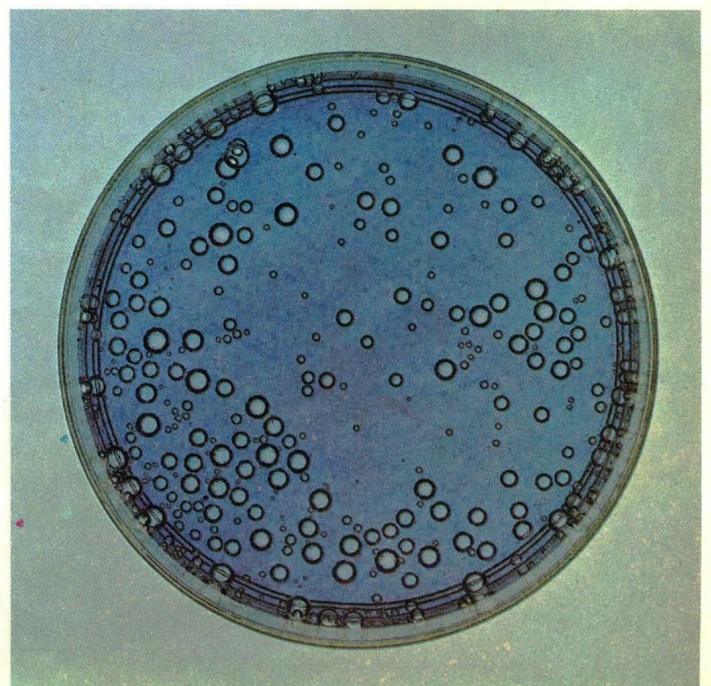
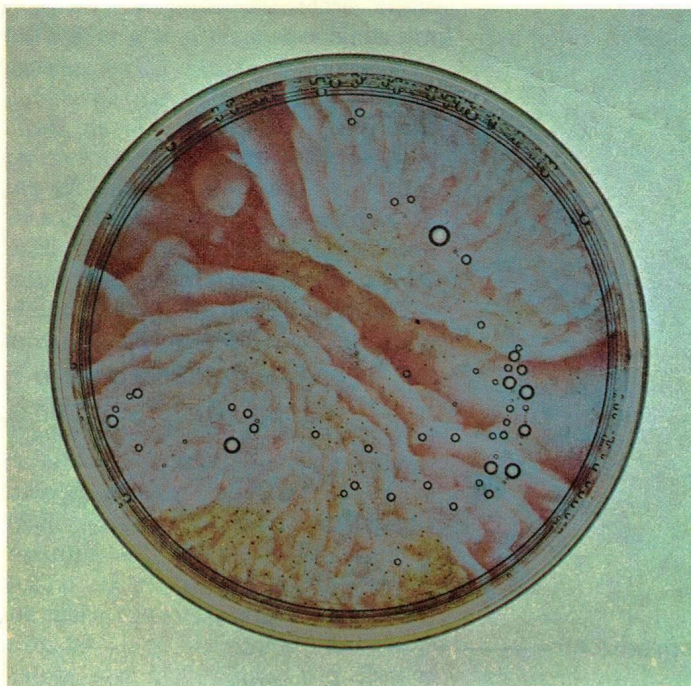
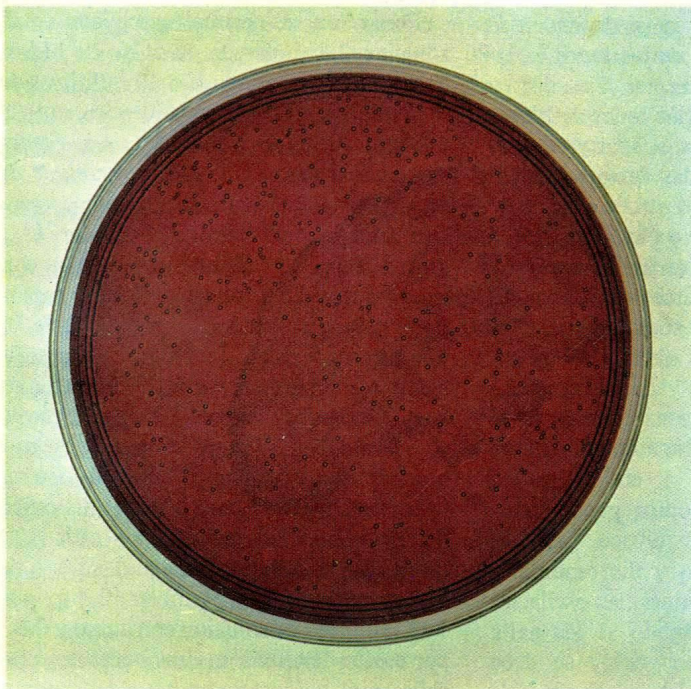
Esto es exactamente lo que llega a suceder, ya que el bromuro es casi totalmente consumido por reacción con el malonato. Entonces puede llevarse a cabo

la oxidación, el colorante de fenantrolina se oxida y la solución toma un color azul en lugar del rojo que tenía.

¿Por qué vuelve a tomar luego el color rojo? El bromomalonato que se ha producido y el que aún se puede producir reduce la forma férrica de nuevo a la forma ferrosa (reducción es lo opuesto a oxidación). La solución, como consecuencia, se torna de nuevo roja. Por otra parte, se produce más bromuro a partir del bromomalonato en la reacción de manera que la inhibición de la reacción de oxidación por el bromato del colorante se vuelve a producir. Rápidamente el bromuro se

consume de nuevo y el ciclo se reanuda. Las oscilaciones continúan durante una hora más o menos, hasta que la solución se queda ya fija en rojo o en azul, dependiendo de las concentraciones iniciales.

Winfrey ha descrito algunas modificaciones que se pueden introducir en la mezcla de partida o básica. Para ensayar con ellas hay que estar familiarizado con los términos molar y normal aplicados a las soluciones. El término molar se basa en el peso atómico de la molécula o del ion complejo que se pone en solución. En una solución uno molar el número de gramos de soluto que se ponen en un litro de



Oscilador de masa de Arthur T. Winfree modificando su color del rojo al azul

solución es igual al peso molecular del soluto (expresado en unidades de peso atómico). La concentración de un producto suele ir impresa en el recipiente que lo contiene. La fenantrolina se vende normalmente a la concentración que se requiere. Una solución normal resulta similar a una solución molar pero su concentración es además proporcional al número de carga del ion que produce la molécula al disociarse. Por ejemplo, una solución dos normal de sulfúrico es a la vez una solución uno molar, debido a que una vez puesto en solución la molécula de ácido sulfúrico libera dos átomos de hidrógeno con una carga neta de más dos.

Ahora veamos las variaciones de Winfree. Una de ellas es no poner bromuro (si bien dicho producto se producirá cuando el bromomalato reduzca a la fenantrolina ferrosa). Las oscilaciones de color serán ahora más frecuentes, ya que es menor la cantidad de bromuro que hay que consumir en cada ciclo antes de que el efecto de inhibición de la oxidación del hierro se elimine y el color de la solución pueda cambiar al azul.

Se puede dar mayor intensidad a las oscilaciones, y así poder verlas mejor, reemplazando en la solución algo del ferroin por sulfato cérico 0,1 molar. Si no se quieren usar ácidos que manchen, por si se producen derrames durante el experimento, se puede sustituir el ácido sulfúrico por bisulfato sódico. El investigador puede modificar la temperatura de la solución o bien la concentración de los ingredientes básicos con el fin de ver cómo influyen tales factores en el período de oscilación (los profesores que estén interesados en proponer estas investigaciones a sus alumnos en el laboratorio pueden encontrar

ayuda en el trabajo de John F. Lefelhocz de la Virginia Commonwealth University, cuya referencia se da en la sección de bibliografía de esta revista).

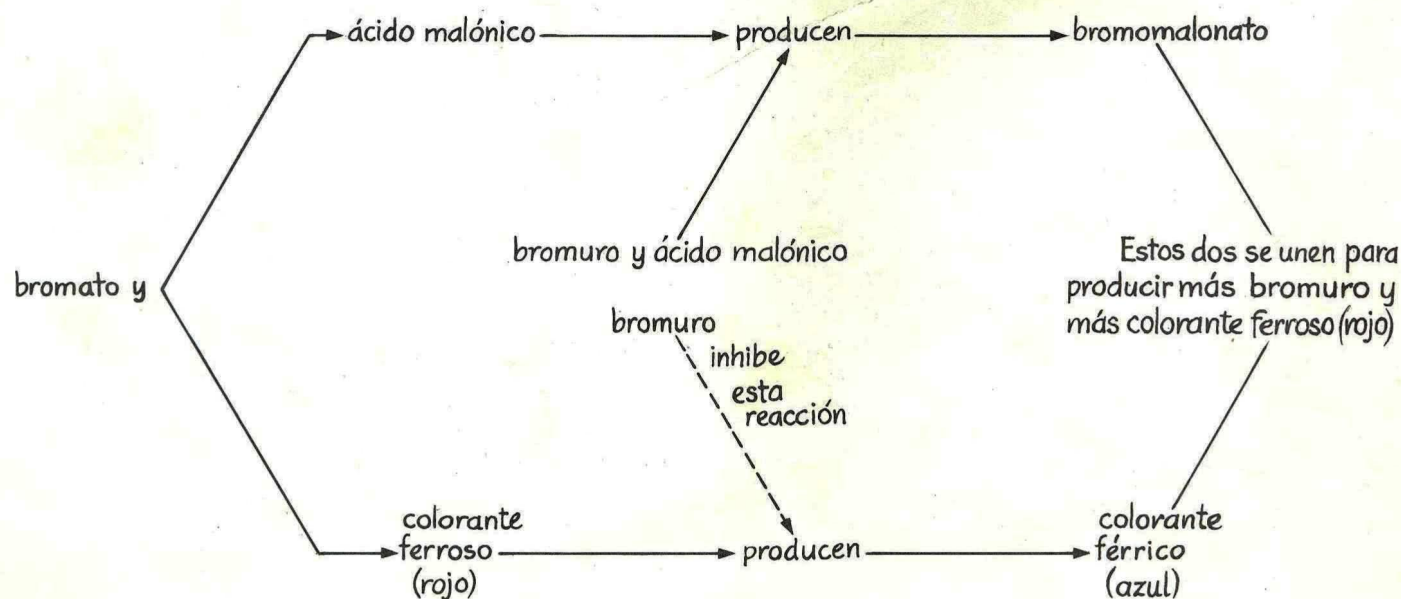
Además de las mezclas de Winfree otras pueden también producir oscilaciones de color. Las reacciones descubiertas por Belousov se basan en el sistema cérico-cerio en lugar de en el férrico-ferroso; la transición tiene lugar del incoloro al amarillo y a la inversa. Richard J. Field, de la Universidad de Montana, sugiere añadir ferroin para dar más realce a la variación del rojo al azul. Las concentraciones que él recomienda para una realización demostrativa se indican en la ilustración superior de la página siguiente. Los colores que se pueden ver en dichas mezclas dependen de las cantidades relativas de los iones cerio-cérico (los cuales oscilan entre el incoloro y el amarillo) y de las de los iones de hierro (los cuales oscilan entre el azul y el rojo) con cantidades apropiadas de amarillo; los colores pueden oscilar entre el azul y el violeta o entre el verde y el rojo.

Oscilaciones entre el amarillo-castaño y el rosa pueden conseguirse con soluciones de manganeso II y III, sustituyendo a los conjuntos cerio III-IV y hierro II-III de las reacciones de Belousov y de Winfree (los números romanos indican el estado de la ionización: hierro II es un átomo de hierro doblemente ionizado, o en el estado ferroso). El ácido malónico puede sustituirse por otros ácidos: cítrico, maleico, málico, bromomalónico y dibromomalónico. En muchas soluciones, las oscilaciones sólo comienzan cuando se las agita suavemente. En algunos casos se debe esperar por lo menos 40 minutos antes de que comiencen las oscilaciones.

Un sistema que cambie su color del

incoloro al dorado luego al azul y vuelva otra vez al incoloro para repetir el ciclo puede obtenerse a un costo relativamente bajo con el reloj de yodo, descrito por Thomas S. Briggs y Warren C. Rauscher de la Galileo High School de San Francisco. Yo puse las concentraciones (en agua destilada) que ellos decían en tres recipientes distintos y las tripliqué con el fin de tener claro la cantidad de productos químicos a echar en cada uno de los recipientes. Los recipientes deberán contener todos igual cantidad, de manera que al verter el contenido de todos en un recipiente único se obtendrán las concentraciones establecidas por Briggs y Rauscher.

Poner en el primer recipiente una solución 3,6 molar de peróxido de hidrógeno, preparada añadiendo 40 mililitros de peróxido de hidrógeno al 30 por ciento a 60 mililitros de agua. *Se debe tener extremo cuidado al manejar el peróxido de hidrógeno.* En el segundo recipiente mezclar iodato potásico 0,201 molar (4,3 gramos por 100 mililitros de solución con agua) y ácido perclórico 0,159 molar preparado añadiendo a 2,3 mililitros de 70 por ciento de ácido perclórico agua suficiente como para obtener 100 mililitros de solución. Probablemente deberá calentar la solución de iodato potásico para conseguir que se disuelva completamente. En el tercer recipiente poner ácido malónico 0,150 molar (1,5 gramos por cada 100 mililitros de solución con agua), sulfato de Manganeso (II) 0,0201 molar (0,3 gr por 100 mililitros de solución con agua) y 0,03 por ciento de almidón. (Los porcentajes se refieren al porcentaje en peso del componente presente en la solución. Es decir, 0,3 gr de almidón en un litro de agua destilada



Reacciones en el oscilador de Winfree

equivale a una solución con el 0,03 por ciento de almidón.)

Cuando lo tenga todo preparado para observar las oscilaciones mezcle cantidades iguales de cada una de las tres soluciones. El azul se presentará debido al complejo azul de almidón que se irá formando periódicamente conforme la concentración de ioduro se aproxime a su valor máximo. Briggs y Rauscher obtenían oscilaciones más cortas cuando sustituían el ácido malónico con 2,4 pentadiona. Las oscilaciones son más rápidas si se reemplaza el manganeso por cerio.

Para obtener grandes oscilaciones de color en la mayoría de las mezclas la solución debe ser agitada de forma continua (con un agitador magnético si se tiene acceso a alguno) o bien se ha de hacer girar el recipiente también de forma continua. Además de los anteriores, también tiene lugar en estas soluciones otros fenómenos de entre los cuales uno de los más interesantes es el que ha sido estudiado a fondo por Winfree y que son las ondas de color que aparecen sobre y en la solución, las cuales se propagan a su través a una velocidad de unos cuantos milímetros por minuto, girando alrededor de su punto de origen, destruyéndose al chocar una con otra y describiendo una gran variedad de formas: anillos, elipses y espirales.

Para dar un mayor realce a estas ondas de color (disminuyendo las oscilaciones en masa) Winfree sugiere usar más bromuro y menos ácido sulfúrico en la mezcla que sirve de base. Por ejemplo, en la solución de bromato sódico usar un mililitro de ácido sulfúrico concentrado y 67 mililitros de agua destilada.

Para que las ondas se puedan ver mejor, poner un poco de la solución en un recipiente que tenga como un milímetro de fondo, un plato por ejemplo, para preparar cultivos de plástico. El recipiente debe estar muy limpio ya que cualquier pequeña mota de suciedad o raspadura pueden provocar la formación de burbujas de dióxido de carbono durante el experimento y, como consecuencia, generar demasiadas ondas a la vez. El contraste visual se mejora si se sitúa el plato sobre otro plato que contenga sulfato de cobre azul con unas cuantas gotas de ácido sulfúrico; el conjunto de los dos platos se coloca sobre una luz. La solución del plato inferior absorberá el calor emitido por la luz impidiendo así que dicho calor interrumpa o destruya las ondas que se forman en la solución del plato superior. El plato se debe cubrir con su tapa, para así proteger las ondas de las corrientes de aire y eliminar además la evaporación. Deje el plato en reposo sin que nada lo mueva. Si las ondas no comienzan a formarse a los

Reactivos	Rangos de Concentraciones (molar):	Concentración (molar) adecuada:
Acido malónico	0,0125 — 0,5	0,275
Nitrato de amonio y cerio	0,0001—0,01	0,002
Acido sulfúrico	0,5 — 2,5	1,5
"Ferroin"	0,0006	0,0006
Bromato potásico	0,03—0,0625	0,0625

Concentraciones de Richard J. Field para el oscilador de cerio

pocos minutos, toque la solución con una aguja caliente, ésta las hará aparecer. Normalmente habrá en la solución burbujas o motas de polvo capaces de hacer aparecer algunas ondas.

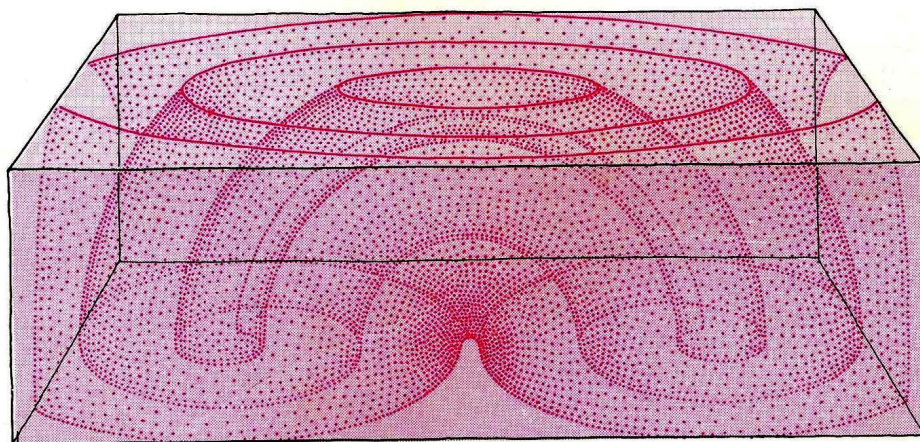
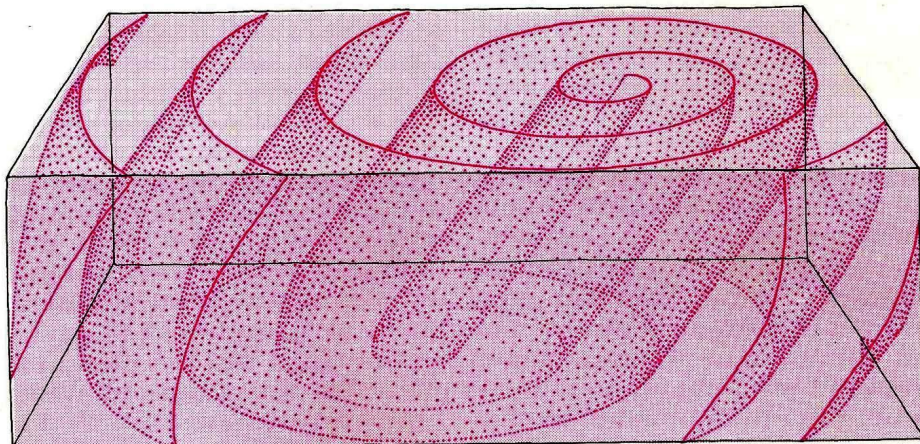
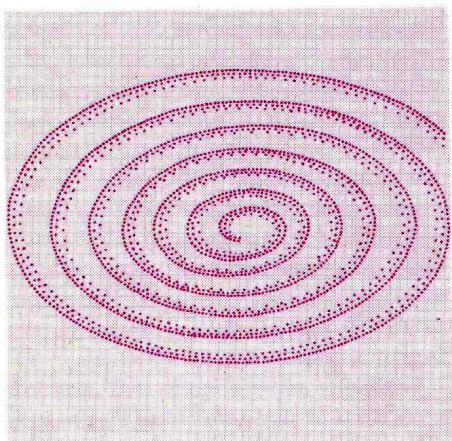
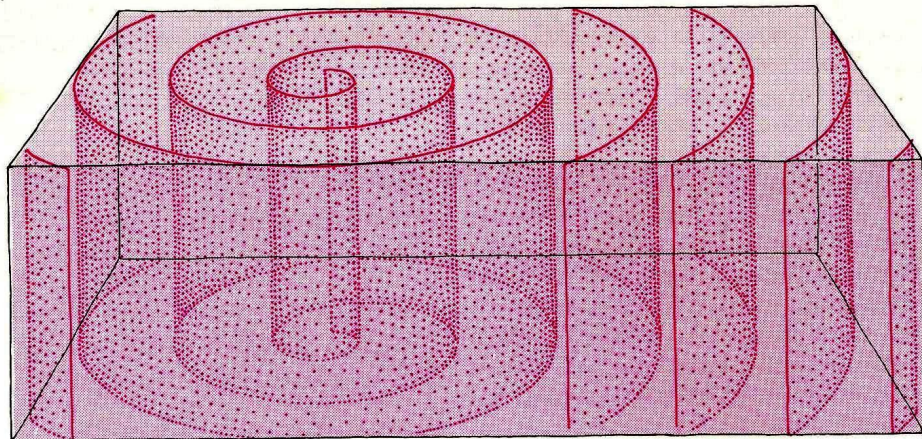
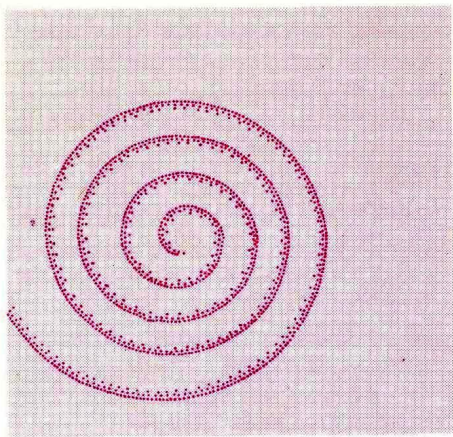
Es de suponer que las ondas provienen del mismo proceso químico que provoca las oscilaciones de color de toda la masa. La solución permanece roja con alguna concentración de equilibrio de bromuro. Una vez que la mezcla ha sido alterada por una burbuja, una raspadura, una mota de polvo o una aguja caliente, parte de la solución consume su bromuro. El bromato puede entonces cambiar el color de la solución a azul oxidando el hierro de la

fenantrolina. Esta conversión se propaga hacia fuera como una onda ya que a medida que la difusión transporta bromuro de la zona roja inmediatamente exterior al anillo azul a la zona azul, se consume el bromuro adicional y la zona antes roja se vuelve azul. Una vez que el anillo azul ha pasado una zona determinada, la solución vuelve a recuperar su tono rojo a medida que el bromomalonato reduce el hierro de la fenantrolina y desprende más bromuro.

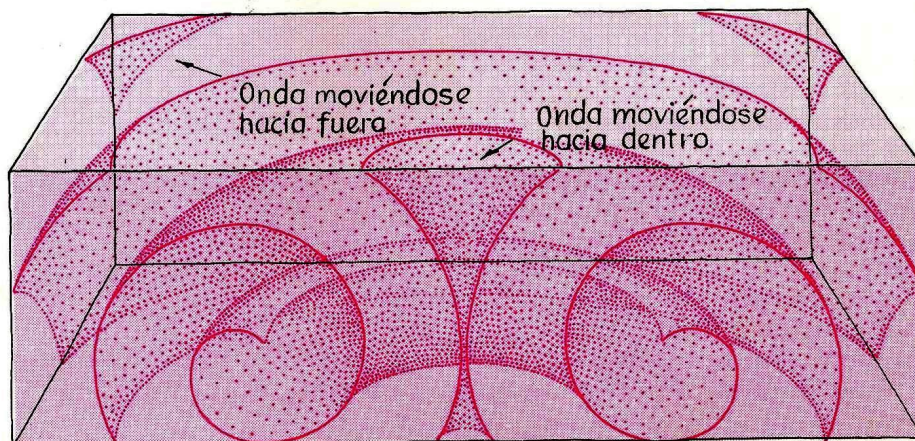
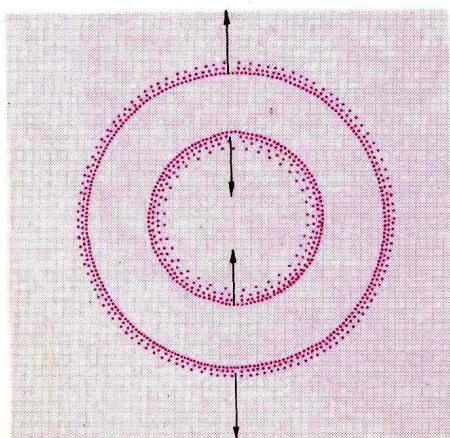
Las ondas son realmente químicas más que hidrodinámicas, ya que el fluido no se mueve. Más aún, no reflejaría las barreras colocadas a su paso y las ondas movién-



Modelos de onda en espiral en una mezcla de Winfree sin agitar



Vista desde el fondo



Onda moviéndose hacia fuera

Onda moviéndose hacia dentro

Tipos de ondas espirales

dose en direcciones opuestas no pasarían unas a través de las otras.

El experimentador podrá comprobar que las ondas, que tienen una longitud de unos cuantos milímetros, toman distintas formas. Entre ellas encontramos las de anillos cerrados, concéntricos formando un ojo de buey, con la aparición de nuevos anillos en el centro a intervalos regulares; estos modelos no giran. Otras ondas forman espirales, cada una de las cuales tienen el mismo período de duración, más corto que ninguno de los períodos del modelo de círculos cerrados. Estos modelos en espiral sí son giratorios. Si el eje de rotación es perpendicular a la superficie de la solución se propagan ondas en forma de voluta (como las llamó Winfree) desde el eje, produciendo una estructura en espiral alrededor de una región central que rodea a la parte alta del eje según se mira desde arriba. La estructura es técnicamente una espiral, que se podría dibujar de forma mecánica con un lapicero atado a una cuerda que se va desenrollando de un cilindro central en lugar de hacerlo desde un solo punto. En la espiral química el núcleo central tiene menos de un milímetro de diámetro.

Si la solución es suficientemente profunda (más profunda que el núcleo de la espiral) el eje puede permanecer inclinado hacia un lado. Desde arriba se verán entonces espirales alargadas rodeando la parte central del modelo. En una solución de profundidad adecuada el eje de la voluta puede doblarse para formar una U con su parte superior en una superficie de la solución y la inferior en la otra. Desde una orientación se verán anillos rodeando un punto central. Si la forma de U huye de la superficie que tiene los anillos, éstos desaparecen en esa superficie justo antes de convertirse en círculos completos. Cuando el eje de rotación resulta paralelo a una superficie y en un anillo cerrado, la superficie tiene círculos concéntricos de los que el más interior se propaga hacia dentro y el más externo se propaga hacia fuera.

Si quisiéramos poner barreras al paso de la onda, sería mejor usar una solución más viscosa. Esta se puede conseguir añadiendo dos mililitros de dióxido de silicio coloidal por cada mililitro de solución. Winfree afirma que la solución resultante tiene una consistencia similar a la mantequilla de cacahuete.

Se pueden proteger los modelos y sacarlos de la solución poniendo filtros en la misma. La formación y propagación de las ondas no se alteran por el uso de filtros. Hay que evitar la contaminación de la solución al poner dentro los filtros; para ello deben usarse pinzas de nylon y no se deben tocar los filtros con los dedos. Si se

calientan primero los filtros (incluso con el calor del cuerpo) los modelos que se producen son más activos.

Una vez que la solución ha sido absorbida por un filtro, Winfree quita el filtro y lo pone entre dos hojas de plástico (sirven las de envolver comestibles), lo coloca después en aceite para reducir la evaporación y desechar el oxígeno o lo pega a la parte interior de la tapa de un plato de plástico. El filtro se puede usar de nuevo si se aclara bien con agua.

Cuando Winfree introduce un filtro en aceite, puede hacer un juego con las ondas químicas tocando levemente el filtro a través de la película de aceite con un trozo de hierro, como, por ejemplo, el borde de una cuchilla de afeitar. La capa roja resultante, que denomina "la cortina de hierro", bloquea las ondas en esa región durante varios segundos. El tono rojo resulta, aparentemente, del hecho de que el ácido de la solución extrae hierro en estado ferroso de la cuchilla.

Quizás el observador desee fotografiar las ondas a medida que se van desarrollando. Se pueden también fijar en un filtro siguiendo un procedimiento diseñado por Winfree (éste no funcionará con un filtro que haya sido puesto en aceite). Cuando las ondas se estén propagando a través del filtro, se debe retirar éste y ponerlo en agua salada saturada muy fría al objeto de paralizar la reacción. Deje el filtro allí durante cinco minutos (hasta que todos los productos químicos se hayan disuelto excepto la fenantrolina de color rojo ferroso), después séquelo e introdúzcalo en una solución de yoduro sódico (un gramo por cada 40 mililitros de solución con agua) y séquese de nuevo. Después se dejará durante 10 minutos en el vapor de yoduro emanante de una botella conteniendo cristales de yoduro. Este procedimiento fija permanentemente el ferroun.

Enjuáguese el filtro en agua destilada, séquese al aire y aclárese haciéndolo flotar en aceite de parafina; habrá que secarlo otra vez y, finalmente, arroparlo entre dos hojas de plástico adhesivo claro. Winfree afirma que los modelos de ondas químicas preservadas de esta forma han durado años con total agudeza. La conservación durante un día más o menos puede conseguirse de una forma más sencilla sumergiendo los filtros en una solución muy fría de ácido perclórico al 3 por ciento, pero la agudeza disminuye algo y el modelo desaparece cuando el filtro se seca completamente.

Si se desarrollan ondas en un paquete de filtros (se necesitan por lo menos tres por paquete para conseguir las estructuras alargadas), se pueden separar entre sí (como hizo Winfree) para ver las estructu-

ras verticales de las ondas. De esta forma se puede seguir el eje de voluta hacia abajo o desdoblar una estructura en forma de U. Las burbujas de dióxido de carbono pueden ser un estorbo si separan los filtros, lo cual ocurre a los cinco minutos más o menos.

Un paquete de filtros Millipore llevan a un mejor entendimiento del anillo de voluta horizontal. En este anillo el eje de la voluta es horizontal y se cierra sobre sí mismo para formar un círculo. Coloque un paquete de cinco filtros en la solución y toque el centro del filtro superior con una aguja caliente para iniciar una onda cilíndrica. Una vez que la onda se ha propagado hacia el exterior, a través del filtro superior haga descender otro grupo de cinco filtros sobre el primer paquete, con el nuevo grupo en el estado rojo inicial de la solución. Pronto aparecerá una onda cilíndrica en la parte alta del nuevo grupo y el círculo se romperá en dos partes, una se moverá hacia dentro y la otra hacia fuera. Cuando se coloca el nuevo paquete de filtros en su sitio, la onda de voluta en el paquete inicial entra en el nuevo paquete y puede llegar a aparecer en lo alto del mismo.

Winfree tiene otra técnica que emplea para preparar los filtros en una demostración. Con ese fin deben mezclarse bromomalonato de amonio uno molar con un volumen igual de fenantrolina ferrosa 0,025 molar. Esta mezcla se combinará con un volumen igual de bisulfato de amonio 4 molar. (46 gramos por cada 100 mililitros de solución con agua.) Coloque un filtro Millipore en la solución, levántelo para que escurra el líquido de la superficie y después póngalo en una superficie de plástico para que se seque. Mientras tanto, ponga un filtro de papel Whatman nº 1 en bromato sódico 0,33 molar (cinco gramos por cada 100 mililitros de solución con agua) y después séquelo. Cuando se quieran demostrar las ondas de voluta, debe mojarse el filtro con agua pura, colocarlo en una superficie limpia (en un plato de plástico) y cubrirlo con el filtro Millipore. Después de esperar unos minutos se verán puntos azules en el filtro de arriba; quizá se vean también ondas azules propagándose a través del filtro a una velocidad de varios milímetros por minuto.

Por 4 dólares puede comprarse una muestra de un filtro Millipore de unos 30 centímetros ya impregnada con los productos químicos para que genere ondas en Winfree (Arthur T. Winfree, Institute for Natural Philosophy, 51 Knoll Crest Court, West Lafayette, Ind. 47906). Se debe enviar una etiqueta con la propia dirección al hacer el pedido. El filtro sólo

JUEGOS CIENTÍFICOS PARA LOS MÁS JOVENES



EL TALLER DE LOS EXPERIMENTOS

«No hay juego más divertido que el que utiliza la naturaleza, porque para jugar con ella basta con tener un poco de fantasía y cierta curiosidad por experimentar». Este fragmento del prólogo de Alberto Méndez define lo que constituye el objetivo de esta obra: ayudar a desarrollar en los más jóvenes, a partir de los 10 años, el gusto y la afición por la experimentación científica. A través de ella aprenderán, de una forma viva y sorprendente, una serie de principios básicos de la ciencia.

INDICE DE EXPERIMENTOS

Estalactitas y estalagmitas
Cómo cambiar el color de las flores
Cristales de azúcar
Cristales de sal
Cristales gigantes
Agua trepadora
Un barco de propulsión a vapor
Líquidos de colores
La fuerza centrífuga
Arquitectura de las hojas
Cómo poner un huevo de pie
Las plantas respiran
La piel invisible del agua
Un barómetro
Tintas invisibles
La aguja flotante
La gran fuerza del aire
El secreto de las hojas
Siluetas sobre las hojas
Fuegos de Bengala
Un electroimán casero
Las raíces buscan la tierra
El agua se dilata
La fuerza de las plantas
Las bolas saltarinas
El huevo flotador
Plantas de semillas
Agua que cambia de color
Cómo conseguir un arco iris
Llamas de colores
El papel incandescente
Construye un periscopio
Alimentos con almidón
El vaso boca abajo
Pruebas de electricidad estática
Cómo hacer una nevada
Espejos grotescos
El lenguaje de los árboles
Cómo hacer un herbario

Un volumen económico, en formato de bolsillo, con 44 ilustraciones, muchas de ellas múltiples o secuenciales. LABOR BOLSILLO JUVENIL, n.º 15.

labor
bolsillo juvenil



necesita ser mojado para que pueda trabajarse con él 30 minutos. El filtro se puede calentar, enfriar, cortar con tijeras, tocar con un objeto de hierro para bloquear las ondas, estimular con una aguja caliente y apilarlo para hacer ondas tridimensionales.

¿Cómo puede una solución mezclada uniformemente a temperatura y presión constantes oscilar de color, de concentración de especies moleculares, de conductividad o de cualquier otra cosa? Esta pregunta ha venido preocupando a los químicos desde el siglo XIX. Las oscilaciones son todavía debatidas y algunos químicos siguen diciendo que las oscilaciones en tales circunstancias son imposibles. En términos científicos la pregunta es, ¿pueden producirse oscilaciones en un sistema homogéneo y cerrado a temperatura y presión constantes? Se sabe que las oscilaciones pueden producirse en medios que tengan constituyentes no homogéneos y gradientes de densidad en las especies moleculares que están sufriendo difusión. Se sabe asimismo que las oscilaciones pueden aparecer si el sistema está abierto a la adición de más materiales. Sin embargo, en las oscilaciones de masa, las oscilaciones se producen, al parecer, en un sistema que es homogéneo y cerrado.

Para desvelar el problema algunos investigadores se concentran en la energía libre de Gibbs del sistema, porque cualquier reacción espontánea en el sistema homogéneo y cerrado a temperatura y presión constantes debe hacer disminuir la energía libre de Gibbs en el sistema. La energía libre de Gibbs es un indicador de la espontaneidad de una reacción (la tendencia de la reacción a continuar por sí misma sin activación externa). En cualquier reacción espontánea, el sistema tiende a reducir su energía (medida por la entalpía) y a incrementar su desorden (medida por la entropía). No es inevitable que ambos extremos puedan ser alcanzados. Por ejemplo, algunas reacciones pueden ser capaces de continuar espontáneamente aun cuando su energía (entalpía) se incrementa; la razón es porque el desorden (entropía) se incrementa aún más. Otras reacciones pueden ser espontáneas por la razón opuesta. Así pues, ni la entalpía ni la entropía son buenos indicadores de espontaneidad por sí mismos. Lo que se usa es una combinación de las dos, llamada la energía libre de Gibbs. Cualquier reacción que reduzca la energía libre de Gibbs es aquella que se continúa espontáneamente.

En principio las reacciones de oscilación que he descrito parecen violar la regla universalmente aceptada de que cualquier reacción espontánea debe moverse firmemente hacia su estado del equilibrio final

mientras va perdiendo su energía libre de Gibbs. De hecho, las oscilaciones parecen violar la segunda ley de la termodinámica, que prohíbe las oscilaciones en torno al punto de equilibrio. No obstante, la paradoja se resuelve muy fácilmente observando que no hay ninguna ley termodinámica que impida las oscilaciones cuando los reactivos están lejos de equilibrio y a medida que las reacciones netas hacen decrecer la energía libre de Gibbs. Así, en la mezcla de Winfree las reacciones químicas netas consumen muy poco bromato y ácido malónico en cada ciclo de oscilación y los ciclos con los reactivos muy alejados de sus valores de equilibrio finales. En el constante proceso de las reacciones netas hacia el equilibrio, las concentraciones de los componentes menores bromuro y fenantrolina pueden variar considerablemente, aunque permanecen bajas con relación a las concentraciones de bromato y ácido malónico. Con el tiempo, el bromato y el ácido malónico se consumen en las reacciones netas lo suficiente para que el proceso total se pare y todas las concentraciones estén en equilibrio. Así pues, la solución puede oscilar en la concentración de sus especies (con cambio de color en el caso que nos ocupa) siempre que los principales reactivos estén en abundancia y lejos de las concentraciones finales de equilibrio. Una vez que se ha alcanzado el estado de equilibrio cesarán las oscilaciones. No se viola pues la segunda ley de la termodinámica.

Deben existir otros requisitos para que una solución sea capaz de oscilar; de lo contrario, una clase de química sería mucho más colorista. Las reacciones que tienen lugar deben ser complejas, y al menos una debe catalizarse a sí misma (o sea, ser autocatalítica), y enlazarse con las otras reacciones de alguna forma tal como una dependencia de las concentraciones en las otras reacciones o por una inhibición o activación de las reacciones. Este enlace con otras reacciones es común llamarlo realimentación (feedback) y es muy característico de los sistemas de oscilación.

En la mezcla de Winfree el acoplamiento se hace por medio del ion bromuro y la fenantrolina. El bromuro reacciona con el ácido malónico, inhibe la reacción de bromato con la fenantrolina ferrosa y es un producto de la reacción de bromomalonato y fenantrolina férrica. La reacción del bromato con ácido malónico es una reacción autocatalítica. No estoy seguro de que en otros ejemplos de osciladores básicos, como el reloj de yodo por ejemplo, los complicados mecanismos causantes de las oscilaciones hayan sido todavía resueltos y entendidos en términos de termodinámica.