LÍQUIDOS EXÓTICOS

Autor: LEOPOLDO GARCÍA-COLÍN SCHERER Y ROSALÍO RODRÍGUEZ ZEPEDA

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- INTRODUCCIÓN
- I.EL MISTERIOSO FLUJO DE LOS LÍQUIDOS POLIMÉRICOS
- II. FLUIDOS MULTIFÁSICOS
- III. CRISTALES LÍQUIDOS
- IV. LÍQUIDOS SOBREENFRIADOS Y VIDRIOS
- V. LOS SUPERCONDUCTORES
- VI. SUPERFLUIDEZ
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Inicio

EDICIONES

Primera edición, 1992

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1991, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3580-9

Impreso en México

INTRODUCCIÓN

¡Vivimos en un mundo de fluidos! Los fluidos nos rodean y son tan vitales y familiares en nuestra vida diaria que, a menudo, la fuerza de la costumbre disminuye o aniquila nuestra capacidad de maravillarnos ante sus diversas y fascinantes propiedades.

El aire, el agua, la sangre o la gasolina son ejemplos de fluidos y ponen de manifiesto que, efectivamente, de entre los diferentes estados de agregación de la materia en nuestro planeta el estado líquido es sin duda el más abundante. Mas, aunque representa un alto porcentaje de la composición de la Tierra, el estado líquido es la fase de la materia menos estudiada y menos comprendida. Y, sin embargo, la riqueza y variedad de los fenómenos físicos que ocurren en los líquidos es enorme y reviste gran importancia científica y tecnológica. En este libro habremos de asomarnos al fascinante mundo de los fluidos y describiremos algunos fenómenos exóticos que se producen en ellos. Pero, ¿cómo nos asomaremos a este mundo?

Dejemos volar la imaginación. Asuma el lector el papel de espectador en un gran teatro en el que va a representarse una obra. Imaginemos que el teatro es nuestro laboratorio y que el grupo de actores que ocupa el escenario representa las moléculas del sistema físico cuyo comportamiento queremos observar. Puesto que deseamos en este trabajo describir el comportamiento *exótico* de diversos líquidos, la obra que presenciaremos requiere necesariamente de un elenco muy numeroso y de un libreto que demande continua interacción y gran actividad entre los actores.

Por supuesto, nuestra percepción de la obra será diferente dependiendo de la localización que tengamos en el teatro. Así, desde la primera fila de luneta observaremos una gran actividad y un movimiento incesante de los actores. Todos se mueven e interaccionan entre sí; ocasionalmente se detienen, pero rápidamente vuelven a entrar en acción y continúan su febril actividad. Aunque el número de actores sea grande, desde nuestra butaca podemos seguir con relativa facilidad el movimiento detallado e individual de los actores. Sin embargo, desde esta posición carecemos de una visión de conjunto; el exceso de detalle nos impide apreciar los movimientos del elenco como un todo. Bueno, pero esto puede remediarse fácilmente cambiándonos de sitio y sentándonos en la última fila del último balcón. Ahora nos encontramos tan lejos del escenario que ya no distinguimos claramente a los actores; ya no podemos seguir sus acciones individuales, éstas han "desaparecido". En cambio apreciamos claramente el movimiento colectivo del elenco. Desde nuestra nueva posición hemos sacrificado detalle en aras de lograr una visión global del conjunto de actores, esto es, del líquido como un todo.

El espectador de la primera fila hace una descripción "microscópica" del fluido, mientras que el de la última lo describe "macroscópicamente". Claramente, no sólo las escalas espaciales de ambos espectadores son diferentes, sino que también lo son las escalas temporales. En efecto, los cambios que ocurren entre acciones individuales pueden ser muy rápidos y se dan en distancias cortas, en tanto que los movimientos del conjunto de actores son necesariamente más lentos.

En el presente trabajo no nos restringiremos sólo al punto de vista de uno u otro espectador, más bien imitaremos al crítico teatral que debe reseñar la obra desde ambos puntos de vista. En los primeros cuatro capítulos nos concentraremos en los aspectos puramente macroscópicos del comportamiento de diversos líquidos exóticos, pero en los dos últimos capítulos del libro veremos cómo, al bajar la temperatura, podremos asomarnos al mundo de los átomos y las moléculas y veremos de qué forma surgen características insospechadas y fascinantes en el comportamiento de los fluidos. Así que, ¡Arriba el telón y comience la función!

I.EL MISTERIOSO FLUJO DE LOS LÍQUIDOS POLIMÉRICOS

"NADA ES, TODO FLUYE", afirmó el filósofo griego Heráclito en el siglo V antes de nuestra era... y tenía razón. Si pudiéramos observar las rocas sólidas en el interior de la Tierra, el concreto y el acero de las construcciones o el vidrio de los vitrales de una catedral antigua, durante las escalas de tiempo apropiadas, es decir, durante intervalos de tiempo muy grandes, podríamos comprobar que efectivamente todo *puede* fluir. Entender de manera precisa qué significa y cómo se produce el fenómeno del flujo de la materia tiene gran importancia tanto desde el punto de vista científico fundamental como del práctico. Por ejemplo, el ingeniero en aeronáutica necesita saber cómo fluye el aire alrededor del ala de un avión o el aceite lubricante en el motor. Un ingeniero civil debe poder predecir cómo se moverá el suelo sobre el que se asientan los cimientos de una construcción debido al peso de la misma y un químico que sintetiza plásticos necesita saber si sus materiales tienen las características apropiadas para poder moldearlos y darles una forma determinada. Estos son sólo algunos ejemplos de los numerosos y diversos problemas prácticos en donde interviene el fenómeno del flujo de un material. De hecho este fenómeno está virtualmente presente en casi todos los aspectos tecnológicos actuales en los que, de una forma o de otra, algo fluye o se deforma.

Aunque todos tenemos una idea intuitiva de lo que significa que un material cualquiera fluya, para definir de manera más precisa lo que es el flujo señalaremos primero que este fenómeno está íntimamente relacionado con otro, el de la *deformación*. Llamaremos deformación al movimiento de una parte de un cuerpo con respecto a otras partes del mismo y que, como consecuencia, produce un cambio en su forma o tamaño. En otras palabras, una deformación cambia la distancia que existe entre los diferentes puntos de un cuerpo, o más específicamente, resulta del desplazamiento de las partículas (moléculas, átomos o iones) de las que está compuesto el material, las cuales, bajo la acción de fuerzas externas, se desplazan ligeramente de sus posiciones originales. En nuestra experiencia diaria, continuamente nos topamos con deformaciones de materiales. Así, el agua de un río que fluye se deforma; una liga o banda elástica que se estira o una cuerda de violín que se pulsa también se deforman. En general, los cuerpos se deforman cuando sobre ellos actúa un *esfuerzo*, el cual representa la fuerza por unidad de área que se produce en un material debida a la acción de una fuerza interna o externa que actúa sobre el sistema. El origen de estos esfuerzos puede ser muy diverso; por ejemplo, el calentamiento no uniforme de un material produce una distribución de esfuerzos dentro del mismo, o la deformación misma de un cuerpo genera otros esfuerzos. Sin embargo, aunque las causas que los produzcan sean variadas, los esfuerzos se pueden clasificar en dos grandes grupos: normales y de corte (cortantes). Si los esfuerzos resultan de aplicar fuerzas perpendiculares a la unidad de área del material se llaman normales, y dependiendo del sentido de esta fuerza respecto a la superficie, a su vez se clasifican en tensiles o de compresión (Figura 1). Si en cualquier punto de un material los esfuerzos son normales y de compresión, como ocurre en el caso de un objeto en reposo y totalmente sumergido en un fluido, a este esfuerzo se le llama presión hidrostática o simplemente presión, la cual es un ejemplo de esfuerzo intuitivo y familiar para todos.

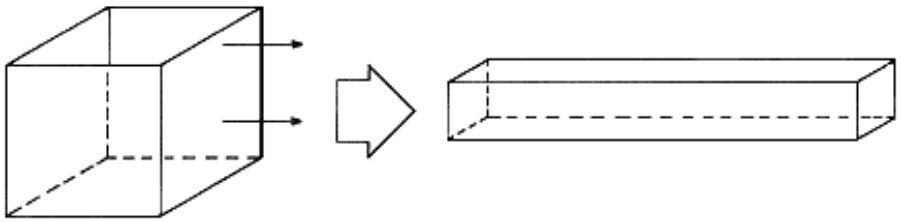

Figura 1. Elongación producida en una muestra de material por un esfuerzo tensil normal.

Por otra parte, los esfuerzos de corte resultan de aplicar fuerzas paralelas y contenidas en el plano de la unidad de área de material. En una barra sólida estos esfuerzos se producen al torcer la barra alrededor de su eje longitudinal, como si se apretara un tornillo (Figura 2). En cambio, en un fluido los esfuerzos de corte se

producen, por ejemplo, al deslizar una superficie sobre un líquido lubricante, o cuando líquidos y gases resbalan por una superficie sólida o fluyen por un tubo, o cuando un objeto se mueve en el seno de un fluido, como ocurre durante el paso de un avión a través del aire.

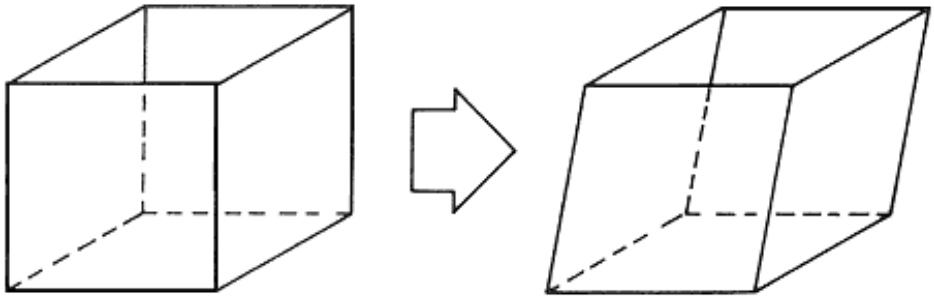

Figura 2. Deformación típica producida en un material por un esfuerzo de corte.

Ahora bien, los materiales reaccionan de maneras diferentes ante la acción de esfuerzos aplicados. Cuando éstos son pequeños, algunos materiales se deforman y recuperan su forma original al desaparecer los esfuerzos; a estos materiales se les llama sólidos elásticos. A diferencia de estos sistemas, los fluidos se caracterizan por ser muy susceptibles frente a la acción de los esfuerzos; de hecho, su manera de reaccionar en estas condiciones es lo que define en forma precisa a un fluido: un material incapaz de soportar la acción de un esfuerzo de corte. Es decir, por pequeño que sea el esfuerzo aplicado, el fluido experimenta una "deformación continua en el tiempo" o "flujo", y aunque desaparezca el esfuerzo, el fluido no recupera su forma original. Cuando este fenómeno ocurre, las capas de fluido se desplazan unas respecto a otras con velocidades diferentes, como cuando las cartas de una baraja se deslizan unas sobre otras. Sin embargo, los sólidos elásticos también pueden fluir si el esfuerzo aplicado alcanza el valor necesario para que se produzca una deformación permanente. A este valor del esfuerzo se le llama *esfuerzo de cedencia* del sólido, y marca la transición entre su comportamiento elástico y el plástico, es decir cuando puede fluir. De modo que desde este punto de vista, y dados los esfuerzos necesarios y el tiempo de observación suficiente, ¡aun los sólidos pueden fluir!

Ya hemos dicho que un líquido o gas tiende a fluir bajo la acción de un esfuerzo de corte por pequeño que sea, sin embargo, no todos los fluidos fluyen de la misma manera. No hay que olvidar que cualquier fluido real es viscoso, es decir, ofrece una mayor o menor resistencia al deslizamiento relativo de sus capas, que se mueven a velocidad diferente, o sea, que se resiste a deformarse y fluir. En consecuencia, la viscosidad de un fluido necesariamente afecta a la relación que existe entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida. Esta relación se expresa por las llamadas *relaciones constitutivas*, que describen el comportamiento mecánico de un material de manera aproximada y bajo circunstancias particulares. Así, por ejemplo, una misma barra metálica puede considerarse completamente rígida si el esfuerzo aplicado es muy pequeño comparado con el valor de su esfuerzo de cedencia; en cambio, se comportará como un sólido elástico ante valores mayores del esfuerzo aplicado, pero aún menores que el esfuerzo de cedencia. Pero si el esfuerzo es muy grande se comportará como un sólido plástico. En cada caso el comportamiento mecánico está descrito por una relación constitutiva diferente. La rama de la mecánica que se ocupa de formular y estudiar las relaciones constitutivas de los materiales es la reología, palabra que proviene del vocablo griego *reos*, que significa fluir, y es la ciencia que estudia la deformación y el flujo.

Aunque ya desde 1678 el científico inglés Robert Hooke había establecido que para una gran variedad de materiales la deformación elástica producida es proporcional al esfuerzo aplicado, no fue sino hasta 1775 cuando el matemático suizo Leonhard Euler propuso la primera relación constitutiva para un fluido, el llamado fluido perfecto o ideal. Este es un fluido cuya fricción interna o viscosidad es estrictamente nula y que, además, tiene la siguiente propiedad: el esfuerzo que una parte del fluido ejerce sobre las partes adyacentes es normal; es decir, siempre es perpendicular a la superficie que separa ambas partes. Cualquier fluido real es viscoso en alguna medida y, sólo en forma aproximada, cuando su densidad es muy baja, se comporta como un fluido ideal. Por

ejemplo, el helio a temperaturas muy bajas puede comportarse como el fluido ideal de Euler, con una viscosidad exactamente igual a cero. Como veremos después en el capítulo VI, este efecto constituye la base del fenómeno exótico de la superfluidez.

La primera relación constitutiva para un fluido viscoso la estableció Isaac Newton en 1687 al proponer que para estos fluidos el esfuerzo de corte aplicado y la deformación producida son proporcionales, es decir, a mayor esfuerzo mayor deformación. Como ya hemos visto, la deformación implica que la velocidad relativa de las capas de fluido no es la misma, por lo tanto la relación de Newton también puede expresarse diciendo que el esfuerzo de corte y el cambio de la velocidad en el fluido son proporcionales. A la constante de proporcionalidad se le define como la viscosidad del fluido; por esta razón a esta relación constitutiva lineal también se le llama ley de la viscosidad de Newton. A los fluidos cuyo comportamiento mecánico se describe adecuadamente en términos de esta relación constitutiva se les llama *fluidos newtonianos*. El agua y el aire, que son los fluidos más abundantes de la Tierra, se comportan como newtonianos con una excelente aproximación. Estos fluidos también son los más estudiados y los mejor comprendidos; a las ecuaciones que gobiernan su movimiento (flujo) se les conoce como las ecuaciones de Navier-Stokes y fueron formuladas desde mediados del siglo pasado por el ingeniero francés Louis Marie Navier y por el físico inglés George Gabriel Stokes. La descripción del flujo basada en estas ecuaciones resultó muy exitosa, pues ha permitido entender muchos fenómenos y conduce a predicciones que se comparan muy bien con el experimento. Sin embargo, aún persisten problemas teóricos y prácticos que no han podido resolverse. Es conveniente subrayar que, según la relación de Newton, no sólo las magnitudes de la "causa" (esfuerzo aplicado) y el "efecto" (deformación o flujo) son proporcionales, sino que la relación entre ellas también es "instantánea". Esto significa que al flujo en el instante de observación sólo contribuye el esfuerzo aplicado en el mismo instante de tiempo. Los esfuerzos que hayan existido en el fluido en tiempos anteriores no contribuyen a producir la deformación en el momento de la observación. En otras palabras, los fluidos newtonianos no guardan "memoria" de las deformaciones previas.

La experiencia ha demostrado que la gran variedad de líquidos y gases newtonianos tienen una característica común, a saber, las moléculas que los componen son ligeras, es decir, de bajo peso molecular. Como su nombre lo indica, el peso molecular es una medida del peso de una molécula con respecto a un patrón de referencia, el cual para todo propósito práctico se escoge como el peso de un átomo de hidrógeno, y que puede tomarse como la unidad. En consecuencia, el peso molecular de una sustancia es un número que representa en forma aproximada, el número de veces que el peso de la molécula en cuestión excede el peso de un átomo de hidrógeno. Puede decirse entonces que la relación constitutiva de Newton describe bien el flujo de fluidos cuyas moléculas tienen pesos moleculares máximos de 1 000, aproximadamente. Sin embargo, cuando las moléculas de un fluido son muy pesadas, por ejemplo con pesos moleculares mayores de 100 000, la ley de viscosidad de Newton ya no describe adecuadamente el flujo de estos fluidos; las relaciones constitutivas ya no son tan simples, pues dejan de ser instantáneas, aunque todavía pueden ser lineales. A esta clase de fluidos se les llama "no newtonianos".

Quizá el ejemplo más típico y más común de un fluido no newtoniano sea un fluido polimérico. La característica esencial de estos sistemas es que sus moléculas son muy pesadas, con pesos moleculares entre 100 000 y 100 000 000, por eso se les llama *macromoléculas*. Los polímeros tienen gran importancia en la vida y la civilización humanas. Todas las formas de vida dependen de materiales poliméricos como los ácidos nucleicos, las proteínas, los carbohidratos, etc. También desde tiempos remotos muchos materiales poliméricos se han usado para satisfacer diversas necesidades humanas. Entre estos materiales pueden mencionarse la madera, resinas naturales, hules, fibras como la lana, la seda o el algodón, etc. Por otra parte, muchos minerales, como el cuarzo y el diamante, son polímeros inorgánicos y una gran variedad de productos de la industria moderna, como el concreto, la porcelana, las fibras textiles, el vidrio, hules y plásticos, son polímeros puros o están compuestos en gran parte por polímeros. La palabra polímero se deriva de dos vocablos griegos, *polys* que significa muchos y *meros*, parte o unidad. Como su nombre lo indica, las moléculas de un polímero están formadas por muchas unidades o monómeros de bajo peso molecular que se mantienen unidos entre sí por fuerzas intermoleculares muy intensas llamadas *enlaces covalentes*. El proceso mediante el cual estas unidades se unen sucesiva y repetidamente para formar cadenas largas y pesadas (macromoléculas), se llama polimerización (Figura 3).

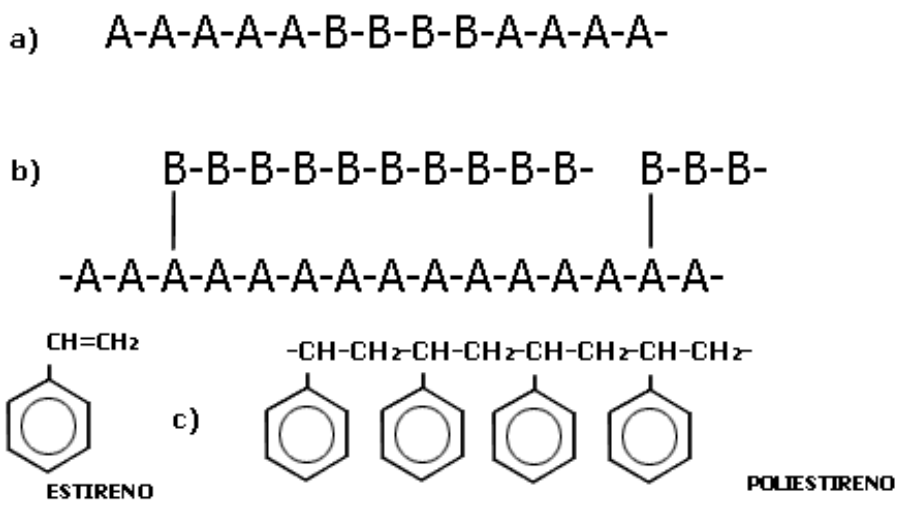

Figura 3. (a) Polimerización lineal, (b) polimerización ramificada, (c) polimerización del estireno.

A diferencia de los fluidos newtonianos, el estudio de la dinámica de los fluidos poliméricos es relativamente reciente, pues se inició alrededor de 1950 motivado, precisamente, por el vertiginoso desarrollo de la industria de los plásticos. Y aunque es un campo de investigación muy activo, aún está en proceso de desarrollo. La dinámica de los fluidos poliméricos pretende, a un nivel macroscópico, construir las relaciones constitutivas apropiadas que permitan describir y entender, por ejemplo, los flujos y fenómenos asociados con las aplicaciones industriales de los mismos. Hemos mencionado, sin justificarlo, que la relación constitutiva lineal de Newton es inadecuada para describir el flujo de líquidos poliméricos. Pero podríamos legítimamente preguntarnos cuál es esta evidencia experimental, cuáles son los hechos bien establecidos que irremisiblemente nos obligan a generalizar la descripción dinámica de los fluidos newtonianos. La respuesta a esta pregunta es que, efectivamente, existen numerosos experimentos que claramente indican que el flujo de los fluidos newtonianos es cualitativamente diferente al de los poliméricos. Veamos gráficamente estas diferencias para lo cual en lo que sigue tomaremos al agua como prototipo de fluido newtoniano.

Todos conocemos el efecto del sifón, lo practicamos al beber un líquido ordinario con un popote: el liquido fluye a través de él en tanto que uno de sus extremos esté dentro del líquido. Para nuestra sorpresa, si en vez de agua tenemos un fluido no newtoniano se observa que el efecto de sifón puede ocurrir aunque el tubo de succión no esté inmerso en él. De modo que un fluido polimérico puede succionarse aun y cuando existan varios centímetros de separación entre la superficie del fluido y el extremo del tubo. A este efecto se le conoce como *sifón sin tubo* (Figura 4).

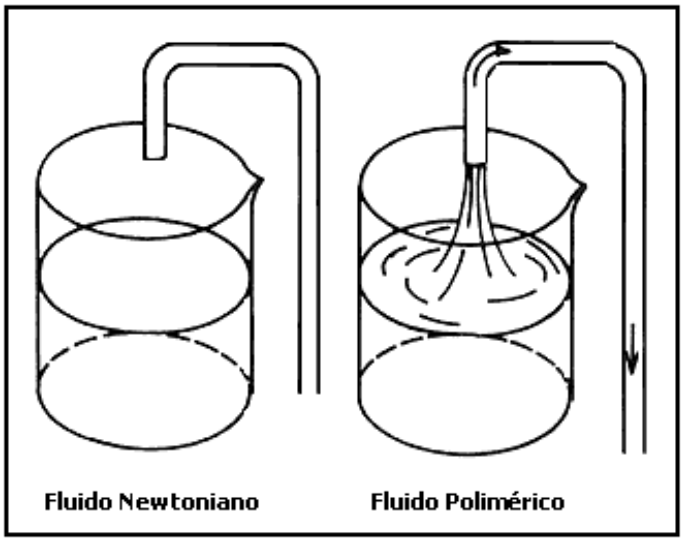

Figura 4. Efecto de sifón.

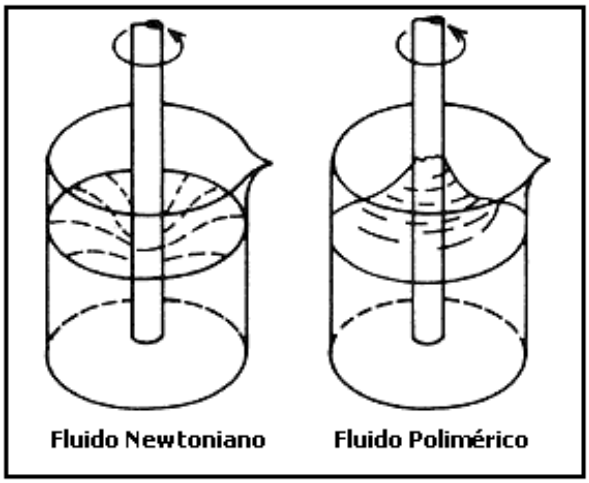

Figura 5. Efecto Weissenberg.

En la figura 5 observamos que si ponemos agua en un vaso de precipitados y lo agitamos a una velocidad moderada con un agitador cilíndrico, en la superficie del agua alrededor del agitador se produce una depresión. En realidad el efecto podría haberse anticipado, pues por la acción del agitador el agua también empieza a girar y la fuerza centrifuga tiende a desplazaría hacia las paredes del recipiente. El resultado neto es acumular fluido en las paredes y producir una deficiencia alrededor del cilindro, la cual se manifiesta en la depresión central. Sin embargo, esta explicación intuitiva es inválida si el fluido es polimérico. En este caso sucede precisamente el efecto contrario: el fluido no sólo se concentra alrededor del agitador ¡sino que también trepa por él! A este fenómeno se le conoce como efecto Weissenberg y fue descubierto por Karl Weissenberg en Inglaterra durante la segunda Guerra Mundial.

Si ahora repetimos el experimento anterior pero haciendo girar en el fondo del vaso un disco de diámetro igual al del recipiente, observamos que la superficie del agua se deprime, en tanto que en el caso del líquido polimérico se produce una protuberancia en su superficie (Figura 6). Una variante de este experimento consiste en hacer girar el mismo disco en la superficie del líquido. Para ambos fluidos observamos que se superponen dos flujos. El flujo primario es tangencial al disco y sigue la dirección de su rotación. Pero el flujo que se superpone a éste, y que llamaremos secundario, es diferente en ambos casos. En el agua, el disco en rotación tiende a desplazar al líquido hacia las paredes y luego, cerca de ellas, realiza un giro hacia el fondo del vaso para finalmente emerger hacia arriba cerca del eje de rotación del disco. En el caso del fluido polimérico, el flujo secundario es idéntico en naturaleza, pero ocurre en sentido contrario: ¡baja por el eje y gira para subir por las paredes!. Este efecto fue

observado por primera vez por C.T. Hill en 1972 (Figura 7).

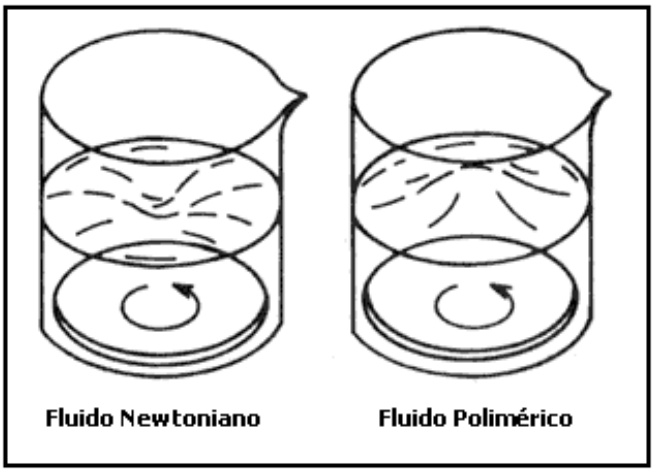

Figura 6. Efecto de depresión superficial.

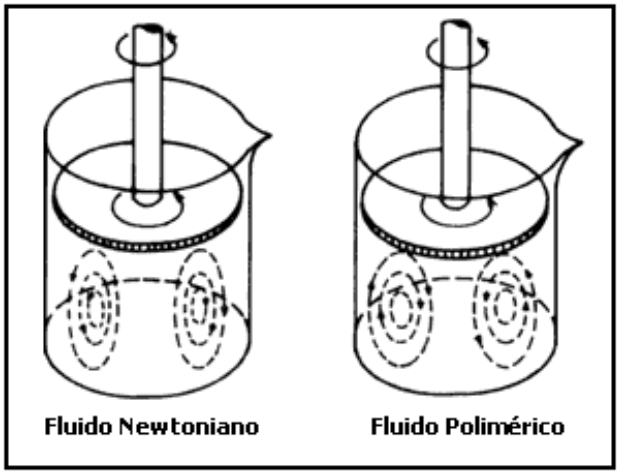

Figura 7. Vórtices interiores.

Una de las diferencias más notables entre los fluidos newtonianos y los poliméricos es que los últimos tienen "memoria". Como ya mencionamos antes, esto significa que la deformación del material a un cierto instante de tiempo depende no sólo de los esfuerzos aplicados en ese instante, sino también de las deformaciones y esfuerzos previos. Esta característica se observa en otro experimento en el que tales fluidos se "bombean" a lo largo de un ducto cilíndrico horizontal.

Imaginemos que ponemos ambos fluidos en tubos de vidrio y que, al momento de introducirlos en ellos, agregamos una traza de colorante para poder observarlos fácilmente. Ahora supongamos que seguimos el movimiento del colorante por un tiempo durante el cual lo fotografiamos, y después apagamos la bomba. Primero vemos que la marca inicial de colorante se deforma, pues el fluido se mueve más rápido en el centro del tubo que cerca de sus paredes. Además, notamos que, en el caso del agua, ésta simplemente se detiene al desconectar la bomba, lo que concuerda con lo que, intuitivamente esperamos, esto es, que al desaparecer la causa que produce

las deformaciones, el fluido ya no se deforma. Sin embargo, no es esto lo que ocurre en el caso del fluido polimérico, donde se observa que aparece un efecto de retroceso, una tendencia a regresar a situaciones previas y gradualmente pasa al estado de reposo. Claramente, esto significa que, aun después de haber desconectado la bomba, el fluido polimérico sigue deformándose, pero ahora en sentido inverso debido a los esfuerzos que se produjeron en tiempos anteriores al de detener la bomba. Esta es una manifestación de la memoria del fluido y en reología se le llama *efecto de memoria desvaneciente*, pues se observa que el fluido no recupera totalmente sus configuraciones previas, lo que significa que la memoria se desvanece (relaja) a medida que el tiempo transcurre. Aquí mostramos gráficamente este efecto en la figura 8, donde los perfiles con líneas oscuras representan, de forma esquemática, el comportamiento del fluido antes de y en el momento de desconectar la bomba.

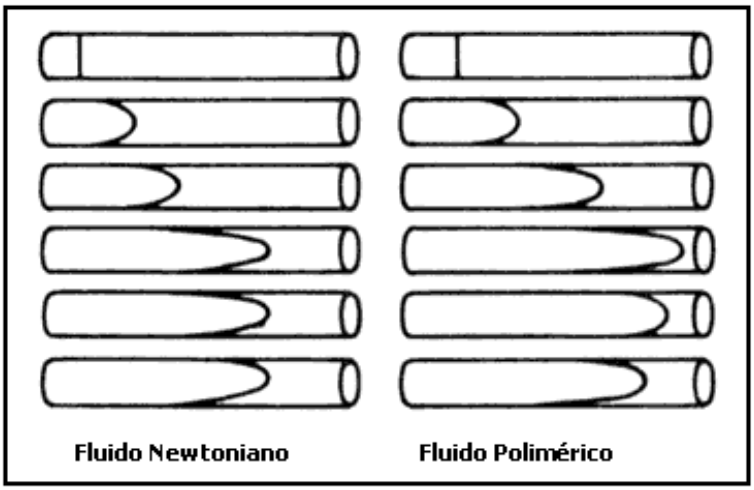

Figura 8. Efecto de memoria.

Otro efecto un tanto sorprendente es el comportamiento que exhibe un fluido polimérico al emerger de un orificio. En el caso del agua, ésta no se expande ni se contrae, pero un liquido polimérico puede "hincharse" y aumentar su sección transversal ¡hasta por un factor de cinco! De hecho, este efecto podemos observarlo fácilmente al oprimir un tubo de pasta dental (Figura 9).

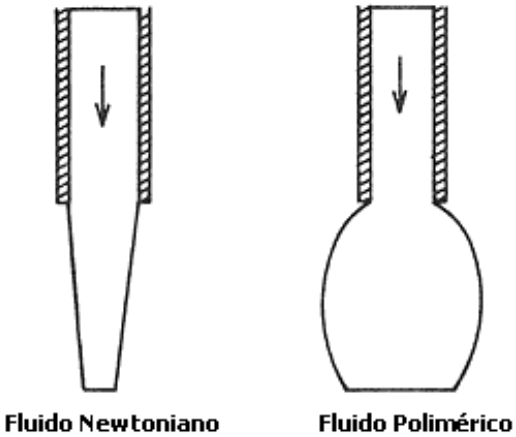

Figura 9. Efecto de hinchamiento.

Pero hay todavía otros efectos, no menos sorprendentes, que son fáciles de observar. Imaginemos que llenamos

con agua un tubo relativamente ancho el cual está conectado por uno de sus extremos a otro tubo de diámetro menor, y que dejamos que el agua fluya lentamente del primero al segundo cuando están colocados verticalmente. En el caso del agua no vemos otra cosa, aparte de que ésta aumenta su velocidad al pasar al tubo más angosto. En cambio, con el fluido polimérico observamos que se forman pequeños vórtices (remolinos) en la vecindad de la conexión entre ambos tubos. Las partículas de fluido atrapadas en ellos nunca caen al tubo menor. ¡Qué magnífico espectáculo sería contemplar una catarata producida por un flujo polimérico! Este efecto se muestra esquemáticamente en la figura 10.

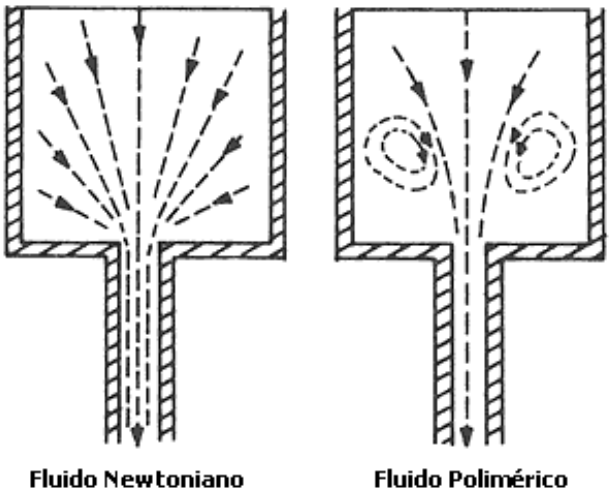

Figura 10. Efectos de vórtice a la salida de un recipiente.

Finalmente, otro efecto no menos impresionante se observa si en un tubo de ensayo que contenga un líquido arrojamos dos esferas, una después de la otra. En el caso del agua observamos que la segunda *siempre* precede a la primera y choca con ella. Inténtelo el lector con dos esferas no muy pesadas. Pero si ahora repetimos la experiencia con un líquido polimérico, ocurre lo mismo si la segunda esfera se arroja inmediatamente después de la primera, pero para cada fluido existe un tiempo crítico después del cual ¡las esferas tienden a separarse mientras caen! Otra vez, el líquido percibe o guarda memoria del efecto producido por la perturbación inicial (Figura 11).

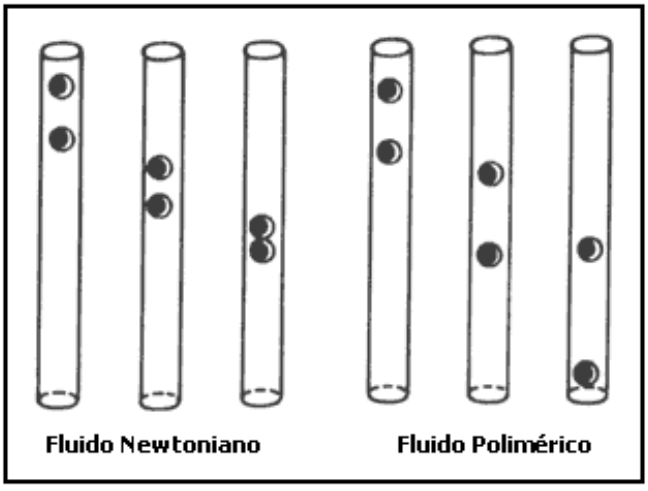

Figura 11. Nuevamente los efectos de memoria.

No debe olvidarse que, además de los polímeros, existen otros fluidos no newtonianos muy importantes como la sangre, diversos tipos de suspensiones o incluso el magma del interior de la Tierra. Estos fluidos también muestran efectos reológicos sorprendentes. Para mencionar sólo uno de ellos recordemos primero que líquidos newtonianos como el agua, el alcohol, el tolueno o una solución de azúcar en agua, tienen viscosidad constante. En consecuencia, la razón temporal de cambio o tasa de sus flujos es directamente proporcional a la presión que los hace fluir de acuerdo con la ley de viscosidad de Newton. En contraste con este comportamiento, se observa que cuando se hace fluir sangre por un tubo, al duplicar la presión la tasa de flujo no se duplica sino que se incrementa en forma no lineal por un factor de 3 o 4. En otras palabras su viscosidad es menor cuando la sangre fluye a bajas presiones.

Todos estos experimentos ilustran un punto crucial: frente a las mismas causas la respuesta de un fluido polimérico es *cualitativamente* diferente a la de un fluido newtoniano. La reologia ha comprobado que estas diferencias de comportamiento dinámico pueden entenderse y explicarse cambiando tanto la relación constitutiva lineal de Newton como las ecuaciones de Navier-Stokes. Aquí vamos a intentar explicar someramente, y sin recurrir a ningún artificio matemático, cómo se procede para lograr este fin. Por un momento siéntase el lector "una partícula de fluido". Dotado de unos buenos tanques de oxígeno y sin aletas déjese arrastrar por la corriente. Otras partículas del fluido lo perturban alterando su velocidad con el tiempo, tanto en dirección como en magnitud. Como cualquier otra partícula del fluido, usted también tiene una masa finita, de modo que podemos hablar de cuánta masa, cuánto ímpetu (igual a masa por velocidad), qué tanta energía cinética (masa por el cuadrado de la velocidad) y cuánta energía de cualquier otra índole, que llamaremos energía interna (usted se desgastará por chocar con otras partículas, al vencer la resistencia que le oponen sus vecinos al moverse por el fluido, etc.), transporta o carga sobre sus espaldas en el transcurso del tiempo. Bueno, pues usando principios muy generales de la física, se pueden obtener las llamadas ecuaciones de conservación de todas estas cantidades: en ausencia de fuentes y sumideros, la masa y la energía se conservan, y en ausencia de fuerzas externas el ímpetu se conserva. Pero estas ecuaciones tienen cinco variables: las que usted "partícula de fluido" porta consigo mismo, la masa, el ímpetu y la energía. Pero resulta que en las correspondientes ecuaciones hay catorce incógnitas.

Si por el momento despreciamos efectos térmicos, esto es, pérdida de calor, y suponemos que la temperatura es constante, todavía nos quedan diez incógnitas y cuatro ecuaciones, una para la masa y tres para el ímpetu (la velocidad es un vector). Luego, entonces, para tener un sistema matemáticamente completo se requiere de seis ecuaciones adicionales. Estas ecuaciones constituyen la forma más general en que puede expresarse la fórmula de Newton que define a la viscosidad, y nos permitiría expresar al *flujo de ímpetu* que aparece en la ecuación, para el ímpetu mismo, en términos de la velocidad. Estas ecuaciones, que describen la respuesta de un medio ante un efecto externo y la expresan en términos de las propias variables que describen el estado del sistema, la velocidad del fluido en éste caso, son las *ecuaciones constitutivas*.

Pues bien, el reto en el caso de los fluidos poliméricos radica precisamente en encontrar cuáles son las relaciones constitutivas para condiciones de flujo bien definidas. Estas ecuaciones deben reflejar todas las características que encontramos en los experimentos anteriores y muchas más que hemos omitido. Sólo para ilustrar el grado de dificultad del problema pensemos en un fluido polimérico con memoria desvaneciente. Supongamos, para facilitar las cosas, que el flujo es isotérmico, lo que significa que la temperatura es constante y pueden despreciarse los efectos causados por la generación de calor. La relación constitutiva correspondiente, aun en el supuesto caso de que subsista una relación entre causa y efecto, ya no puede ser instantánea, esto es, válida en cada instante de tiempo. En efecto, si a un tiempo inicial $\mathbf{t_0}$ perturbamos al fluido, el electo de esta perturbación se dejará sentir en todo tiempo posterior t mayor que $\mathbf{t_0}$ hasta desvanecerse por completo después de transcurrido un cierto intervalo de tiempo, llamado *tiempo de relajación*, del sistema. Durante todo intervalo, el fluido recoge la información de cómo se propaga la perturbación hasta que el efecto desaparece. Esto conduce a expresiones matemáticas que son no locales en el tiempo, es decir, no son instantáneas y se conocen como funciones de memoria. Su obtención y la caracterización de sus propiedades matemáticas constituye uno de los grandes problemas de la reología.

Sin embargo, en la mayor parte de los procesos industriales la mayoría de los problemas que se presentan se complican por la presencia de transferencia de calor. Esto implica que la ecuación de conservación de energía debe acoplarse con la del ímpetu y la de masa, de manera que la complejidad física inherente a la estructura de las ecuaciones constitutivas aumenta considerablemente. ¡Y no digamos el problema matemático resultante! Los

efectos de la temperatura en estos procesos reológicos apenas comienzan a explorarse y debemos esperar en estos campos un progreso considerable en un futuro cercano.

Antes de cerrar este capítulo es pertinente hacer una breve consideración sobre el aspecto molecular de los fluidos poliméricos. Con esto queremos decir cómo interpretar sus sorprendentes características descritas antes y cómo poder deducir las relaciones constitutivas que los gobiernan a partir de las leyes que rigen el comportamiento de los átomos o moléculas que los forman. Si la arquitectura de los sólidos y líquidos simples ya es un problema complicado , en el caso de los polímeros esta complicación se acrecienta enormemente.

A nivel molecular (microscópico) hay diferencias importantes entre los fluidos newtonianos, compuestos por moléculas pequeñas, y los fluidos macromoleculares o poliméricos. Diversas características de la arquitectura macromolecular influyen y determinan sus propiedades de flujo. Entre ellas la primera, que ya hemos mencionado, es el gran peso molecular de las moléculas que los componen. En segundo término debe señalarse que rara vez los monómeros que componen un polímero tienen el mismo peso molecular, más bien son mezclas que tienen una distribución de pesos moleculares. El hecho es importante, pues se observa que las propiedades reológicas son muy sensibles a esta diversidad de pesos moleculares. Otra característica esencial es que, aun sin fluir, las moléculas poliméricas pueden adoptar un número enorme de configuraciones, y como el flujo las altera estirando o alineando las moléculas, los cambios de configuración a su vez influyen en las propiedades en flujo. Cuando las concentraciones de polímero son altas, las moléculas forman redes muy enmarañadas cuya configuración cambia con el tiempo y con las condiciones de flujo. Puede uno imaginarse que tal entrecruzamiento dinámico de moléculas poliméricas se asemeja a un barril lleno de serpientes excitadas que se mueven y se enredan entre sí. En esas condiciones, para poder separarse unas de otras las moléculas, como las serpientes, deben "reptar", es decir, deben seguir trayectorias tortuosas, lo que produce una viscosidad grande y dependiente de la longitud del polímero. Esta comparación también permite intuir que los efectos de memoria aparecen porque a las moléculas enmarañadas les toma tiempo ajustarse o responder a la acción de un esfuerzo, por eso su respuesta no es instantánea.

Estudiar microscópicamente estos sistemas no es tarea fácil, pero el ingenio no conoce límites y se ha podido desarrollar una teoría cinética (microscópica) de los fluidos poliméricos, representados, modestamente, por un conjunto de cuentas y resortes. Los primeros representan las unidades químicas que componen el polímero y las segundas las fuerzas que las unen (Figura 12). No es el presente libro el lugar apropiado para intentar explicar algunos detalles de esta teoría; baste decir que, a pesar de lo poco refinado del modelo, los resultados hasta ahora obtenidos son lo suficientemente razonables como para indicar que por lo menos el camino escogido es el correcto. Es un campo fascinante de investigación de frontera, no sólo por la concepción misma de establecer una correlación teórico-experimental de las propiedades fisicoquímicas de aquellos sistemas, sino además porque constituyen la base de muchos procesos biológicos e industriales. Todavía se requiere de mucha investigación de avanzada para poder resolver los problemas relacionados con el procesamiento de los plásticos, para mejorar la acción de los lubricantes, de las pinturas o para entender el movimiento de los fluidos biológicos. Todos ellos son retos para el futuro.

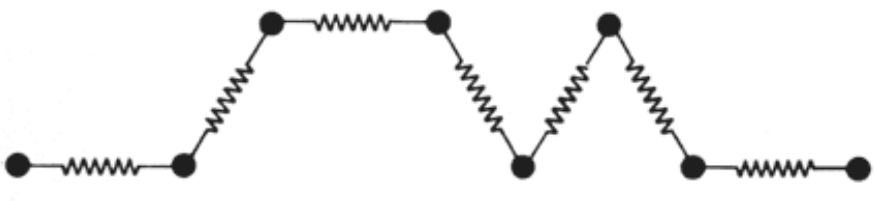

Figura 12. Modelo de una cadena polimérica lineal y flexible.

[Nota 1] [<--

Bajo éste título Eliezer Braun ha escrito un excelente libro en esta misma colección (vol. 26)

Inicio

II. FLUIDOS MULTIFÁSICOS

EN EL capítulo anterior hemos presentado un conjunto de sistemas, algunos de los cuales verdaderamente podemos llamar fluidos o líquidos, y otros que, sin serlo estrictamente, se comportan como tales y exhiben características o propiedades singulares si se les compara con los líquidos ordinarios como el agua, el aire el alcohol, etc. Por esta razón su comportamiento merece el calificativo de *exótico*. Pero en la naturaleza existen gran variedad de fenómenos en los cuales intervienen líquidos que *per se* no son necesariamente exóticos, pero que, al entrar en contacto con otro sistema, que puede o no ser un líquido, dan lugar a un comportamiento que bien pudiera calificarse como tal. Vierta el lector el contenido de una botella de cerveza en un tarro y observe la formación caprichosa de la espuma. La cerveza no es por sí misma un líquido exótico (¡aunque el bebedor, si la ingiere en grandes cantidades, puede llegar a serlo!), pero la espuma, que no es un líquido ni un gas, sino una "interfase" caprichosa de ambos, sí tiene rasgos que bien pueden calificarse de exóticos. ¿Qué es la espuma?, ¿es posible definirla o caracterizarla de algún modo?

Veamos otro ejemplo. Tómese un poco de aceite, como el lubricante que usamos en los automóviles, y colóquese en un frasco. Agreguemos otro tanto de agua y agitemos. Lo que se forma es una mezcla caprichosa, medio blancuzca, que al contacto con la luz arroja destellos multicolores, y que al dejarla reposar se va nuevamente separando en el aceite y agua originales. Bueno, ¡casi!, porque en medio queda una pequeña capa, que llamaremos nuevamente interfase, que ni es agua ni es aceite, sino un residuo de la mezcla original. Algunas veces llamamos a estas mezclas *emulsiones*. Unas son estables, lo que quiere decir que no se separan en sus componentes en intervalos de tiempo cortos, horas, días, quizá meses, y otras, como la formada por el agua y el aceite, son menos estables. Son mezclas exóticas, ¿o no?. Lógicamente surgen preguntas como ¿qué es una emulsión?, ¿cómo la caracterizamos físicamente?

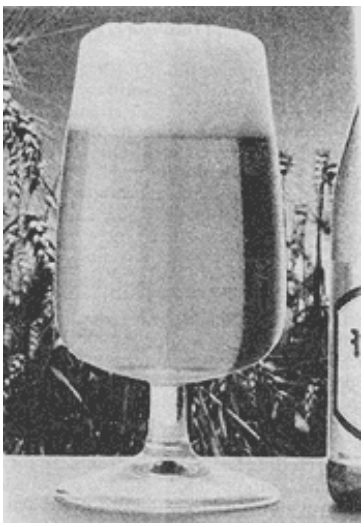

Foto 1. Vaso con espuma de cerveza.

Veamos un último ejemplo. ¿Qué le gustaría seleccionar al lector, un trozo de mantequilla, uno de queso, la tinta contenida en el tintero y que estamos usando para escribir, la pintura labial o la pintura vinílica, un litro de aire de la ciudad de México, etc.? ¿Qué tienen en común estos sistemas? A primera vista nada. Unos parecen líquidos, otros juraríamos que son sólidos y el aire contaminado, un gas, naturalmente. Y, sin embargo, sí tienen algo en común: todos los sistemas nombrados están formados por agregados de partículas muy finas cuyas dimensiones son mucho mayores que las atómicas, pero muy pequeñas para ser percibidas a simple vista.

Además, están aglutinadas entre sí de alguna manera y genéricamente se conocen con el nombre de "coloides" (del griego *kola* significa pegamento y *eldos* forma). La ciencia de los coloides representa hoy en día una de las ramas más importantes de la fisicoquímica por razones que, en función de los sistemas arriba mencionados, puede el lector fácilmente adivinar. Es interesante señalar que los alquimistas de la Edad Media ya conocían un coloide

conocido como "oro potable", formado por una suspensión de partículas muy finas de oro y que tenía usos medicinales.

Tanto las emulsiones como la espuma y los sistemas referidos en los párrafos anteriores, forman parte de un gran mundo al que nos referiremos como el estado coloidal (Tabla 1).

TABLA 1. Diferentes tipos de dispersiones coloidales

Medio dispersor	*Fase dispersa*		
	Gas	*Líquido*	*Sólido*
Gas	----------	Nieblas y nubes	Humos
Líquido	Espumas { Cerveza Crema batida	Emulsiones { Mayonesa Leche	Sols { Azufre en agua Oro en agua
Sólido	Espuma sólida (Hule espuma)	Gels gelatinas.....	Suspensiones sólidas (algunos plásticos)

Tratemos de entender un poco más este mundo. Si ponemos sal o azúcar en agua y agitamos, ambas desaparecen (siempre y cuando la cantidad de sal o azúcar no sea excesiva) y decimos que se han "disuelto" en el agua, que han formado una *solución.* En realidad lo que ocurre es que los átomos que forman la sal, unos de sodio y otros de cloro, se combinan con el agua para formar una sola entidad a la que llamaremos un ion. Esta imagen es un tanto burda, pero servirá a nuestro propósito de poner un ejemplo claro. Si, por otra parte, ponemos almidón en agua y agitamos, ante nuestra vista aparece un líquido blanco, opaco, que en realidad está formado por una minada de partículas de almidón suspendidas en el agua: no se forman unidades (iones) como en la solución. Hablamos, entonces, de una suspensión: un gran número de medicamentos, pinturas, shampoos, etc., son suspensiones, de allí la necesidad de agitarlas antes de usarlas. Bien, un sistema coloidal está formado por una suspensión formada por partículas cuyo tamaño oscila entre 0.2 micras y 5 milimicras [No *i.e.*, no son visibles con un microscopio ordinario. En términos más técnicos, un coloide es una dispersión de partículas muy finas de un sistema en el seno de otro, que usualmente es un gas o un líquido. Ahora podemos visualizar mejor lo antes dicho.

En efecto, el smog, el humo de un cigarro o de una chimenea, están formados por partículas sólidas dispersas en un gas, el aire. Pero la niebla o las nubes son sistemas formados por la dispersión de pequeñísimas gotas de un líquido, agua, en un gas, el aire. La emulsión de agua y aceite es una dispersión de un líquido en otro líquido y finalmente la espuma consiste de pequeñísimas burbujas de gas, el bióxido de carbono de la cerveza, que se dispersan en el líquido. Y el lector podrá ponerse a meditar sobre la enorme cantidad de estos sistemas que usamos cotidianamente: cremas de afeitar, shampoos, desodorantes, insecticidas, etc. Sobra, pues, insistir de nuevo en la importancia tecnológica de la ciencia de los coloides.

Si bien no todos los coloides nos pueden parecer muy exóticos, hay algunos que sí lo son. Empezaremos por mencionar un caso de todos más que conocido: el del jabón. Este material que utilizamos todos los días es un coloide que además, sobra decirlo, produce espuma. Pero quién en su niñez no gozó una propiedad extraordinaria de los jabones: jugar con una solución acuosa de ellos haciendo, mediante un arillo metálico, pompas de jabón. ¿Quiere el lector intentarlo otra vez? Una excelente composición para hacer pompas de jabón muy estables es la siguiente: mézclense 28.2 gramos ácido oleico que puede conseguirse con relativa facilidad, 100 mililitros de sosa

cáustica (NaOH), 300 mililitros de glicerina y 1 200 mililitros de agua. El observar los bellos colores que por interferencia de la luz se forman en la película es por sí sola una buena razón para hacer el experimento, y también para comprobar que estas películas, por lo menos en cuanto a su colorido, son un tanto exóticas. Sin embargo las espumas, como en el caso de la cerveza, el jabón, la crema de afeitar, etc., no siempre son tan agradables ni deseables. ¡Imagínese el lector lo que pasaría en los cilindros del motor de su automóvil si al ponerlo a funcionar el aceite produjera espuma! Posiblemente su acción lubricante se vería mermada y el desgaste de las piezas aumentaría considerablemente. Así pues, en muchos casos semejantes ciertos agentes estabilizadores deben agregarse a un material para evitar la formación de espuma. En efecto, una descompostura frecuente de los motores es que debido al excesivo calentamiento se deforman algunas de las juntas entrando en contacto el agua del sistema de enfriamiento y el aceite del motor. ¡Así que goce Ud. de la espuma de su cerveza o de la espuma del jabón, pero tenga cuidado de poner el aceite adecuado al motor de su automóvil y de evitar el sobrecalentamiento!

Sin embargo, no todas las espumas son nocivas y vale la pena detenernos un momento para decir cómo se fabrican y mencionar algunos de sus usos más comunes. La forma más socorrida, y también la más cara, de generar una espuma es la que se observa al abrir una cerveza y verterla en un vaso, el método de los aerosoles. Está basado en la presencia de un líquido espumoso, agua por lo común, y un agente que induzca la formación de espuma, casi siempre un gas disuelto en el líquido a presión alta. En la cerveza y los refrescos gaseosos, el agente que induce la formación de espuma es el bióxido de carbono ($\mathbf{CO_2}$).

El agua se pone en presencia de una sustancia que tenga la propiedad de inducir un cambio energético favorable que aumente el área superficial, permitiendo así que las moléculas del agente espumante pasen por el líquido y formen la interfase gas-líquido característica de la espuma. A esta sustancia se le llama un *surfactante*, ya que se acumula en la superficie induciendo la formación de espuma. En otro método muy usado, el líquido espumoso y un gas se fuerzan a fluir a través de una columna empaquetada con obstáculos como bolitas de vidrio o de acero inoxidable. En la superficie de estos obstáculos se forman películas delgadas de líquido que el gas infla para formar burbujas. También se puede formar espumas de baja densidad usando generadores de aspiración de aire mecánicos o de otra índole. En los últimos, el líquido espumoso se rocía sobre una malla de metal perforado sobre la cual sopla un generador de aire, en tanto que en los primeros el flujo de aire requerido para hacer la espuma está inducido por el propio *spray* o rociador del líquido.

Para terminar esta breve introducción a las espumas, sólo diremos que uno de sus principales usos se encuentra en los extinguidores de incendios, que seguramente los lectores habrán observado muchas veces. La sabiduría popular dice mucho al respecto, pues los taxistas utilizan con frecuencia una "Coca-Cola" familiar como extinguidor. Los perforadores de pozos de petróleo y de gas saben que las espumas les son útiles de muchas maneras, por ejemplo para extraer agua o azufre de un pozo inyectándole un surfactante y extrayéndola como espuma o para penetrar en formas geológicas de baja presión mediante un principio y una técnica muy largas de explicar aquí y otros usos similares.

Regresemos ahora a nuestra exposición general sobre los coloides, de los cuales las espumas son sólo un caso particular. En general hay dos clases de coloides, los *liófilos* o amantes de solventes y los *lifóbicos* o repelentes de solventes. A los primeros se les suele llamar *geles* y a los segundos *sols*. Los coloides liofílicos son sustancias que ordinariamente son solubles y se forman permitiendo que el solvente permanezca en contacto con el material sólido. Tal es el caso de la gelatina en presencia de agua (¡un poco caliente!). Los coloides liofóbicos son insolubles, pero pueden "dispersarse" en el solvente usando métodos artificiales. Los ejemplos que dimos al inicio de éste capítulo, como algunas medicinas, pinturas, el azufre, etc., dan lugar a los sols. Por ejemplo, una solución de látex de hule se utiliza para formar artículos de hule espuma de formas complejas, como guantes de hule. Este proceso está basado fundamentalmente en la distribución que tienen las cargas eléctricas en las partículas que forman el coloide, las cuales, en presencia de campos eléctricos, exhiben migraciones muy especificas y complejas que inducen una cierta estabilidad a la suspensión coloidal, la cual permite "conformar" al coloide en un momento dado. El estudio de los gels y sols es de gran actualidad por la enorme importancia que tienen en una multitud de procesos industriales, muchos de ellos sugeridos por los ejemplos que hemos mencionado aquí. El lector interesado en el tema puede consultar alguna de las lecturas generales sugeridas en la bibliografía, o a un nivel más elevado, cualquier texto de fisicoquímica que tenga un capítulo intitulado "coloides".

Foto 2. Burbujas en aire.

Como ejemplo final de uno de los temas más sorprendentes hoy en día y cuyos patrones son verdaderamente exóticos e inmensamente bellos, hacemos una digresión sobre un fenómeno aparentemente muy simple, el mezclado de dos fluidos. Ya hablamos de cierto tipo de mezclado en los párrafos anteriores, cuando estudiamos las emulsiones. Ahora trataremos un fenómeno ligeramente diferente. Un buzo provisto de un tanque con aire se sumerge en el agua de un lago de aguas tranquilas. Al respirar expulsa aire en forma de burbujas que ascienden a través del agua. Si hemos sido un poco curiosos y hemos tenido la ocasión de presenciar este acto, quizá hayamos observado que las burbujas adoptan formas curiosas al combinarse e interactuar entre ellas de manera un tanto compleja. Muy a menudo este fenómeno es difícil de apreciar por la dificultad de observar las burbujas en tal circunstancia. Este fenómeno fue estudiado con gran meticulosidad por el ingeniero naval inglés Henry-S. Helen-Shaw en el siglo pasado.

El dispositivo un tanto ingenioso utilizado por este investigador —el llamado celda de Hele-Shaw— consiste de dos placas paralelas, transparentes y separadas por una distancia muy pequeña, casi una rendija, y con un separador que corre a lo largo de las orillas de las placas para mantenerlas separadas y evitar la fuga del líquido entre ellas, que, usualmente, es muy viscoso, como la glicerina, y puede ser bombeado hacia adentro o hacia afuera del espacio entre las placas por una jeringa o una bomba pequeña. Si ahora se inyecta un fluido menos viscoso como el aire, en el centro de uno de los extremos al espacio abierto, la glicerina sufre un desplazamiento un tanto curioso. Se forma una burbuja de aire que, con el tiempo, germina en una serie de "dedos" o extremos protuberantes, efecto que se conoce como *digitación viscosa* (Figura 13).

El fenómeno de la digitación viscosa tiene actualmente enorme importancia, no sólo tecnológica sino también científica. Respecto a la primera podemos citar varios ejemplos. Para los geólogos y los ingenieros petroleros es bien conocido el problema de extraer el crudo almacenado en yacimientos formados por rocas porosas, en donde cada pozo funciona más o menos como una celda de Hele-Shaw. Al inyectar agua, vapor u otro líquido no miscible, de menor densidad, el agua desplaza, en principio, al petróleo hacia la superficie y la eficiencia de la extracción depende en gran medida de la digitación viscosa. En efecto, si la presión es alta, entre otras cosas se forman grandes "dedos" de agua dentro del petróleo, lo cual hace que éste salga en menor proporción y, además, mezclado con agua. De ahí que el conocimiento de los detalles de la digitación viscosa sea importante para el proceso. Los primeros experimentos sobre este fenómeno, en el caso de aceite y agua, fueron realizados hace poco más de treinta años en Inglaterra, por Geoffrey I. Taylor y P.G. Saffman, y siguen siendo motivo de estudio.

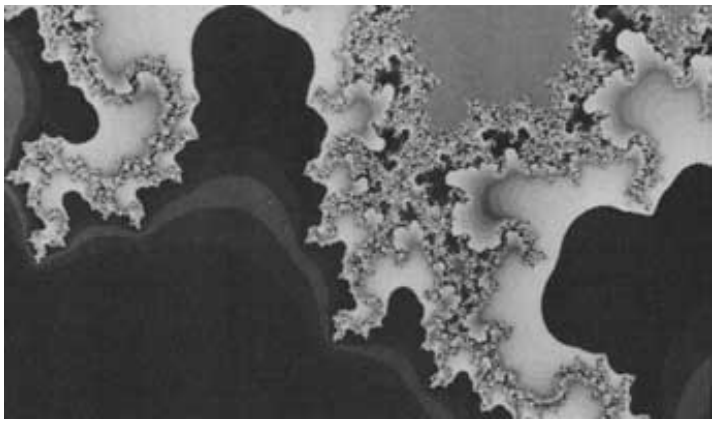

Figura 13. Digitación viscosa.

En otras áreas de la ingeniería ocurren efectos muy similares, sobre todo en aquellas en las cuales el concepto de mezcla tiene conotaciones vagas. En ingeniería química, por ejemplo, se confía mucho en que un mezclado efectivo permita que varias sustancias reaccionen químicamente entre sí de manera eficiente para que los productos, cualesquiera que éstos sean, exhiban las propiedades deseadas. Sabemos o creemos saber que la mezcla de café con crema es relativamente simple, pues produce un líquido aparentemente sencillo, de color uniforme. Esto es en general cierto cuando agitamos con una cuchara, pero inténtelo el lector con dos líquidos más viscosos, por ejemplo dos tipos de pinturas vinílicas, y ¡oh sorpresa!, el mezclado ni es tan uniforme ni tan simple. Podemos inclusive plantear la pregunta sobre lo que diferentes investigadores entienden por mezclar: los oceanógrafos y geofísicos usan el término revolver, que tiene la connotación de homogeneidad; en la ingeniería de polímeros se usa la expresión combinar y muchos ingenieros recurren al término agitar. Todos aparentan ser sinónimos, mas un poco de reflexión nos hace ver que no es el caso. En la figura 14 vemos rastros característicos de un mezclado de fluidos viscosos en una roca magnética que contiene dos magmas diferentes y que en realidad es una revoltura y no una mezcla homogénea.

La combinación de dos polímeros o fluidos viscoelásticos resulta en patrones como los ejemplificados en la figura 15, que es una combinación de estireno con polibutadieno. A estos compuestos se les llama hoy en día compositos y sus propiedades son un tanto versátiles como se muestra en las figuras 16 y 17. En estos casos agitar, como en el ejemplo del café con crema y las pinturas vinílicas, no conduce necesariamente a un resultado final unívoco.

Figura 14. Mezclado en una roca magnética con dos magmas diferentes. (foto Jorge Luyidán, UAM-I).

Pero, ¿qué tiene de exótico el mezclado? La respuesta aún no satisfactoria, está ligada al concepto de "movimiento" en un fluido, según fue concebido por vez primera por el famoso matemático suizo Leonardo Euler. El movimiento de un fluido es la concepción matemática que expresa en qué punto del espacio se encontrará una "partícula" de un fluido después de transcurrido un cierto intervalo de tiempo. Así, si pudiéramos conocer este movimiento para un flujo dado, por ejemplo un flujo lento en un canal estrecho, conoceríamos en

principio todo lo que es necesario conocer acerca del "mezclado" que este flujo produce. En los pocos casos en que este proceso se ha podido estudiar, con el uso de poderosas computadoras, se ha podido exhibir dos características un tanto singulares: el proceso de mezclado es un fenómeno no lineal y segundo, está íntimamente conectado con dos conceptos que desempeñan un papel determinante en la descripción de fenómenos no lineales. El primero es el concepto geométrico denominado *fractal* y el segundo un concepto estrictamente dinámico al que hoy nos referimos como *caos*. ¡Y ambos exhiben patrones "exóticos"! El tema central de este capítulo no versa sobre ellos, de hecho necesitaríamos *todo* el espacio de un tomo de esta serie para hacerlo, mas para que el lector se forme una idea de ellos, en la figura 18 ilustramos un fractal, producido por simulación en una computadora, del proceso de digitación viscosa formado por la propagación de una gota de aire en glicerina.

En la figura 19 mostramos el patrón de un flujo turbulento (caótico) que, como se aprecia, genera estructuras un tanto caprichosas. Este flujo puede concebirse como estructuras fractales superpuestas que incluyen el concepto de remolinos.

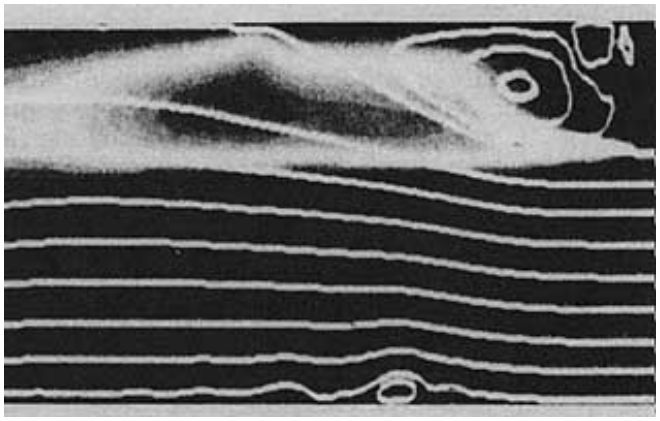

Figura 19. Patrón de un flujo turbulento.

Aunque hoy se tiene la tendencia de afirmar que los fractales y el caos forman o integran una nueva ciencia, el lector debe ser muy precavido. Los primeros son estrictamente entes geométricos de estructura caprichosa, "exótica", cuyas propiedades han servido para imitar, sobre todo con base en simulaciones con computadoras, una variedad enorme de formas naturales, como copos de nieve, perfiles de costas, depósitos de metales en electrodos, descargas eléctricas, etc., pero carecen de contenido físico. Por otra parte, el caos es un fenómeno que se ha detectado desde hace más de cien años y se origina en las propiedades de las soluciones de ecuaciones diferenciales de sistemas dinámicos bien conocidos, y que surgen de las condiciones matemáticas impuestas o requeridas en la obtención de dichas soluciones; o bien, provienen de efectos no lineales que aparecen en ellas debido a las características intrínsecas del fenómeno en cuestión.

Figura 15. Combinación de dos polímeros. Contribución del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Industrias Negromex S.A. foto: Víctor Castaño.

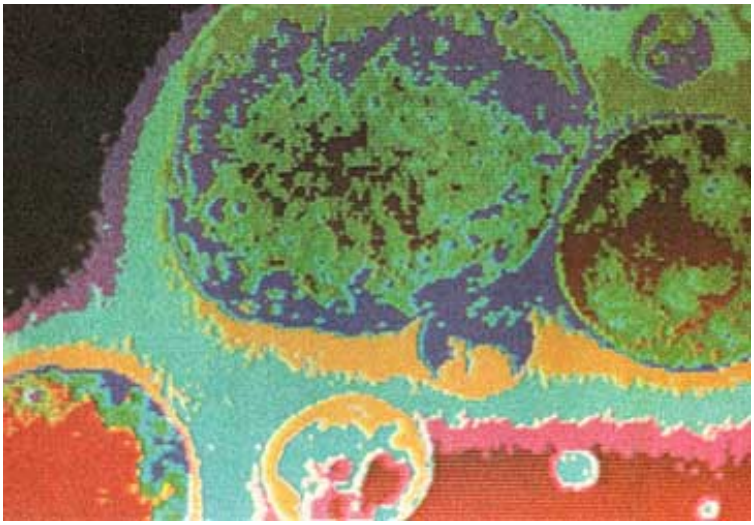

Figura 16. Ejemplo de composito. Contribución del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Industrias Negromex S.A. foto: Víctor Castaño.

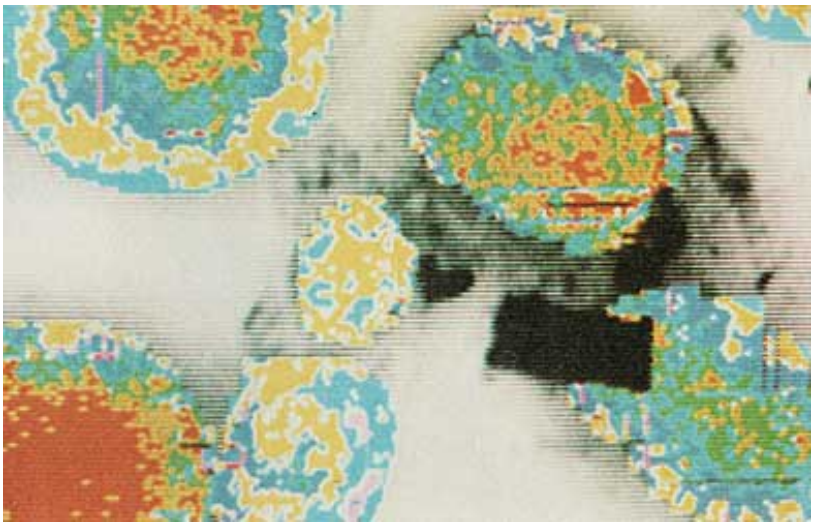

Figura 17. Ejemplo de composito. Contribución del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Industrias Negromex S.A. foto: Víctor Castaño.

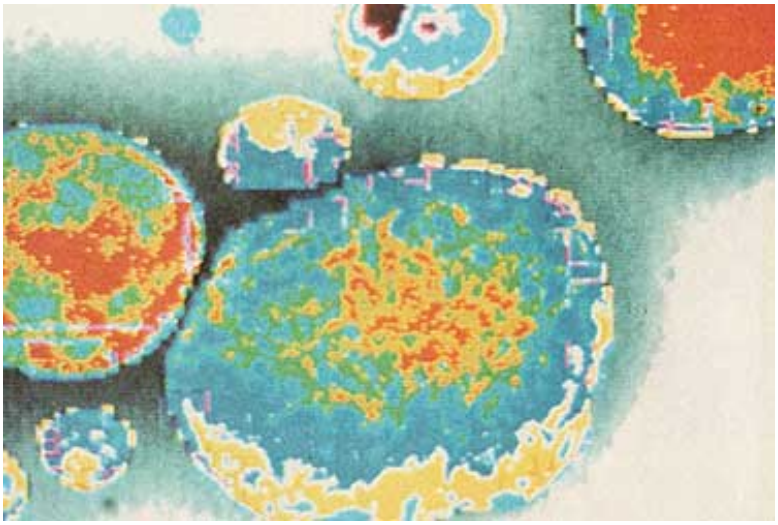

Figura 18. Ejemplo de fractal. Contribución del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Industrias Negromex S.A. foto: Víctor Castaño.

[Nota 2] [<--

Una micra, denotada por m es igual a una millonésima parte de un metro (10-6m), o bien, es igual a una cienmilésima parte de un centímetro (10-4cm). Una milimicra es la milésima parte de una micra (i mm = 10-9m).

III. CRISTALES LÍQUIDOS

CON toda razón le habrá parecido contradictorio el título de este capítulo. En efecto, por una parte llamamos líquido a una sustancia que fluye y toma la forma del recipiente que la contiene; pero, por otra, a un cristal lo concebimos como sustancia sólida y rígida. De modo que, al menos intuitivamente, ¡un cristal es precisamente lo opuesto a un líquido! Y sin embargo existen sustancias reales, los cristales líquidos, que exhiben la dualidad sólido-líquido, es decir, que, simultáneamente, poseen propiedades de los líquidos, fluidez y viscosidad, y propiedades ópticas que se parecen de modo asombroso a las de los cristales como, por ejemplo, poder reflejar colores diferentes dependiendo del ángulo bajo el cual se les observe.

En los últimos treinta años se ha descubierto que estas sustancias ocupan un lugar único en la naturaleza. Así, se sabe que los cristales líquidos desempeñan un papel fundamental en los organismos vivos, pues el DNA forma diversas fases líquido cristalinas; también se les utiliza para fabricar dispositivos electrónicos, como los indicadores electro-ópticos que muestran letras y símbolos diversos en las calculadoras de bolsillo o en las carátulas de los relojes electrónicos modernos (Figura 20).

También han permitido fabricar pantallas de TV extraordinariamente delgadas y hacen posible el desarrollo de ventanas o cortinas que con sólo accionar un interruptor se hacen transparentes o totalmente opacas (Figura 21).

Estos líquidos tan peculiares son también esenciales para fabricar nuevos materiales, entre ellos fibras de muy alta resistencia y son de gran utilidad en la recuperación del petróleo. Y la lista de las aplicaciones de estos líquidos exóticos continúa creciendo sin cesar... Pero antes de examinar con más detalle cuáles son las propiedades de los cristales líquidos que hacen posible estas aplicaciones, hagamos un poco de historia.

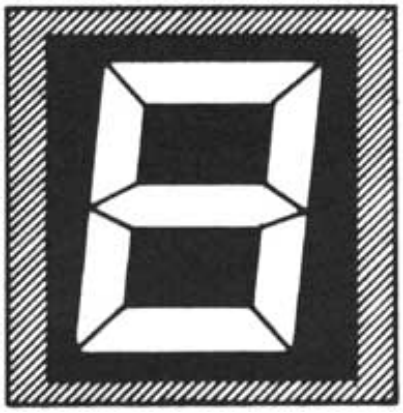

Figura 20. Indicador numérico electro-óptico fabricado con cristales líquidos.

Los cristales líquidos fueron descubiertos hace más de cien años (1888) por el botánico austriaco F. Reinitzer, quien encontró que algunos compuestos orgánicos derivados del colesterol parecían tener dos puntos de fusión. Más específicamente, observó que al calentar los cristales de estas sustancias a 145° C, el sólido se transformaba en un líquido turbio; pero éste a su vez, se convertía en un líquido totalmente claro y transparente precisamente a 179° C. Reinitzer también realizó el proceso inverso y enfrió el líquido transparente observando que exactamente a las mismas temperaturas anteriores ocurrían las transformaciones opuestas. Como además los cambios observados iban acompañados de absorción o emisión de calor, dependiendo de si la temperatura aumentaba o disminuía y, asimismo, como el volumen del sistema cambiaba en forma abrupta, Reinitzer concluyó que la sustancia en realidad exhibía dos cambios o transiciones de fase sucesivas. Al poco tiempo de estas primeras observaciones (1889), el cristalógrafo alemán F. Lehmann descubrió que el líquido turbio intermedio entre los cristales y el líquido transparente poseía propiedades ópticas y una estructura molecular muy parecida a la de un cristal sólido, y acuñó el nombre de *cristal líquido*. Aun sin darse plena cuenta, lo que en realidad habían

descubierto era un nuevo estado de la materia: las fases intermedias o mesofases.

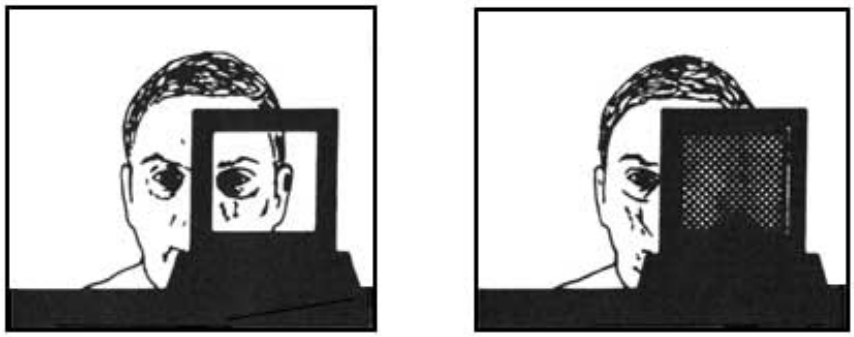

Figura 21. Ventana de cristal líquido con transparencia controlable.

Sin embargo, a pesar de que inicialmente los cristales líquidos despertaron gran interés y fueron muy estudiados durante el primer tercio de este siglo, pronto fueron relegados a un rincón de la física y cayeron rápidamente en el olvido subsistiendo sólo como curiosidad de laboratorio. Diversos factores contribuyeron a esta pérdida de interés, uno de ellos fue el prejuicio, fuertemente arraigado en el hombre desde la remota antigüedad, según el cual las tres nociones: gas, líquido y sólido describen *todas* las posibles fases de la materia. Esta actitud, aún no superada en los años treinta de este siglo, conlleva naturalmente un rechazo a la dualidad sólido-líquido exhibida por los cristales líquidos. En consecuencia no es de extrañar que la aparente ambigüedad en el punto de fusión descubierta por Reinitzer se atribuyera únicamente a la presencia de "impurezas" en el sistema bajo estudio.

Otro factor preponderante fue el gran desarrollo logrado en el segundo tercio de este siglo en otros campos de la ciencia como la física de semiconductores, la química de polímeros, la física atómica o el espectacular desarrollo de la electrónica. Todos estos avances y la entonces falta de aplicaciones prácticas de los cristales líquidos, frenaron y eclipsaron su desarrollo. Pero, paradójicamente, los mismos avances y, de manera especial el proceso de miniaturización de los dispositivos electrónicos, produjeron el renacimiento y auge que los cristales líquidos tienen en nuestros días. En efecto, en este afán de miniaturización la electrónica pasó de los bulbos a los transistores, después a los microcircuitos y finalmente a los circuitos integrados actuales.

Este proceso tuvo como consecuencia importantísima la disminución de las potencias consumidas y, por tanto, la reducción de las fuentes de alimentación energética en aparatos e indicadores electrónicos. Sin embargo, ocurrió algo muy lógico pero que no se había anticipado: al reducir tanto las dimensiones de los dispositivos electrónicos ¡casi se perdió la comunicación con ellos mismos! Cada vez era más difícil transmitir —a bajo costo— la información al hombre, pues los diodos semiconductores emisores de luz consumen grandes corrientes eléctricas y los cinescopios de televisión son demasiado grandes. Faltaba, pues, un puente de comunicación entre lo muy pequeño y el mundo macroscópico. Es entonces, a principios de los años sesenta, cuando los cristales líquidos son recordados y comienza su resurgimiento hasta convertirse en uno de los campos más activos en la investigación científica interdisciplinaria con enormes posibilidades de aplicación tecnológicas.

Pero, se preguntará el lector, ¿qué propiedades físicas son las que hacen tan especiales a los cristales líquidos? y, sobre todo, ¿es posible entender estas propiedades en términos de las nociones más familiares o intuitivas que tenemos de los líquidos ordinarios o los cristales? Para contestar estas preguntas es necesario examinar brevemente las características de la estructura e interacción de las moléculas de un cristal líquido.

Un cristal líquido fluye, se escurre y toma la forma del recipiente que lo contiene, de la misma manera que lo hace un líquido ordinario como, por ejemplo, el agua. Pero a diferencia de ésta, cuyas moléculas son relativamente simples y prácticamente esféricas, las moléculas de un cristal líquido son, por lo general, o muy alargadas en

forma de barra o aplanadas en forma de disco (Figura 22).

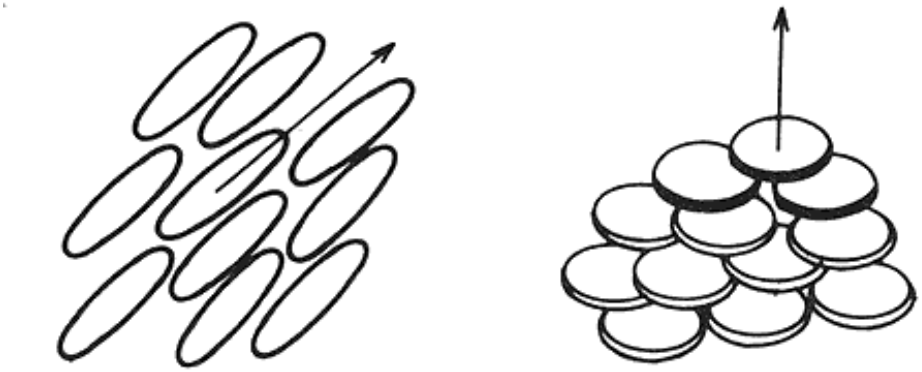

Figura 22. Las moléculas de cristal líquido tienen forma de barras o discos.

Esta asimetría molecular tiene una consecuencia muy importante, los átomos dentro de la molécula se sitúan preferentemente a lo largo del eje de la molécula o bien en el plano definido por la molécula misma, dando lugar a una estructura molecular complicada, según se ilustra en la figura 23.

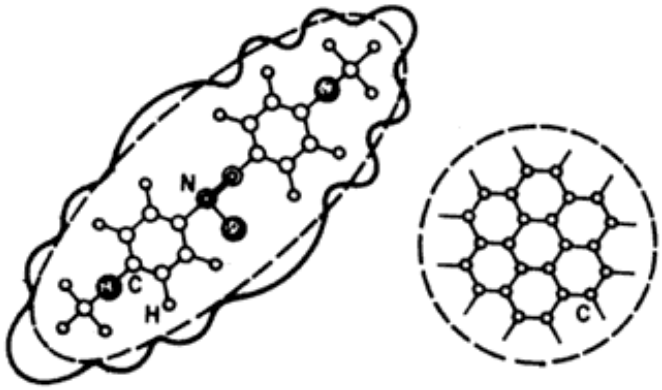

Figura 23. Nubes electrónicas: los enlaces entre los átomos producen una distribución de carga complicada en las moléculas.

Ahora bien, recordemos que cada átomo consta de un núcleo con carga eléctrica positiva rodeado por una nube de electrones con carga eléctrica negativa que compensa exactamente la del núcleo, de manera que los átomos, y por tanto las moléculas, son eléctricamente neutros. Esta disposición de los núcleos y nubes electrónicas produce una distribución de carga bastante compleja dentro de la molécula (Figura 24).

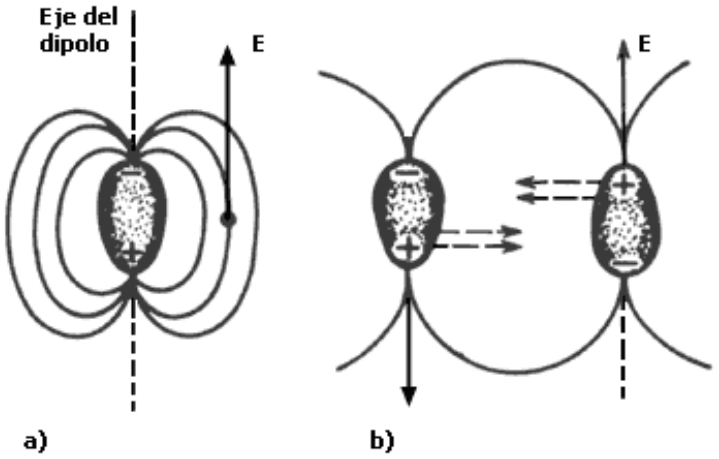

Figura 24. (a) líneas de fuerza del campo eléctrico de un dipolo, (b) fuerzas de atracción entre dipolos.

Pero esta configuración no es estática, sino que cambia cuando dos moléculas se acercan entre sí. En efecto, cuando esto ocurre, las nubes electrónicas son las primeras en entrar en contacto y se repelen por tener cargas del mismo signo, de modo que a distancias comparables con las dimensiones moleculares mismas, las fuerzas intermoleculares son repulsivas y tienden a alejar a las nubes electrónicas y en consecuencia a las moléculas. Pero esta repulsión también produce el desplazamiento relativo de las nubes electrónicas con respecto a sus núcleos. Como esto ocurre en cada átomo, en las moléculas alargadas el efecto neto podemos describirlo imaginando que la presencia de una molécula de cristal líquido produce una distorsión en la distribución de carga eléctrica de la otra molécula, de modo que la carga positiva neta de los núcleos queda separada una cierta distancia de una carga negativa de igual magnitud. Como es sabido, a esta configuración de carga se le llama un *dipolo eléctrico* y a la línea que une ambas cargas se le llama eje del dipolo, que coincide entonces con el eje largo de la molécula. Así que podemos concluir que una molécula de cristal líquido induce la formación de dipolos eléctricos en las moléculas vecinas. Debe señalarse, sin embargo, que es más fácil que la nube electrónica se desplace con respecto al núcleo positivo a lo largo del eje de la molécula que transversalmente a él —a lo largo del eje corto— aunque esto último también es posible dependiendo de la estructura molecular. Ahora debemos averiguar a qué conduce esta formación de dipolos en todo el cristal líquido.

Sabemos que cada configuración de cargas eléctricas crea un campo eléctrico E en el espacio que la rodea. La estructura espacial específica de cada campo, es decir, cómo varia su magnitud con la posición y cuál es su dirección en cada punto, es una propiedad de cada configuración de carga, pero es precisamente a través de este campo como cada configuración ejerce fuerzas sobre otras cargas eléctricas. En el caso del dipolo eléctrico la estructura de este campo está representada por las *líneas de fuerza* que se muestran en la figura 24 (a) y sus propiedades son tales que, si en la región ocupada por este campo se coloca otro dipolo, las fuerzas que el campo del primero produce fuerza a que los dipolos se orienten como se muestra en la figura 24 (b). Es decir, la mayor parte de los átomos de una molécula trata de situarse al lado de los átomos de otra, de modo que las cargas del mismo signo se sitúen lo más cerca unas de otras. El resultado neto es que así se genera una fuerza atractiva entre los dipolos. Entonces, cuando dos moléculas de un cristal líquido se encuentran separadas a distancias mayores que sus dimensiones, las moléculas se atraen. Es claro que de acuerdo con este modelo simplificado de la interacción entre moléculas se sigue que debe existir una distancia entre ellas para la cual las fuerzas atractivas y repulsivas se equilibren y, en consecuencia, la configuración relativa de las moléculas sea la más estable y la más favorable desde el punto de vista energético. Por lo tanto es de esperarse que las moléculas de cristal líquido tiendan a adoptar esta configuración manteniendo sus ejes dipolares o planos característicos paralelos entre sí. Concluimos entonces que, debido a la estructura de sus moléculas y en especial debido a la asimetría de las mismas, un cristal líquido adopta configuraciones altamente ordenadas. Aunque el mecanismo de interacción molecular que hemos descrito es básicamente el mismo que genera el orden en los cristales sólidos. No debe olvidarse una diferencia esencial entre ambos sistemas: en todo momento los cristales líquidos permanecen en estado líquido, lo cual implica que los centros de masa de sus moléculas no forman una red periódica sino que fluyen manteniendo el orden en la orientación común de sus ejes moleculares.

De acuerdo con el tipo de arreglos moleculares que pueden formar, Friedel (1922) clasificó los cristales líquidos

en tres grandes clases: nemáticos, esmécticos y colestéricos. La fase nemática exhibe orden en la orientación de sus moléculas y al mismo tiempo desorden en la posición de sus centros de masa. Las moléculas pueden moverse lateralmente, girar alrededor del eje común o deslizarse paralelamente a él (Figura 25).

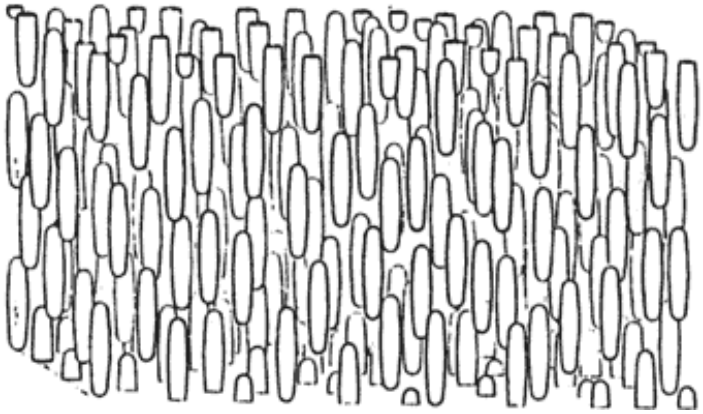

Figura 25. La fase nemática exhibe orden de orientación, pero desorden en la posición de los centros de masa moleculares.

Podríamos comparar este arreglo molecular con el de los cerillos dentro de una caja: aunque pueden moverse, la presencia de los demás impone restricciones a estos movimientos y tiende a mantenerlos paralelos entre sí. De este modo, respecto a la posición de sus centros de masa, un nemático se comporta como un líquido ordinario y sus moléculas se mueven caóticamente. En cambio difiere totalmente de un líquido ordinario en que sus moléculas se orientan y al moverse mantienen sus ejes paralelos a una dirección común. Es preciso señalar que, por supuesto, este orden nunca es perfecto, sólo ocurre a temperaturas moderadas cuando las variaciones térmicas no son tan intensas como para destruir totalmente este orden de orientación. Recordemos que ya desde las primeras observaciones de Reinitzer sabemos que al calentar un cristal líquido éste se convierte en un líquido ordinario. También es importante mencionar que, además de la temperatura, otras propiedades, como la densidad, son de gran importancia para determinar el grado de orden o el tipo de fase líquido cristalina que puede formarse. En efecto, cuando el número de moléculas por unidad de volumen es elevado, o sea, cuando la densidad es grande, las moléculas están más cerca unas de otras y las interacciones repulsivas entre ellas son más intensas, lo cual favorece la aparición de orden tanto de orientación como de posición en el cristal líquido. Sin embargo, estas fluctuaciones térmicas producen defectos en la orientación los cuales dan lugar a estructuras microscópicas en forma de hilo que flotan en el nemático o que se adhieren a la superficie del recipiente. Precisamente esta característica fue el origen del nombre *nemático* que en griego significa hilo.

En contraste con los nemáticos, que son la fase más desordenada de los cristales líquidos, los esmécticos constituyen la fase más ordenada. Tienden a organizarse en capas planas paralelas entre sí, como las hojas de un libro pero con sus ejes moleculares perpendiculares a estos planos y paralelos entre sí. Éste es, por ejemplo, el arreglo de las moléculas en las capas superficiales de una pompa de jabón y es el que le proporciona la cohesión necesaria para formarse. De hecho, esméctico se deriva del vocablo griego que designa una sustancia de propiedades similares al jabón. Como en los nemáticos, las moléculas de esméctico también pueden girar alrededor de la dirección de orientación común pero no pueden hacerlo fuera de la capa en que se encuentran. En cada plano las moléculas pueden acomodarse en filas con diferentes grados de orden de posición de sus centros de masa. En el caso más ordenado se produce un arreglo regular muy parecido al de la red de un sólido, en el que hay orden y repetición en cada dirección (Figura 26).

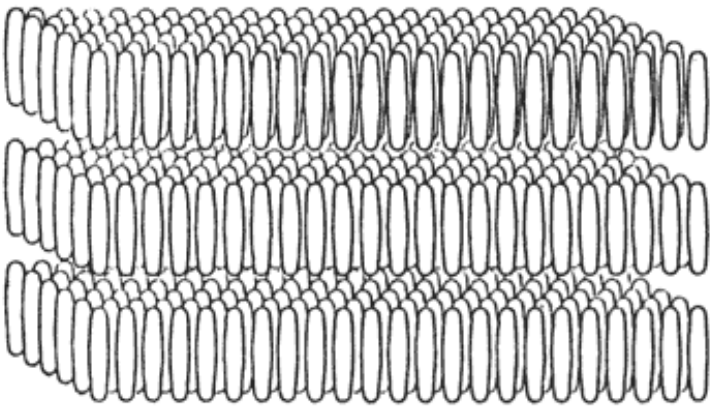

Figura 26. Un cristal esméctico con orden de orientación de los ejes moleculares y orden en la posición de sus centros de masa.

En cambio, en el arreglo más desordenado los centros de masa moleculares se mueven caóticamente en cada plano, de modo que en este caso el esméctico es nemático por planos (Figura 27). Debe enfatizarse, sin embargo, que en cualquier caso el esméctico es siempre fluido y las diferentes capas se deslizan, en mayor o menor grado, unas sobre otras.

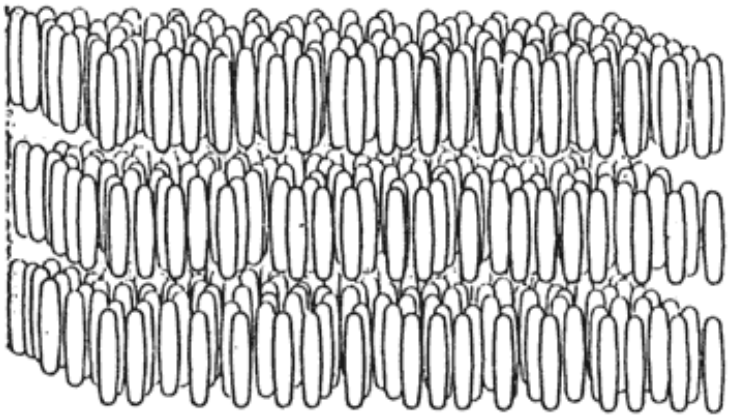

Figura 27. Capas de esméctico en las que no existe orden de posición. Se comportan como nemáticas en cada plano.

La tercera clase de cristales líquidos posee una estructura molecular característica de muchos compuestos que contienen colesterol y por esta razón se le llama colestérica. Como en los esmécticos, las moléculas de colestérico también pueden acomodarse en capas superpuestas, pero con una diferencia crucial: los ejes moleculares se orientan en una dirección paralela al plano mismo de las capas. Más aún, esta dirección cambia ligeramente de capa a capa debido a la peculiar estructura molecular de los colestéricos, y en consecuencia el eje de orientación, al pasar de un plano a otro, describe una trayectoria en forma de hélice, como se indica en la figura 28.

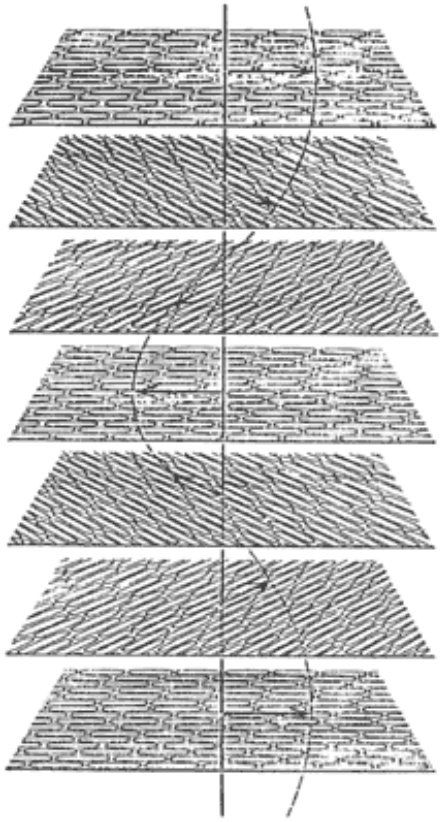

Figura 28. La dirección de orientación molecular en cada plano de colestérico describe una trayectoria helicoidal (línea discontinua).

Hemos visto cómo la arquitectura molecular de los cristales líquidos favorece, a temperaturas y densidades moderadas, la aparición de una dirección especial a lo largo de la cual se orientan las moléculas alargadas y perpendicularmente a ella en las moléculas en forma de disco. La peculiaridad de este tipo de materiales es que la existencia de una dirección preferida afecta el comportamiento de los rayos luminosos en el material cambiando su intensidad, color y dirección de propagación. Por esta razón a esta dirección especial se le llama el eje óptico del material y es la causa de muchos fenómenos ópticos importantes. Es necesario subrayar aquí que la existencia del eje óptico es un fenómeno colectivo que se da en forma espontánea en los cristales líquidos. Así, por ejemplo, si un rayo de luz blanca incide sobre el cristal líquido formando un ángulo con el eje óptico puede transformarse en luz de color al transmitirse a través del líquido pues la velocidad de la luz en el fluido depende de la dirección de propagación respecto al *eje óptico*. Pero, además de este cambio en el color, también puede ocurrir que el rayo saliente se divida en dos rayos luminosos cuyas intensidades relativas varíen dependiendo de la dirección del rayo incidente con el eje óptico. A este fenómeno se le llama *birrefringencia*.

Por otra parte, es bien conocido que los cristales sólidos con ejes ópticos se usan en múltiples aplicaciones tecnológicas en las que es necesario dirigir los rayos luminosos en forma rápida y precisa. Una aplicación muy conocida es la de los polaroides o polarizadores, que sólo transmiten algunos de los rayos luminosos que inciden sobre ellos y que se usan ampliamente en la fotografía en colores o para fabricar lentes que protejan los ojos de la luz deslumbradora del Sol. Para entender mejor la función de un polarizador recordemos que cada onda electromagnética emitida por un sistema particular de cargas en movimiento, consta de un campo eléctrico E y un campo magnético H que oscilan transversalmente a la dirección de propagación de la onda (Figura 29). Aunque en cada onda el campo eléctrico está orientado de modo preciso, en un rayo de luz compuesto de muchas ondas emitidas por diferentes sistemas de cargas a diferentes tiempos, no hay en general una dirección —"polarización"— bien determinada del campo eléctrico total. Cuando esto ocurre se dice que la luz es natural o no polarizada.

Los polarizadores permiten, precisamente, convertir la luz natural en polarizada al eliminar del rayo de luz todas aquellas ondas cuya polarización no sea la requerida. Ya que los cristales líquidos poseen eje óptico no es de extrañar que también exhiban muchos de estos fenómenos, los cuales son totalmente insólitos en los líquidos ordinarios. Sin embargo, a diferencia de los cristales sólidos los cristales líquidos presentan una ventaja enorme:

debido a la relativa debilidad de las fuerzas de interacción molecular, la orientación del eje óptico se puede variar con mayor facilidad. Existen diversos métodos para "manejar" el eje óptico de un cristal líquido, todos ellos basados en la enorme capacidad de estos sistemas para responder a la acción de campos externos.

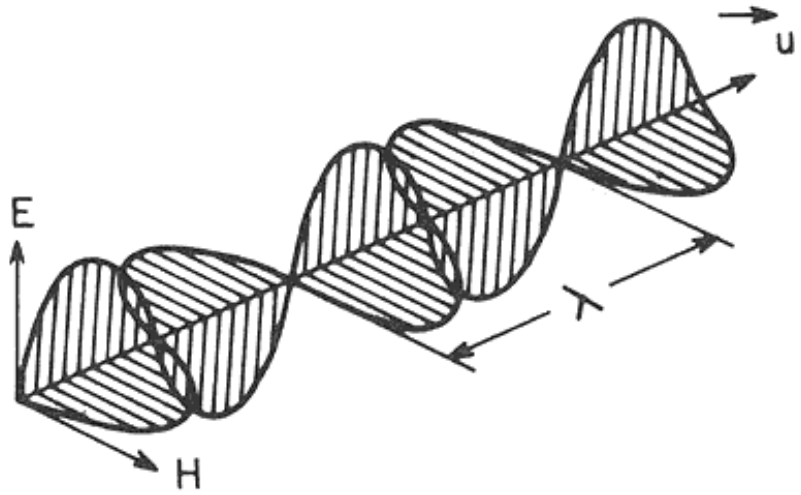

Figura 29. Onda electromagnética propagándose en la dirección de *u*. λ es la longitud de onda.

El primer fenómeno en el que se observó que el eje óptico cambia de dirección bajo la acción de un campo eléctrico es el ahora llamado *efecto Freederiks* (1943), descubierto por el físico ruso del mismo nombre. Este fenómeno se observa con mayor facilidad en un nemático y, como veremos, constituye la base física del funcionamiento de los indicadores electro-ópticos de las carátulas de relojes y calculadoras electrónicas modernas. Si un campo eléctrico externo actúa sobre un nemático, interacciona con los dipolos de sus moléculas y las hace girar de manera tal que su eje largo tiende a colocarse paralelamente al campo aplicado o en dirección perpendicular a él, dependiendo de que el momento dipolar de la molécula esté dirigido en la dirección de su eje largo o corto, respectivamente. Pero ya hemos visto que en un nemático todas las moléculas mantienen una misma orientación debido a las características de su interacción mutua; así que si una molécula de nemático se reorienta bajo la acción de un campo externo, las demás se reorientan también en la misma dirección. Por lo tanto, basta con aplicar un campo eléctrico pequeño para producir una reorientación de todo el eje óptico del nemático.

Un indicador electro-óptico consta básicamente de una celda diminuta con los siguientes elementos: una capa muy delgada (0.01-0.1 mm) de cristal líquido, por lo general un nemático, colocado entre dos placas de vidrio cada una de las cuales está unida a un polarizador. Estas placas se pulen de manera tal que la cohesión entre las moléculas y las placas sólidas sea máxima, lo cual se logra produciendo surcos en las placas de aproximadamente las dimensiones de una molécula de nemático. Así se consigue que las moléculas que están en contacto con las placas se alineen con la dirección de pulimento y, por las características de las interacciones moleculares, todas las moléculas en el espesor de la capa se alinean exactamente en la misma dirección. Si bajo estas condiciones una placa se gira noventa grados respecto a la otra —debido a que a grandes distancias de las placas el influjo del vidrio sobre las moléculas de nemático es menor que cerca de las superficies sólidas— las moléculas, y por lo tanto el eje óptico del cristal líquido, se reorientan adquiriendo la configuración torcida que se muestra en la figura 30.

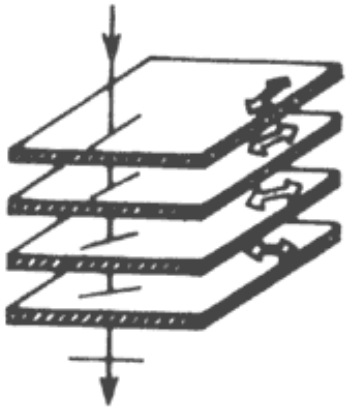

Figura 30. Geometría torcida producida al girar las placas de vidrio 90°.

Si entonces se ilumina la celda con luz natural, ésta se polariza y al penetrar en la celda su polarización sigue la configuración torcida del eje óptico, de modo que al salir por la placa inferior también habrá girado noventa grados. Pero como el eje del polarizador inferior tiene precisamente esa dirección, la luz atravesará el segundo polarizador. Entonces, si debajo del polarizador inferior se coloca un espejo, la luz podrá reflejarse nuevamente al interior de la celda, atravesarla en sentido inverso y salir de ella hasta llegar a los ojos de un observador que verá a la celda perfectamente clara y transparente. Este proceso se ilustra en la parte izquierda de la figura 31.

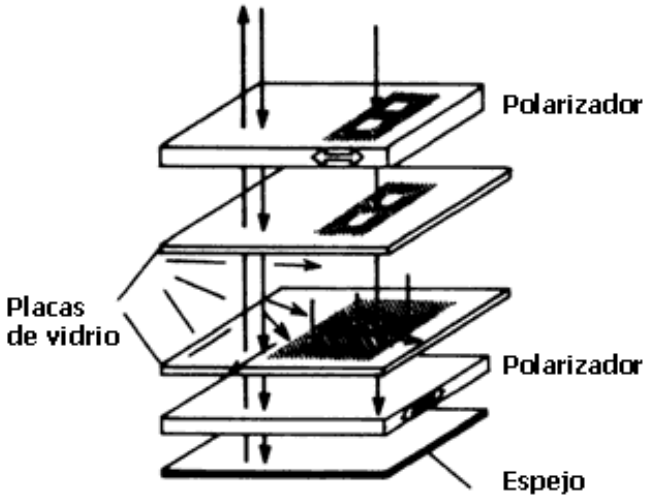

Figura 31. Elementos de una celda de un indicador electro-óptico.

Para poder formar cualquier cifra, letra o palabra en el indicador, es preciso colocar dos electrodos entre las placas de vidrio de manera que, al conectarlos a una pila, se produzca un campo eléctrico en el nemático. Al efecto, el electrodo inferior se construye de una sola pieza, mientras que el superior consta de muchos electrodos más pequeños. Así, por ejemplo, para formar cualquier cifra entre cero y nueve sólo se requieren siete segmentos, cada uno de los cuales puede conectarse o desconectarse a un circuito eléctrico de acuerdo a las señales que produzca un generador diminuto cuyo funcionamiento lo controla un programa especial. De esta manera es posible producir un campo eléctrico únicamente sobre ciertas regiones de la celda. En la parte derecha de la figura 31 se ilustra la situación en que ha sido cerrado el circuito de manera que los segmentos del electrodo superior que conforman el número ocho se activen. De acuerdo con el efecto Freederiks, el campo eléctrico en esta región de la celda tiende a alinear las moléculas destruyendo la configuración torcida que prevalecía en ausencia de campo. Entonces, la luz polarizada que sale del primer polarizador se transmite, por debajo de los segmentos de electrodo asociados a la cifra ocho, por toda la capa de nemático sin cambiar su polarización. Pero al llegar al segundo polarizador, cuya

dirección de polarización es perpendicular a la polarización de la luz, no podrá atravesarlo y entonces o se absorbe en el líquido o se desvía en cualquiera otra dirección. Como esta luz no llega al espejo, tampoco alcanzará al observador y éste verá oscuros los segmentos de la cifra ocho. El resultado final será que el observador verá un ocho oscuro sobre un fondo claro (Figura 32).

Figura 32. Imagen típica de un indicador digital electro-óptico.

Éste es el principio físico del funcionamiento de la gran mayoría de los indicadores digitales usados en calculadoras de bolsillo, videograbadoras, tableros de diversos aparatos medidores o cuadrantes de sintonía. Es importante señalar que los procesos comprendidos en los dispositivos que acabamos de describir, ocurren rápidamente, por lo común en una diezmilésima o cienmilésima de segundo; así, en una fracción pequeña de tiempo se puede mostrar en la pantalla toda una sucesión de cifras o símbolos diversos. Más aún, como las dimensiones de la celda son tan pequeñas, los problemas usuales asociados con el manejo de los líquidos no se presentan y las potencias consumidas en los circuitos de la misma son muy pequeños; por ejemplo, una pila de 1.5 voltios basta para generar toda la energía requerida.

En las páginas anteriores hemos presentado un esbozo de cómo son los cristales líquidos; resulta evidente que es éste un campo interdisciplinario de gran importancia, tanto científica como tecnológica. Podemos mencionar que actualmente ya están a la venta televisores miniatura a colores, con pantallas de gran definición, fabricados con cristales líquidos. A juzgar por los logros y aplicaciones espectaculares de los cristales líquidos obtenidos en los últimos años, no cabe duda que el futuro nos deparará sorpresas cada vez mayores y, al mismo tiempo, nos brindará nuevos retos para comprender las extraordinarias propiedades de estas fases intermedias de la materia.

IV. LÍQUIDOS SOBREENFRIADOS Y VIDRIOS

LA LECTURA del título de este capítulo habrá dado ya al lector por lo menos tres ideas en qué pensar. Primero, qué tiene de extraño o exótico un líquido sobreenfriado. Segundo, qué relación existe, si es que hay alguna, entre un líquido y un vidrio, pues de nuestra experiencia en la vida cotidiana sabemos que los vidrios se asemejan mucho más a los sólidos. Y tercero, qué relación existe entre dos fases de la materia en apariencia tan disímbolas entre sí, los líquidos sobreenfriados y los vidrios, ¡lo único exótico parece ser la asociación de ideas! Veamos.

Pensemos en un líquido ordinario, como el agua. A temperatura ambiente y presión atmosférica normales, el agua es un líquido y si a la misma presión disminuimos su temperatura, digamos enfriándola, el agua se solidifica a 4° C para formar hielo. Este fenómeno nos es más o menos conocido y no es remoto que extrapolemos lo que observamos en el agua a otros líquidos conocidos de manera de hacernos a la idea de que todo líquido al enfriarse solidifica. Pues bien, éste no es el caso. Si volvemos al agua y llevamos a cabo el enfriamiento en condiciones extremas de cuidado y pureza, esto es, evitando vibraciones o movimientos bruscos del recipiente que la contenga, cuidamos que no le caiga polvo o basura, enfriamos lentamente, etc., podemos pasar por debajo de 4° C y el agua continuara siendo líquida. Sin embargo, una vez que hemos sobrepasado la temperatura normal de congelación, cualquier perturbación, por pequeña que sea, rápidamente inducirá la transición al sólido. El agua se convertirá en hielo.

En todo ese intervalo de valores de la temperatura, menor cada uno de ellos a la temperatura de congelación, en el que el agua subsiste como un líquido, decimos que es un líquido sobreenfriado. Todo líquido ordinario, si se hace con cuidado, puede sobreenfriarse hasta un cierto grado. Esto es, existe una temperatura máxima más allá de la cual ya no es posible sobreenfriar al líquido y éste, inevitablemente se solidificará. Lo verdaderamente exótico de algunos líquidos es que pueden sobreenfriarse a temperaturas muy bajas y, aunque no aparentan solidificarse, exhiben un fenómeno verdaderamente curioso. En efecto, su viscosidad empieza a aumentar violentamente a medida que la temperatura disminuye y así alcanzar una consistencia tal que "su endurecimiento" los hace aparecer como sólidos, pero en realidad, al radiografiarlos con rayos X, se ve que tienen prácticamente la misma estructura atómica que un líquido. Decimos entonces que el líquido ha pasado a formar un *estado vítreo* o, en términos más corrientes, que se ha formado un vidrio.

Un ejemplo típico de este comportamiento se puede ver en el glicerol, mejor conocido como glicerina, que a la temperatura ambiente es un líquido espeso incoloro y de agradable sabor dulzón. Si se toma un poco de este líquido y se enfría sin mayores cuidados, cristaliza como lo hace cualquier líquido. Pero si el proceso de enfriamiento se lleva a cabo con los cuidados necesarios, la glicerina puede enfriarse hasta temperaturas cercanas a 5 K [No sin que se aprecie la formación de cristales. Es un líquido típico que puede sobreenfriarse de manera, digamos así, espectacular. Y lo espectacular consiste en que debajo de una cierta temperatura, aproximadamente igual a 180 K, las propiedades de la glicerina son muy parecidas a las de un sólido, excepto su radiografía con rayos X que muestra su similitud con el líquido. Decimos entonces que, debajo de dicha temperatura, tenemos un *vidrio*.

Así como la glicerina, otras sustancias como el propilenglicol [No, la glucosa, el hule, etc., cuando se enfrían, llegan a formar vidrios. Pero no todos los vidrios que conocemos se forman a partir de líquidos sobreenfriados a bajas temperaturas. Los vidrios que usamos y vemos en la vida diaria están formados de óxidos metálicos, siendo el de silicio (sílice) o vidrio de arena el más común ¡y tienen que sobreenfriarse a más de 1 000 K! Pero además existen los vidrios poliméricos, los cuales, como su nombre lo indica, están formados a partir de polímeros, otros materiales exóticos que ya hemos mencionado. ¿Qué es entonces un vidrio? ¿Y cuál es su conexión concreta con un líquido sobreenfriado? Vamos a intentar responder primero la segunda pregunta para después abordar la primera de manera más general.

Para responder a la segunda pregunta volvamos a los experimentos que hemos esbozado en los primeros párrafos del capítulo. Cuando un líquido se enfría, se convierte en un sólido cristalino, esto es, cristaliza. Cuando un líquido se enfría de manera que se pueda sobrellevarlo como un líquido sobreenfriado, no cristaliza. Se convierte, a una cierta temperatura, en un material con la apariencia de sólido pero que en realidad posee la estructura de un líquido. A esta fase la hemos llamados un vidrio. Si hacemos la radiografía de ambas fases, el sólido cristalino

proyectará una estructura regular, ordenada, que en muchos casos, como el de varias sales de metales comunes, sodio, cobre, plata, etc., se percibe aún en su forma macroscópica, esto es, a simple vista.

Un cristal de cloruro de sodio (sal de cocina) bien cristalizado es casi un cubo perfecto. En cambio, el vidrio proyecta un orden que rápidamente se desvanece a medida que observamos distancias de unas cuantas veces las distancias interatómicas. Y esto es lo que se observa en los líquidos. El vidrio, entre otros materiales que tienen propiedades similares, es lo que se conoce como un *sólido amorfo*. Pero podría uno preguntarse si hay otras maneras de percibir estas diferencias a través de mediciones que se llevan a cabo en el laboratorio. Y la respuesta es sí.

Además, son éstas las mediciones no sólo más comunes, sino también las que arrojan información mucho más cuantitativa. Entre ellas, una de las más socorridas es la que examina el comportamiento de la propiedad conocida como calor específico de una sustancia cuando se varía la temperatura. Como es bien sabido, el calor específico es aquella propiedad de todo sistema que mide su inercia térmica. Así como la masa de un cuerpo es la medida de la resistencia que opone dicho cuerpo a que su estado de reposo o movimiento se altere debido a la acción de una fuerza externa, el calor específico es la resistencia que presenta una unidad de masa de un cuerpo cualquiera a que su temperatura se vea afectada cuando le suministramos energía. En esta forma, cuando leemos que una sustancia como el agua tiene un calor específico de una caloría por gramo y grado centígrado, lo que estamos diciendo es que por cada gramo de agua tenemos que suministrar una caloría de energía para elevar su temperatura un grado centígrado. En general, el calor específico de la mayoría de las sustancias —con excepción de los gases monatómicos helio, neón, etc.—, es una función de la temperatura, esto es, la inercia térmica depende de la temperatura del cuerpo y en algunos casos hasta de su densidad. Por otra parte, la teoría cinética de la materia permite establecer una correlación entre el calor específico de un material con las características más sobresalientes de su estructura atómica o molecular, según sea el caso. El conocimiento experimental de esta propiedad es, pues, una forma directa de corroborar las hipótesis en que se basan los modelos microscópicos.

Cuando se estudian los modelos microscópicos de los sólidos cristalinos se puede pensar en las vibraciones de los iones pesados alrededor de sus posiciones de equilibrio —como si fueran resortes— y también el movimiento de los electrones libres a través de la red cristalina. Estos fenómenos constituyen las dos grandes contribuciones microscópicas al calor específico del sólido. Los cálculos teóricos que surgen de este modelo concuerdan satisfactoriamente con el experimento. Si comparamos entonces el comportamiento del calor específico de un sólido cristalino con el de un líquido sobreenfriado en su fase vítrea o amorfa, podemos averiguar mucho sobre la estructura del segundo. Estas mediciones se han llevado a cabo por años en varios laboratorios del mundo, corroborando unos los resultados de otros y el comportamiento general se muestra, para el caso del glicerol, en la figura 33. La curva inferior representa el calor específico de la glicerina cristalizada. La curva superior, sobre todo, el intervalo contenido entre las temperaturas de congelación $\mathbf{T_{congel}}$ y la de transición $\mathbf{T_g}$ muestra su comportamiento como un líquido sobreenfriado. Lo sorprendente es que debajo de $\mathbf{T_g \sim 178\ K}$, el comportamiento del calor específico para el vidrio y el sólido cristalino es prácticamente igual. Si quisiéramos dibujar las dos curvas casi se encimarían una sobre otra, como de hecho se indica en la figura. Y, sin embargo, este "casi" empleado en la frase anterior es aquí determinante.

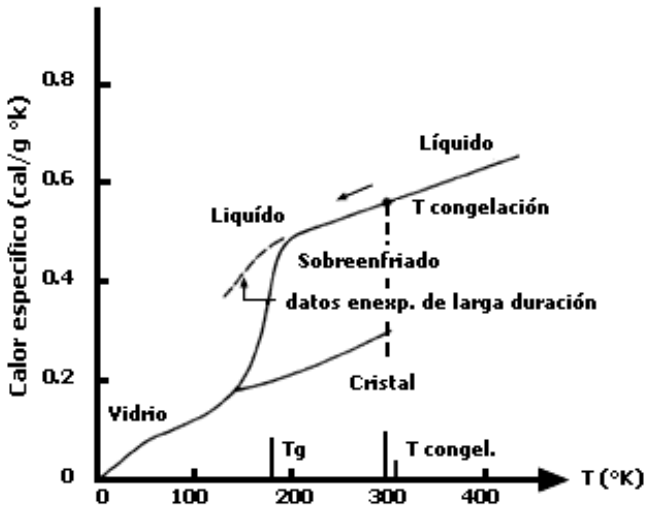

Figura 33. Los calores específicos del glicerol cristalino y el sobreenfriado.

Conocido el calor específico de una sustancia como función de la temperatura, resulta relativamente fácil obtener, de acuerdo con las leyes de la termostática, la propiedad llamada entropía. Resulta que esta función, como se ha explicado en otro volumen de esta serie, es una medida de la falta de organización de un sistema dado a nivel molecular. Siendo los sólidos cristalinos los sistemas más organizados, su entropía es menor que la del líquido correspondiente, la cual a su vez es menor que la del gas. De esta manera, si usamos la pequeña diferencia que existe entre los dos calores específicos, del sólido y del vidrio, para calcular sus respectivas entropías y las comparamos entre sí, podemos saber si uno está más o menos organizado que el otro. El resultado de este cálculo es espectacular y se muestra en la figura 34.

En las ordenadas se ha graficado la entropía en exceso del vidrio con respecto al sólido. Nótese que de ser sistemas igualmente organizados, este exceso sería igual a cero. En las abscisas se grafica la temperatura ¡Debajo de 178 K el vidrio tiene una entropía en exceso respecto a la del cristal que es casi constante y aproximadamente igual a cinco unidades! [No Así pues, concluimos que el vidrio tiene que ser un estado mucho más desorganizado que el sólido y esto concuerda, naturalmente, con los resultados obtenidos con las radiografías hechas por medio de rayos X. El vidrio, entonces, se asemeja más a un líquido que a un sólido.

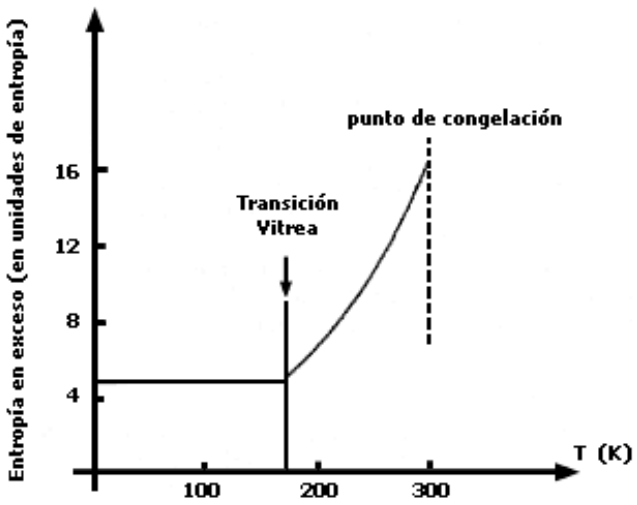

Figura 34. La línea sólida representa la cantidad por la cual la entropía de la glicerina sobreenfriada

excede la de la glicerina cristalizada, de acuerdo con los resultados de la figura 33 (1 unidad de entropía = 1 cal /mol° K)

Estos resultados dan al lector una imagen de la conexión que buscamos entre la existencia de los vidrios y los líquidos sobreenfriados. Si tomamos como prototipo de estas sustancias a la glicerina, los resultados mostrados en las figuras nos dicen que los vidrios, en general, se forman a partir de toda una clase de sustancias que sean capaces de sobreenfriarse con relativa facilidad. Aunque el proceso no es tan simple como el aquí ejemplificado, porque las temperaturas son considerablemente mayores, los vidrios ordinarios también se forman al enfriar materiales inorgánicos (sales) a base de silicio (silicatos), de su fase líquida a la temperatura ambiente. Este mismo fenómeno fue descubierto hace apenas un par de décadas en las aleaciones metálicas. Estas consisten generalmente de un metal noble o de transición y un metaloide (boro, carbono, silicio, fósforo, etc.). Los vidrios metálicos, llegan a tener propiedades sorprendentes. Por ejemplo, al contrario de los vidrios ordinarios, son buenos conductores eléctricos; también son maleables. Sus aplicaciones tecnológicas han sido considerables.

Ahora que más o menos tenemos una idea cualitativa de que un vidrio es el estado amorfo que se obtiene a partir de un líquido sobreenfriado de muy alta viscosidad, podemos pasar a la primera pregunta, y refrasear ésta en términos de cómo está constituido un sólido amorfo. Mas para no salirnos de la tónica específica del capítulo nos concentraremos en los vidrios, primero en su aspecto macroscópico. En 1903, el químico alemán Gustavo Tammann hizo notar que no cualquier líquido sobreenfriado forma un vidrio. Se requiere que a medida que nos aproximemos a la temperatura de la transición vitrea su viscosidad sea considerablemente mayor que la del agua.

Veamos qué tanto mayor. A 20° C el agua tiene una viscosidad de $\mathbf{10^{-2}}$ poises [No. Según Tammann, para que un líquido sobreenfriado forme un vidrio su viscosidad debe alcanzar valores entre $\mathbf{10^{12}}$ y $\mathbf{10^{13}}$ poises, esto es, ¡debe ser más de un billón de veces más viscoso que el agua! la condición de Tammann puede entenderse si se emplea un modelo muy gráfico ideado por J.C. Maxwell para distinguir entre el comportamiento de un sálido y el de un líquido. Si tomamos un sólido cristalino y lo sometemos a un esfuerzo elástico ("lo jalamos"), aparece una deformación llamada deformación cortante. La relación entre el esfuerzo y la deformación, si la primera no es muy grande, se conoce como el módulo de deformación. Si a un líquido lo sometemos también a un esfuerzo cortante, éste no se deforma, sino que fluye uniformemente con una rapidez que depende de su viscosidad. De aquí que a Maxwell se le ocurrió sugerir que la existencia de un flujo viscoso para un líquido cualquiera puede interpretarse como el rompimiento continuo de la deformación elástica. De esta manera, si en cualquier material ambos efectos están presentes, su importancia relativa puede determinarse si se calcula la magnitud del cociente entre el módulo de deformación y la viscosidad. Y es un resultado inmediato del análisis dimensional mostrar que si ambas cantidades se expresan en unidades c.g.s., el cociente tiene dimensiones de tiempo ie, se mide en segundos.

Para un líquido común y corriente, e independientemente de su temperatura, el módulo de deformación es del orden de magnitud de $\mathbf{10^{-11}}$ unidades c.g.s. La viscosidad de estos líquidos, como el agua, es de $\mathbf{10^{-2}}$ unidades c.g.s. (poises) luego el cociente $\mathbf{10^{-2}}$/ $\mathbf{10^{-11}}$ es de $\mathbf{10^{-13}}$ segundos. Esto quiere decir que si aplicamos un esfuerzo cortante al agua, la deformación elástica "se rompe" o cede a los $\mathbf{10^{-13}}$ seg (¡casi instantáneamente!) y el líquido fluye. Pero en el caso de un líquido sobreenfriado muy viscoso, la viscosidad será de $\mathbf{10^{+13}}$ poises y entonces $\mathbf{10^{-13}/10^{-11}}$ = 100 seg ¡el rompimiento elástico ocurre al cabo de casi dos minutos, y si la viscosidad sigue aumentando a medida que la temperatura disminuye, este tiempo puede ser mayor. Físicamente, Tammann nos dice que los cambios en la configuración molecular de estos líquidos, cuando se someten a esfuerzos externos, pueden ser tan lentos como la duración misma del experimento y este "congelamiento" de la estructura molecular es precisamente lo que caracteriza al vidrio. Nunca tienen tiempo de alcanzar su configuración estable como sólidos cristalinos y permanecen en una fase muy semejante a la del líquido, pero con las moléculas inmovilizadas por los efectos de tan alta viscosidad. Piense el lector en un trozo de hule y tendrá una representación gráfica de esta idea. Algunos vidrios, como los magníficos emplomados de las catedrales góticas, se estima tomarán algunos miles de años en cristalizar. Al hacerlo, el vidrio se transformará en un sólido cristalino y se romperá, como los parabrisas de los automóviles, aparentemente sin razón alguna. Este proceso puede acelerarse por la acción de un agente externo que provoque esfuerzos considerables como un golpe, cambios de temperatura, etcétera.

Todas estas ideas, aparentemente esotéricas, pueden tener una influencia notable en la tecnología y fabricación de un vidrio ordinario. Si por ejemplo se toma un vidrio y su temperatura se eleva mucho más allá de la temperatura de transición, los cambios de su configuración molecular pueden llevarse a cabo con mucha mayor rapidez y siempre existe el peligro de que la cristalización ocurra. A este proceso en los vidrios se le conoce como

vitrificación. Si esto sucede se estropea el vidrio. Un soplador de vidrio experimentado lo sabe y por tanto nunca mantiene el vidrio sobre la flama por mucho tiempo. Si lo hace, el vidrio devitifrica y una pléyade de pequeños cristales aparece en el vidrio dándole la apariencia de material opaco y congelado ¿le suena familiar al lector cuando piensa en muchas piezas de vidrio, como el de Mascarones, que se venden en los mercados? El vidrio devitrificado tiene una dureza mecánica muy reducida, por lo que puede llegar a ser inservible.

Lo más excitante del estudio de los vidrios es que, a pesar de que el hombre los ha trabajado por más de 4 000 años, y ha dominado completamente su tecnología, muy poco sabemos de ellos desde el punto de vista científico. Todos nos hemos maravillado de ver verdaderas obras de arte hechas de un sinnúmero de materiales vítreos, desde las copas para vino más finas y delicadas hasta las pesadas piezas de cristal cortado. Y sin embargo apenas estamos aprendiendo a conocer algo sobre los importantes procesos que ocurren durante la formación del vidrio. Por ejemplo, la temperatura de la transición vítrea no está definida unívocamente. Su valor depende del proceso mismo de enfriamiento y de otras variables como la presión, los esfuerzos cortantes a que está sometido el material, su grado de pureza, etcétera.

¿Cuáles son los aspectos más notables del comportamiento de las moléculas en un líquido muy viscoso que al sobreenfriarse forma un vidrio? ¿Y cómo clasificar estos diferentes aspectos para jerarquizarlos por su importancia en la formación del vidrio? ¿De qué manera dependen las "cualidades" de un vidrio de estos aspectos? Estas y muchas otras preguntas más, igualmente interesante e importantes, siguen siendo todavía una gran incógnita. El día que las lleguemos a responder no sólo habremos aprendido algo más de los líquidos exóticos que aparecen en la naturaleza sino que también podremos hablar de una tecnología sumamente importante, basada ahora en principios científicos.

Inicio

[Nota 3] [<--

5K = cinco grados en la escala Kelvin. El cero en esta escala corresponde a -273.16 grados centígrados.

Inicio

[Nota 4] [<--

El propilenglicol es un compuesto orgánico de fórmula muy parecida a la glicerina.

[Nota 5] [<--

1 unidad de entropía (U.e.) x 1 cal /mol K.

[Nota 1] [<--

1 poise en unidadcs c.g.s. es igual a 1g/ cm-seg

Inicio

V. LOS SUPERCONDUCTORES

LA CONDUCTIVIDAD eléctrica de un material, y específicamente de un metal, es una propiedad de la materia que palpamos cotidianamente. En efecto, cuando conectamos cualquier aparato eléctrico, un radio, un tostador, la plancha o encendemos la luz, permitimos que la corriente eléctrica fluya a través de los cables que tiene el aparato. Los cables se fabrican por lo común de un metal rojizo que en realidad es una aleación con un alto contenido de cobre. Se usa cobre porque es buen conductor de la corriente eléctrica. También el oro y la plata son buenos conductores, pero demasiado costosos para utilizarlos comercialmente. Pero tomemos al cobre como ejemplo de buen conductor. ¿Cuál es la característica de este metal que le permite conducir fácilmente la corriente eléctrica? Recordemos que la estructura de elementos metálicos como el cobre, la plata, el aluminio, etc., permite la existencia de electrones que no están firmemente ligados a los núcleos de los átomos metálicos. Estos electrones pueden visualizarse como si estuvieran brincando o inmigrando de un átomo a otro del metal y, por lo tanto, ocupan un volumen mayor que el de los electrones firmemente ligados a los núcleos. Así pues, cuando un trozo de metal se somete a una diferencia de potencial eléctrico los electrones que entran al metal por la terminal negativa producen un desplazamiento o corriente de los electrones no localizados, de manera que por cada carga que entra al conductor una cantidad equivalente sale por la terminal positiva. Esto produce la imagen de que existe un flujo de carga eléctrica a través del metal y eso es lo que comúnmente denominamos corriente eléctrica. Sin embargo, este desplazamiento de cargas no ocurre libremente. Los electrones no localizados encuentran obstáculos en su camino que son los propios núcleos del metal, junto con los electrones fuertemente ligados a ellos. La resistencia que oponen los núcleos al paso de los electrones no localizados se manifiesta en el hecho de que, al fluir los primeros, el metal se calienta. Si quisiéramos visualizar este fenómeno de una manera más simple, podríamos imaginar a los núcleos metálicos, mucho más masivos que los electrones, como un conjunto de obstáculos rígidos dispuestos de manera regular en el espacio. Los electrones no localizados, al ser impulsados por la diferencia de potencial externo, tratan de pasar a través de ellos sufriendo infinidad de choques (Figura 35).

En cada choque, el electrón cede parte de su energía cinética al núcleo que vibra como un resorte alrededor de su posición. Estas vibraciones reflejan la energía perdida por las colisiones de los electrones con los núcleos y se manifiestan en forma de calor. Nosotros los percibimos al notar que al paso de la corriente el metal se calienta.

Figura 35. Kamerlingh-Onnes. (Foto Jorge Ludiyán, UAM I).

Esta descripción sugiere entonces que, si enfriamos los conductores metálicos, el paso de los electrones no localizados entre los núcleos encontrará menos resistencia y por consiguiente fluirán con mayor agilidad. Y en

efecto, esta propiedad se corrobora en el laboratorio. La conductividad de un metal aumenta si disminuimos la temperatura. También nos podemos preguntar si esta disminución tiene un límite, esto es, si debajo de una cierta temperatura la resistencia que opone el metal al paso de la corriente, o sea de los electrones no localizados, ya no disminuye.

Estas cuestiones constituían un continuo dolor de cabeza para los físicos teóricos a fines del siglo pasado. Dentro del esquema de la física clásica, imaginar la corriente eléctrica como causada por el flujo de un "gas de electrones" a través de una malla formada por los núcleos fijos en sus posiciones, era atractivo. No obstante su simplicidad, tal planteamiento es incorrecto. En efecto, considerando el metal como un conjunto de electrones y de núcleos, de acuerdo con la teoría cinética de la materia, la inercia térmica del metal, esto es, su capacidad calorífica, debía tener un cierto valor que no concordaba con el experimental. Por otra parte, la conductividad eléctrica misma, definida como la capacidad del metal para dejar pasar los electrones resulta ser, a temperaturas normales, 20° C, inversamente proporcional a la temperatura, en tanto que este modelo, el gas de electrones, predecía que debería variar como uno entre la raíz cuadrada de la temperatura.

La situación aquí descrita era la que prevalecía en 1905-1911. Para entonces, el gran físico holandés H. Kamerlingh Onnes ya había revolucionado la tecnología de las bajas temperaturas y en 1908 había logrado licuar el gas helio alcanzando la temperatura récord de -267.8° C en el laboratorio. Instigado por la curiosidad de averiguar si en efecto la conductividad de los metales decrecía sin límites con la temperatura, en 1911 dio a conocer a la comunidad científica un descubrimiento sorprendente. Usando mercurio para sus experimentos, encontró que la resistencia eléctrica del metal [Nota 7] medida en ohmios caía prácticamente a un valor igual a cero por debajo de una temperatura aproximadamente igual a 4.2 K (Figura 36).

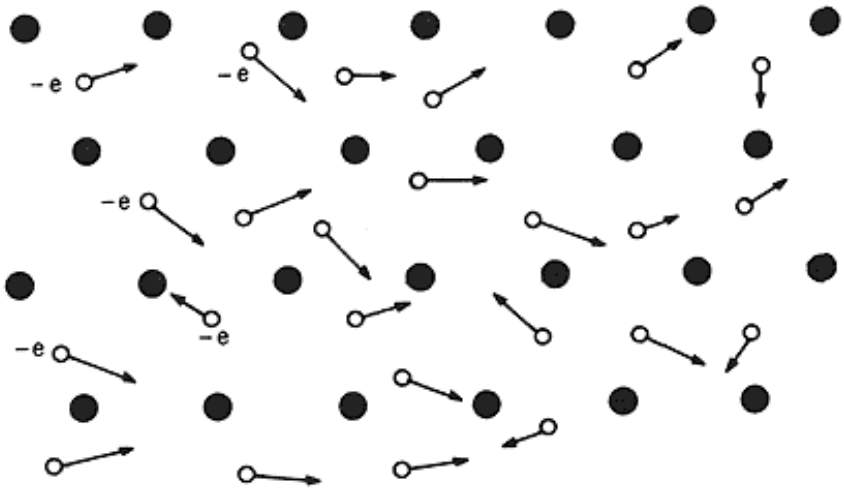

Figura 36. Se ilustra el flujo de electrones (círculos blancos) a través de una malla cristalina. Los iones pesados (círculos negros) actúan como "centros disipadores". La corriente eléctrica es el desplazamiento efectivo de los electrones durante un tiempo dado.

Este descubrimiento sorprendente marcó el inicio de toda una rama de la física de bajas temperaturas conocida ahora como superconductividad.

La propiedad que encontró Onnes en el mercurio se ha logrado verificar hasta hoy en día en más de la mitad de los metales conocidos. Estos incluyen los llamados metales simples, aluminio, galio, indio y talio, estaño, plomo y, también, un grupo grande de los llamados metales de transición, que incluyen al titanio, vanadio, zirconio, niobio, molibdeno y otros conocidos como tierras raras. Curiosamente, no existen metales superconductores monovalentes ni tampoco hexavalentes. Para cada uno de los metales señalados existe una temperatura

característica a la cual el valor residual de la resistencia eléctrica se hace cero. Para el mercurio es de 4.26 K. El niobio exhibe la más alta entre los metales puros, 9.2 K. A esta temperatura característica de cada metal se le conoce como *temperatura de transición*. La transición superconductiva ocurre dentro de un intervalo de .001 K alrededor de la temperatura de transición, razón por la cual se puede medir con mucha precisión.

Pero la superconductividad no es sólo una propiedad característica de algunos metales. Hoy en día se conocen más de mil aleaciones y otros compuestos que exhiben esta propiedad. La temperatura de transición es usualmente mayor que para los metales puros. Algunos ejemplos están dados en la tabla 1.

Curiosamente, existen también aleaciones que exhiben la transición superconductora sin que ninguno de los elementos integrantes sea un superconductor. Ejemplos de ellos son el $\mathbf{B_3}$ Sr con una temperatura de transición de 5.62 K y una aleación de platino antimonio (PtSb), cuya temperatura de transición es de 21 K.

TABLA 1. Algunas aleaciones superconductoras

Aleación	*Temperatura de transición*
Nb_3-Ge	**23.3**
Nb_3Sn	**18.07**
Nb_3Al	**18.0**
NbSn	**17.91**
V_3Si	**16.3**
V_3Ga	**15.3**
Nb-Ni	**16**

¿Qué quiere decir que la resistencia de un conductor sea nula? Si pensamos ingenuamente en el modo de los electrones no localizados como aquel que proporciona un mecanismo adecuado para describir la conducción en un metal, esto implicaría que la conductividad eléctrica es infinita. En términos más simples, significa que debajo de la temperatura de transición los electrones no localizables no encuentran resistencia alguna a su paso por la malla metálica. Pero tal resultado tiene ciertas consecuencias. De acuerdo con nuestros conocimientos elementales de electricidad, la resistencia que presenta al paso de la corriente un conductor metálico es igual al campo eléctrico aplicado dividido entre la corriente, si ésta es diferente de cero y la resistencia es nula, el campo eléctrico debe ser cero. El resultado, a su vez, nos dice algo más. De acuerdo con las ecuaciones que gobiernan al campo electromagnético, establecidas por Maxwell antes de finalizar el siglo XIX, si en un medio material el campo eléctrico es constante, o nulo, el campo de inducción magnética que acompaña a dicho campo eléctrico no puede variar con el tiempo. Entonces, si asociamos a un superconductor una resistencia nula, el campo magnético en el momento de llevarse a cabo la transición superconductiva debe permanecer igual al campo que existía antes de la transición. Este hecho ocasionó enormes dificultades en la conceptualización de la superconductividad, pues un metal superconductor que se lleva a través de la transición superconductiva, ¡conserva una memoria de su estado inicial! Pues, en efecto, si antes de la transición no hay campo magnético en el interior del superconductor y si se pone en presencia de uno *después* de la transición, las líneas del campo magnético no pueden penetrar a su interior respetando la condición de que el campo no puede variar en el tiempo. Por el contrario, si la transición superconductiva se efectúa en presencia de un campo magnético existente antes de la transición y las líneas del campo penetran en el superconductor, permanecerán dentro después de la transición. ¡El estado magnético de un superconductor depende de su estado inicial! Esto desafía las leyes de la termostática pues el proceso *no* es reversible. (Véanse figuras 38 (a) y (b).)

Estas consideraciones pusieron en jaque a todos los físicos de aquella época, hasta que en 1983 el físico alemán W. Meissner, midió lo que nunca antes se había medido: la forma del campo magnético en la vecindad de un superconductor. Y para la sorpresa de los interesados en este fenómeno, descubrió que al pasar por la transición superconductiva todo superconductor expele de su interior al campo magnético, *independientemente* de cuál sea su estado inicial. (Véanse figuras 37 y 38 (c).) Este experimento se conoce hoy en día como efecto Meissner-Ochsenfeld.

El resultado implica que la transición superconductiva sí puede concebirse como un proceso reversible y ser estudiada en el contexto de la termostática. Aun y cuando el campo magnético no es completamente expelido del interior del superconductor, pues penetra en un espesor que puede llegar a ser hasta del orden de 500 a 1 000 milimicras, el hecho de que la conductividad sea infinita y el campo magnético en el interior casi nulo, no fue suficiente para poder dar una explicación del fenómeno en base a las leyes de la física clásica.

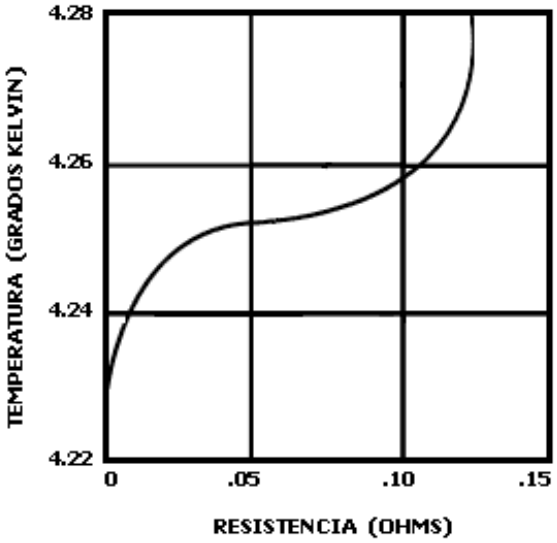

Figura 37. Resistencia eléctrica del mercurio graficada como función de la temperatura. La resistencia desaparece completamente a 4.2K (4.2 grados por encima del cero absoluto).

Además de la importancia que tiene la influencia del campo magnético en las propiedades de los superconductores a través del efecto Meissner-Ochsenfeld, existen otras propiedades magnéticas que conviene mencionar. Si un superconductor que se encuentra a una temperatura menor que su temperatura de transición se somete a la acción de un campo magnético, existe un valor de dicho campo para el cual la propiedad superconductora desaparece. Al valor del campo en el cual esto ocurre se le conoce como el valor crítico del campo o simplemente *campo crítico*. Se ha encontrado experimental y teóricamente que dicho campo crítico sólo depende de la temperatura. Cuando ésta tiende a ser cada vez más baja, el valor del campo tiende a un valor máximo (Figura 39).

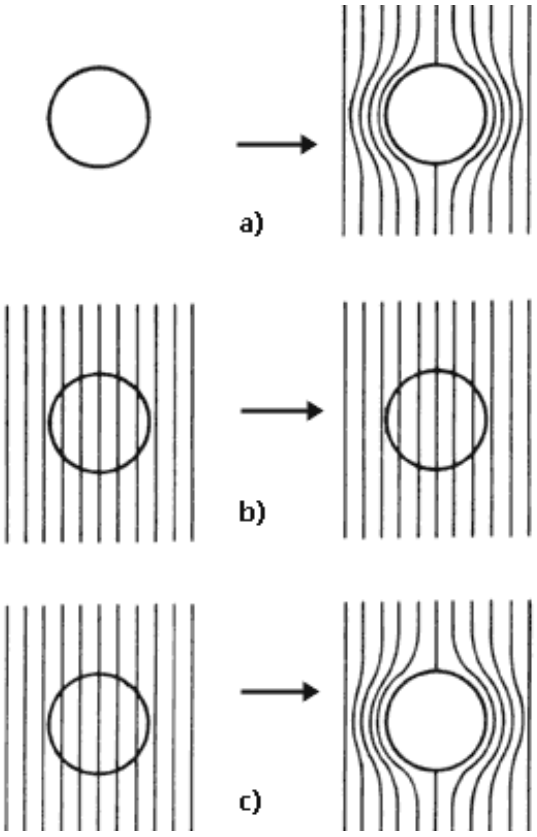

Figura 38. (a) Caso I. La muestra primero se enfría por debajo de su temperatura de transición y luego se coloca en un campo magnético. (b) Caso II. La muestra se coloca en un campo magnético, encontrándose en su estado normal, y posteriormente se enfría por debajo de su temperatura de transición. (c) Si el campo magnético se aplica cuando la muestra está en su estado normal, el campo es expelido al enfriarla.

En 1956 el físico norteamericano H. W. Lewis descubrió que, para un conjunto de sustancias, algunas de ellas siendo metales con bajo punto de fusión y otras que tengan propiedades electrónicas semejantes a dichos metales, existe una relación común que vincula el campo crítico a la temperatura cero, con la temperatura de transición. En general, estos superconductores, llamados suaves, y todos los demás metales de transición que son superconductores, tienen otras propiedades en común, por ejemplo la misma longitud de penetración del campo magnético. Y aunque sólo los primeros, esto es los suaves, muestran la relación empírica entre el campo crítico y la temperatura de transición por la similitud de otras propiedades se les conoce como *superconductores de tipo I.*

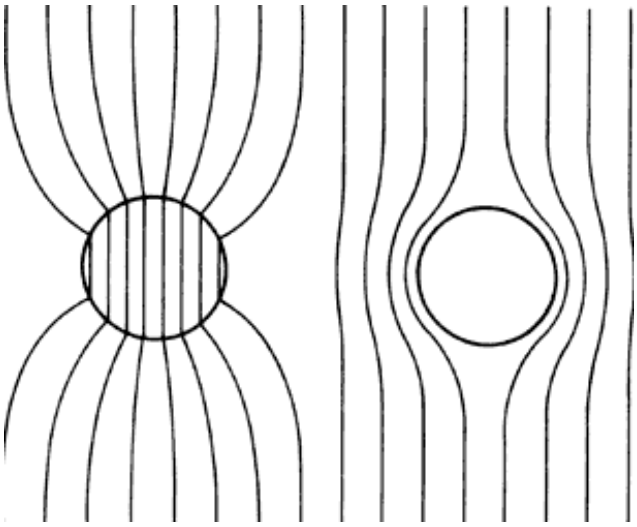

Figura 39. Se muestra el efecto de la superconductividad en un campo magnético. Una esfera de material ferromagnético (círculo izquierdo) concentra las líneas de fuerza del campo, mientras que una de material superconductor (círculo derecho) expele el campo.

Pero existen otros tipos de superconductores cuyas características y propiedades son muy técnicas o bien son aún desconocidas para listar aquí. Y, curiosamente, estos superconductores son los que tienen la mayor aplicación en la práctica. Entre ellos están los llamados superconductores del tipo II que pueden formarse haciendo aleaciones de películas delgadas, formando compuestos con estos superconductores y de otras maneras diferentes.

La característica esencial de este tipo de superconductores puede entenderse si recurrimos de nuevo al modelo simple de la conductividad metálica que hemos expresado con base en el movimiento de los electrones no localizados por la malla metálica. Cuando un electrón no localizado viaja por dicha latiz, choca con los núcleos metálicos fijos en los sitios de la malla. Si medimos cuál es la distancia promedio que recorre el electrón entre dos colisiones sucesivas, después de numerosas colisiones, se obtiene lo que se conoce como la *trayectoria libre media*. Claramente, esta cantidad tiene dimensiones de longitud, al igual que la longitud por la cual penetra el campo magnético en el experimento de Meissner-Ochsenfeld. Una característica común a *todos* los superconductores del tipo 1 es que la longitud de penetración del campo magnético (que es del orden de 10-6 cm) es mucho menor que la trayectoria libre media (que es del orden de 10-6 cm). En los superconductores del tipo II ocurre lo contrario y esto tiene como consecuencia que la forma en que ocurre la transición superconductiva, cuando un campo magnético está presente, difiere *radicalmente* del comportamiento que obedecen los superconductores del tipo I.

Si volvemos por un momento a la figura 39 veremos que la transición de un metal de su fase normal no superconductora a la fase superconductora, a una temperatura dada, ocurre para uno y sólo un valor del campo magnético crítico. La transición de fase, como lo muestra también la figura 35 es una transición súbita. En un superconductor del tipo II existe toda una gama de valores del campo magnético para los cuales el material es simultáneamente superconductor y metal normal (Figura 40). En esta región, llamada *fase mixta*, el material puede ser portador de una corriente eléctrica sin resistencia y, además, permanecer como tal aun si se trata de campos magnéticos grandes. Así se han construido superconductores que, una vez que se establece en ellos una corriente de 20 a 30 amperios, pueden generar campos magnéticos enormes sin requerir para ello de energía alguna.

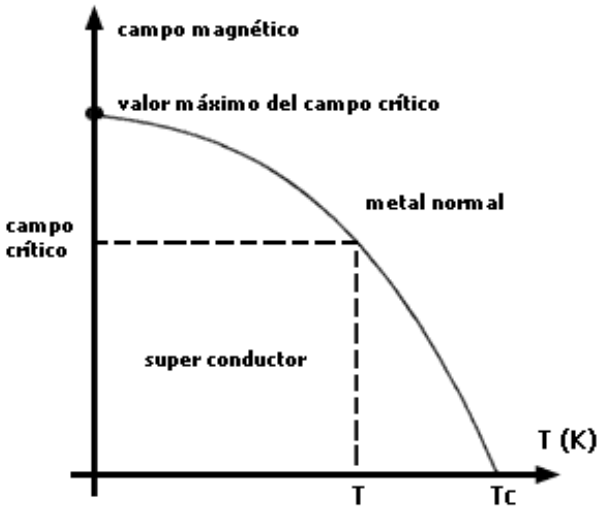

Figura 40. El comportamiento del campo magnético crítico para un superconductor I como función de la temperatura.

Pero retrocedamos un poco para preguntarnos la causa del fenómeno de la superconductividad. La idea básica al respecto fue propuesta en 1950 por H. Fröhlich en Inglaterra y John Bardeen en EUA. De acuerdo con nuestro

modelo de un conductor metálico, los electrones que no están firmemente ligados a los átomos encuentran una resistencia proveniente de estos últimos en su desplazamiento a través del metal. La razón es que, en realidad, estos átomos no están completamente en reposo. Vibran a lo largo de tres direcciones perpendiculares entre sí, alrededor de sus posiciones de equilibrio, como si fuesen resortes. Este movimiento es producido por la resultante de todas las fuerzas que sobre cada átomo individual ejerce el resto de los átomos que componen el metal. Y son precisamente estas vibraciones las que impiden el paso libre de los electrones. Sin embargo, Fröhlich y Bardeen argumentaron que, a medida que la temperatura disminuye, las vibraciones dejan de obstruir el flujo de electrones conduciéndolos como lo hace con un bote un oleaje regular. En otras palabras, las mismas vibraciones de los átomos se convierten en el agente que hace que un metal sea superconductor. Y, de acuerdo al principio de incertidumbre de Heisenberg, esta vibración jamás puede desvanecerse aun en el cero absoluto. Así pues, a temperaturas muy bajas las vibraciones de los átomos y el movimiento de los electrones se sincronizan. Al hacerlo, los electrones viajan suaves y alegremente junto con las vibraciones como un buen *surfer* lo hace con la cresta de una ola (Figura 41).

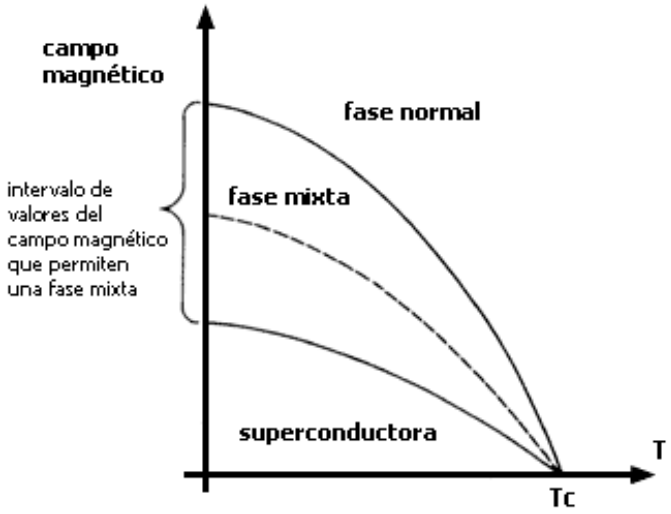

Figura 41. El comportamiento del campo magnético crítico para un superconductor del tipo II como función de la temperatura.

¿Por qué entonces, puede uno preguntar, los metales que son comparativamente malos conductores a temperaturas normales son los más aptos para ser buenos superconductores? El argumento de Fröhlich y Bardeen se basa en que dichos metales tienen un fuerte efecto dispersor sobre los electrones a temperaturas altas. Así que al enfriarlos deben tener un fuerte efecto sobre los electrones a bajas temperaturas cuando las vibraciones de los átomos y el movimiento de los electrones se coordinan entre sí. Por lo tanto, entre más pesado sea un elemento, menor es su posibilidad de convertirse en un superconducor pues las vibraciones de sus átomos a bajas temperaturas serán comparativamente más lentas que para un metal ligero. Así pues, los isótopos más ligeros de un elemento dado serán superconductores a temperaturas mas elevadas que los pesados. Este efecto fue previsto por Fröhlich y comprobado experimentalmente.

Aun cuando la hipótesis del efecto fuera puesta dentro de un modelo más riguroso en 1957 por Bardeen, Cooper y Schrieffer en EUA y por N. N. Bogoliubov en la URSS, las correspondientes teorías no ofrecían entonces una forma confiable de predecir qué sustancias son candidatos viables a convertirse en superconductores ni la temperatura en que se daría el fenómeno. La solución al problema fue encontrada, también en 1950, por B. T. Matthias y John K. Hulm, en EUA, quienes con gran paciencia probaron un compuesto tras otro hasta que, paulatinamente, fue emergiendo la regla deseada. El factor decisivo para determinar qué tan fácilmente un compuesto se convertía en superconductor a bajas temperaturas es el número de electrones de valencia. Éstos son los que se encuentran menos ligados al núcleo atómico y determinan la afinidad química del compuesto. Los únicos compuestos o elementos que se transforman en superconductores son aquellos que, *en promedio*, tienen entre dos y ocho electrones de valencia por átomo. Y en este intervalo, los materiales con número *impar* de electrones de valencia por átomo, tres, cinco o siete, son los que se convierten en superconductores con mayor

facilidad.

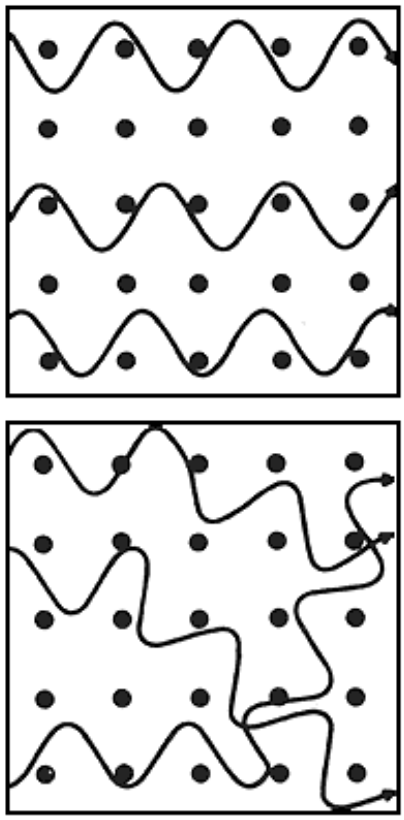

Figura 42. Electrones superconductores (líneas onduladas en la parte superior de la figura) interaccionan en forma ordenada con los átomos de un cristal (círculos negros). Los electrones ordinarios por los átomos (parte inferior de la figura).

Así que hoy en día se cuenta con una guía muy específica para sintetizar superconductores. Desde luego esta condición no es única, existen otros factores que también son determinantes. Por ejemplo, se sabe que la superconductividad es favorecida por ciertas estructuras cristalinas, por el espacio del cristal no ocupado por átomos, etc. Esto ha dado lugar a innumerables compuestos formados por elementos que por sí mismos no son superconductores pero cuya combinación sí lo es. El silicio y el cobalto constituyen un caso típico. El silicio *no* es metal, ni siquiera es un buen conductor de la electricidad. El cobalto tiene dos peculiaridades que lo descalifican completamente como superconductor: nueve electrones de valencia y es fuertemente magnético, como el hierro. Sin embargo, si ambos se combinan para formar una estructura cúbica simple se convierten en un superconductor, pues el silicio neutraliza el poder magnético del cobalto y reduce el número promedio de electrones de valencia por átomo hasta caer en el intervalo apropiado.

Hasta hace poco, digamos los últimos cinco años, la tendencia en la investigación científica en este campo se ha polarizado fuertemente hacia la búsqueda de materiales superconductores que sean interesantes desde el punto de vista científico y tecnológico. Y el descubrimiento más interesante a lo largo de estas líneas lo constituyen los llamados *superconductores exóticos*, esto es, superconductores que muestran propiedades inesperadas y que hasta hoy exhiben un comportamiento que no ha sido posible interpretar teóricamente. Así, los investigadores intentan sintetizar este tipo de compuestos pues cada nuevo miembro de esta clase de materiales arroja nueva evidencia sobre el comportamiento de tales materiales a bajas temperaturas. De entre todas estas clases de materiales, quizás lo más impactante sean los superconductores orgánicos, descubiertos por investigadores de la compañía Dupont a principios de la década de los años sesenta, con los que el vasto campo de la química orgánica se abrió al campo de la física de los metales. La temperatura de transición más alta reportada hasta 1984 en los superconductores

orgánicos es de 2.3 K, así que la búsqueda de este tipo de compuestos con temperaturas de transición mayores continúa.

No obstante estos adelantos, el impacto más sorprendente en el campo de la superconductividad se produjo cuando en el mes de enero de 1986 Karl A. Müller y Johannes G. Bednorz, de los laboratorios de investigación de la IBM en Zurich, Suiza, anunciaron que un óxido de bario, lantano y cobre exhibía propiedades superconductoras a 35 K. El descubrimiento, por el cual Müller y Bednorz fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 1987, desató una verdadera oleada de trabajos experimentales y teóricos conocidos ahora con el nombre de *superconductividad a temperaturas altas*. En unos cuantos meses, varios grupos de investigadores, entre ellos S. Tanaka de Tokio, P.W.C. Chu de Houston, B. Battogg de la compañía Bell Telephone, informaron sobre diferentes compuestos superconductores cuya temperatura crítica era de hasta 90 K. Según Paul Chu, de la Universidad de Houston, Texas, con un poco de suerte será posible llegar a obtener superconductores con temperaturas hasta de 240 K. Pero la euforia inicial se ha visto un poco ensombrecida por un sinnúmero de dificultades y hasta ahora sólo ha sido posible fabricar tales compuestos, por cierto de estructura un tanto complicada, en el laboratorio. Alrededor de estos materiales se concibieron fabulosas aplicaciones tecnológicas que no nos detendremos aquí a enumerar. Las expectativas, aunque promisorias y atractivas, todavía están muy lejos de poderse alcanzar a nivel tecnológico.

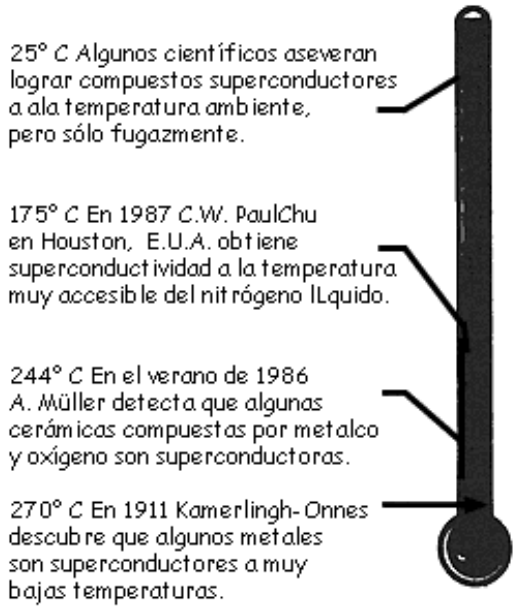

Figura 43. La epidemia febril.

Por una parte, en opinión de V. Ginzburg del Instituto Lebedev de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética y uno de los grandes expertos en superconductividad, dos años no han sido suficientes para poder aclarar las propiedades físicas de los superconductores de alta temperatura. Desconocemos todavía el mecanismo inherente a la superconductividad y a la naturaleza misma de las aplicaciones que con ella pueden llevarse a cabo. En particular, no se sabe cuáles son las restricciones generales sobre el valor de la temperatura crítica Tc y que parecen no existir para Tc hasta del orden de 100 K. Posiblemente tampoco las haya para temperaturas más altas, del orden de 400 K. Así pues, existe toda la razón para hacer superconductores de Tc alta y los mejores candidatos parecen ser los superconductores orgánicos y los compuestos inorgánicos laminados.

Por otra parte, el campo de la superconductividad a temperaturas altas sigue siendo concebido como uno de grandes perspectivas tecnológicas, a largo plazo. Sólo para ejemplificar, el consorcio formado por la American Telegraph and Telephone (ATT), la IBM y el Instituto Tecnológico de Massachussetts, invertirá varios millones de dólares para buscar la aplicabilidad de estos materiales a la industria aeroespacial y la industria electrónica. En

Japón también se invierten grandes cantidades de dinero con objetivos muy similares. Es probable que en un futuro no muy lejano, veamos algunos resultados sorprendentes.

[Nota 7] [<--

La resitencia eléctrica es el inverso de la conductividad

VI. SUPERFLUIDEZ

Los fenómenos que exhibe la materia a temperaturas bajas, es decir, a temperaturas cercanas al cero absoluto (-273.2° C), son numerosos y diversos. A estas temperaturas las propiedades térmicas, eléctricas y magnéticas de muchas sustancias experimentan grandes cambios y, ciertamente, el comportamiento de la materia puede parecer extraño y exótico en comparación con el que muestra a temperaturas ordinarias. Sin duda, entre estos fenómenos los dos más extraordinarios e importantes son la superconductividad y la superfluidez. El primero ya lo hemos tratado en el capítulo anterior, en este capítulo examinaremos el segundo. Pero antes de decir en qué consiste y qué propiedades tiene la superfluidez, describiremos someramente las principales características del primer actor en este fenómeno: el elemento helio.

Después del hidrógeno, el helio es el elemento más ligero, tanto, que siempre tiende a subir a las capas superiores de la atmósfera, lo cual implica que cerca de la superficie terrestre prácticamente es inexistente. El aire ordinario únicamente contiene alrededor de cinco partes de helio por millón de partes de aire. Pero si el helio es escaso en la atmósfera, aún lo es más en la corteza terrestre, la cual sólo contiene, aproximadamente, ¡ocho partes por mil millones! Además, como el helio forma muy pocos compuestos químicos, rara vez se le encuentra combinado con otros elementos en líquidos o sólidos. Y, sin embargo, a pesar de ser tan escaso en la Tierra, abunda en el Universo del cual constituye el 23% de su masa.

Precisamente debido a su escasez natural en la Tierra el helio fue descubierto por primera vez en el Sol. La evidencia inicial de su existencia se produjo al analizar la luz emitida por el Sol durante un eclipse solar de 1868. Se detectaron ciertas líneas espectrales en la región amarilla del espectro, las cuales se identificaron, tres años más tarde, como producidas por un nuevo elemento al que se llamo helio, que en griego significa Sol. No obstante, a pesar de ser tan escaso y de las enormes dificultades que supuso su licuefacción, el helio ha sido el líquido más estudiado después del agua.

El núcleo del átomo de helio contiene dos protones, es decir, su número atómico es dos, pero puede contener de uno a seis neutrones, hecho que da lugar a la existencia de seis diferentes isótopos del helio. Al número de protones y neutrones del núcleo se le llama número de masa, de modo que este número, en los isótopos del helio, varía entre 3 y 8. Sin embargo, sólo los isótopos con números de masa 3 y 4 son estables, los restantes son inestables lo que significa que sus núcleos son radiactivos, emiten partículas, y al hacerlo se convierten rápidamente en otros elementos. El isótopo helio**-4 (^{4}He)** es, relativamente, mucho más abundante que el helio**-3 (^{3}He)**, tanto en la atmósfera como en la corteza terrestre.

El helio tiene propiedades a la vez extrañas y fascinantes. Por ejemplo, su comportamiento frente a los cambios de temperatura es completamente diferente al de los demás elementos. En efecto, observamos repetidamente que si la temperatura de un gas se reduce de manera tal que su presión se mantenga siempre igual a la presión atmosférica durante este proceso de enfriamiento, entonces el gas se convierte en líquido. Más aún, si el líquido continúa enfriándose se convierte finalmente en sólido. Esta secuencia de transformaciones o cambios de fase ha sido bien establecida experimentalmente y ha hecho posible la licuefacción de muchos gases y la solidificación de los correspondientes líquidos. Al respecto ha sido necesario inventar y desarrollar nuevos métodos y técnicas de refrigeración a fin de producir las temperaturas cada vez más bajas necesarias para licuar los diferentes gases. Una breve relación de las etapas de esta jornada hacia las bajas temperaturas se muestra en la tabla 2, en la que se indica el logro obtenido y la temperatura alcanzable en cada etapa hasta 1960. Ahora bien, el helio no sigue la secuencia de cambios que acabamos de describir, es una excepción a la regla. Se observa, en cambio, que si la presión se mantiene igual a la presión atmosférica ambiente, el gas helio se licua a 4.2 K. pero *no* se convierte en sólido sin importar cuánto se disminuya su temperatura. En otras palabras, si bajo estas condiciones fuera posible alcanzar el cero absoluto, observaríamos que el helio nunca se congela, que siempre permanece en su fase líquida. Esta es su propiedad más importante pues, como veremos, da lugar a la superfluidez y a otros efectos espectaculares asociados a ella.

TABLA 2. La jornada de cien años hacia el cero absoluto

Fecha	*Investigador*	*País*	*Desarrollo*	*Temp. °K*
1860	Kirk	Escocia	Primer paso hacia la refrigeración intensa: alcanzó temperaturas inferiores al punto de congelación del Hg.	234.0
1877	Cailletet	Francia	El primero en licuar oxígeno: usó el proceso de expansión regulada del recipiente de presión; obtuvo sólo una tina neblina.	90.2
1884	Wroblewski y Olzewsski	Polonia	Primeras medidad de propiedades a bajas temperaturas :usó pequeñas cantidades de N_2 yO_2 líquídos.	77.3
1898	Dewar	Inglaterra	El primero en licuar hidrógeno : usó el efecto Joule-Thompson e intercambiador de calor a contracorriente.	20.4
1908	Kamerlingh Onnes	Holanda	Primero en licuar helio: usó el mismo método que Dewar; inmediatamente disminuyó la presión sobre el líquido para llegar a 1 K.	4.2
1927	Simon	Alemania e Inglaterra	Inventó el aparato licuador de helio: usó expansión adiabática del recipiente a presión con preenfriamiento con H_2 líquido.	4.2
1933	Giauque y MacDougall	EUA	Primera desmanetización adiabática.El pricipio fue propuesto primero por Giauque y Debye en 1926.	0.25
1934	Kapitza	Inglaterra y URSS	Inventó el aparato para licuar helio con máquina de expansión: hizo posible la licuación del helio sin preenfriamiento con H_2 líquido.	4.2
1946	Collins	EUA	Inventó el aparato comercial para licuar helio: usó máquinas de expansión e intercambiadores de calor a contracorriente.	
1956	Simon y Kurti	Inglaterra	Primeros experimentos de enfriamiento nuclear: usaron desmategnización adiabática de la etapa nuclear de una sal paragmagnética.	
1960	Kurti	Inglaterra	Alcanzó la temperatura más baja hasta la	

fecha: métodos de enfriamiento nuclear y aparato recientemente perfeccionado. 10^{-6}

La licuefacción del helio fue lograda por el gran físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, el 10 de julio de 1908 en el Laboratorio de Bajas Temperaturas de la Universidad de Leyden, Holanda. Fue un gran logro, pues de hecho inició el desarrollo de la física y la ingenieria de bajas temperaturas o criogenia. Además, permitió al mismo Kamerlingh Onnes descubrir en el mismo año el fenómeno de la superconductividad, o flujo de electrones sin fricción que, como ya vimos en el capítulo anterior, implica la desaparición de la resistencia eléctrica de un metal. Pero, además de los nuevos fenómenos y las múltiples aplicaciones prácticas a que dio lugar el comportamiento singular del helio, es importante señalar que precisamente las características de tal comportamiento constituyen la primera indicación de que las propiedades del helio sólo podrían entenderse utilizando conceptos diferentes de los que hasta entonces se habían empleado para explicar las propiedades de otros líquidos menos exóticos. Pero, antes de discutir estos conceptos, describamos las propiedades sorprendentes e insólitas que exhibe el helio.

En el mismo Laboratorio de Bajas Temperaturas de Leyden, en 1932, los físicos holandeses W.H. Keesom y su hermana A.F. Keesom descubrieron que si después de licuar al helio se le enfría hasta 2.19 K. pero manteniendo su presión igual a la atmosférica, el isótopo helio-4 sufre una transición de fase, pero no a una fase sólida, sino a una nueva fase líquida. A esta transición de fase se le llama el *punto lambda* porque cuando se grafica el calor específico $\mathbf{C_s}$, del helio, que representa la cantidad de calor necesario para elevar su temperatura un grado, contra la temperatura T, se encuentra que la curva se parece a la letra griega λ, según se muestra en la figura 44.

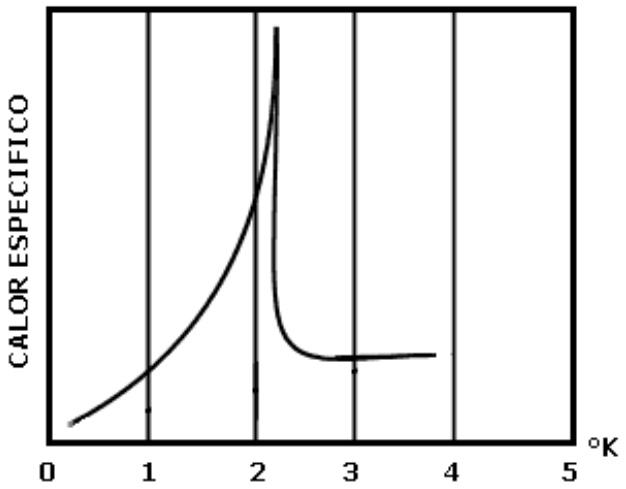

Figura 44. El punto lambda a 2.2 K marca la transición de helio líquido normal a superfluido. En este punto el calor específico decrece abruptamente.

A este nuevo estado se le llama helio-II, para distinguirlo del helio ordinario, helio-I, que existe a temperaturas superiores a 2.19 K. Para evitar confusiones resumamos la situación: el helio-4 puede hallarse en el estado líquido helio-I a temperaturas entre 4.2 K. y 2.19 K; a temperaturas inferiores alcanzará el nuevo estado líquido helio-II. Toda esta información puede expresarse de manera muy compacta y sencilla en términos del diagrama de fases del helio, mostrado en la figura 45, y que muestra cómo se comporta la presión en función de la temperatura e indica para qué valores de estas cantidades puede el helio exhibir sus fases gaseosa, líquida e inclusive sólida, pues efectivamente el helio puede solidificarse, pero únicamente a presiones mayores de 25 atmósferas. Con la restricción de mantener la presión igual a una atmósfera, como mencionamos antes, el diagrama indica que

efectivamente el helio sólo puede ser líquido.

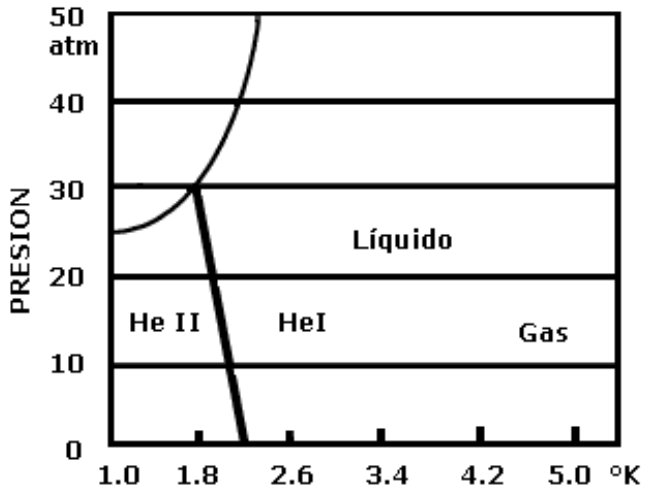

Figura 45. El diagrama de fases del helio.

En cambio, el isótopo helio-3 sólo puede existir en el estado líquido helio-I, al menos para temperaturas mayores de 0.1 K. Sin embargo, en 1972 se descubrió que el isótopo 3He tiene propiedades superfluidas a sólo unas milésimas de grado por encima del cero absoluto. Pero es el estado líquido helio-II el que muestra propiedades únicas.

Los hermanos Keesom y sus colaboradores también descubrieron en 1935 que el helio-II era un extraordinario conductor de calor: observaron que si un tubo capilar se llenaba con helio-II, ¡el calor se transportaba de un lado al otro del capilar 200 veces más rápido que en un alambre de cobre a la temperatura ambiente! Fue precisamente tratar de explicar esta sorprendente capacidad del helio para conducir calor lo que llevó al gran físico ruso P.L. Kapitza a descubrir la superfluidez en 1937, en el Instituto de Problemas Físicos de Moscú. Kapitza sospechaba que la extraordinaria conductividad térmica del helio-II no era la conductividad térmica ordinaria que se usa, por ejemplo, para describir la conducción de calor por un metal. Más bien, Kapitza creía que la gran conductividad del helio se debía a que el helio mismo se movía en el capilar, es decir, a que existía un flujo. Pero si esta conjetura era correcta, implicaba que el helio-II debía fluir con una extraordinaria facilidad y, por lo tanto, según hemos visto en capítulos anteriores, su viscosidad o resistencia interna al flujo sería forzosamente muy baja o nula. Es decir, que el helio-II debía ser un "superfluido". Para probarlo Kapitza realizó el experimento esquematizado en la figura 46, que muestra una pequeña rendija entre dos placas de vidrio sumergidas en un recipiente que contiene helio. El espesor de la rendija o "capilar" es pequeñísimo, aproximadamente de medio micrón, que es igual a la mitad de la millonésima parte de un metro.

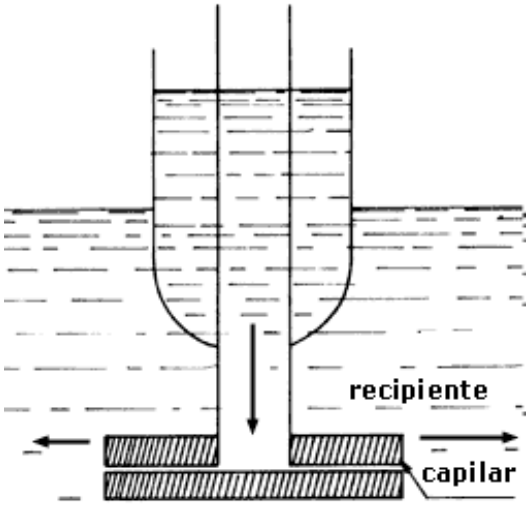

Figura 46. El experimento de Kapitza.

Kapitza observó que en el estado helio-I el helio no fluía a través del capilar, mientras que el helio-II pasaba por él rápidamente igualando los niveles del líquido en el tubo capilar y en el recipiente. Midiendo este tipo de efecto, Kapitza llegó a la sorprendente conclusión de que la viscosidad del helio-II era muy pequeña, menor que una diezmilésima de la viscosidad del hidrógeno gaseoso. Es decir, que para todo propósito práctico la viscosidad del helio-II es nula y por lo tanto se comporta como un fluido ideal. Para describir esta propiedad del helio-II, Kapitza acuñó el nombre de *superfluidez*.

Esta cualidad del helio-II de poder encontrarse en sitios en donde el helio-I no puede estar, produce otros efectos espectaculares. Uno de ellos es el *efecto fuente*, que se produce, por ejemplo, con un dispositivo como el mostrado en la figura 47. Inicialmente el recipiente sólo contiene helio-II y el tubo consta de un tapón poroso de algodón en uno de sus extremos que desempeña el papel de un capilar, es decir, impedirá que el helio-I penetre al tubo cuando esta fase exista en el recipiente pero, como ya hemos visto, permite sin dificultad el paso de helio-II. Si ahora calentamos el interior del tubo haciendo circular una corriente eléctrica por la resistencia, pero de manera que la temperatura en el interior ascienda sólo ligeramente por encima de 2.19 K, entonces el helio-II dentro del tubo se convertirá en helio-I. Pero como el helio-II puede penetrar al tubo libremente y se comporta como si el helio-I no estuviera presente, más y más helio-II se convierte en helio-I hasta que éste no tiene mas remedio que escapar por la boquilla superior del tubo produciendo una fuente. Nótese que este efecto en realidad es equivalente a operar una bomba sin partes móviles a temperaturas muy bajas.

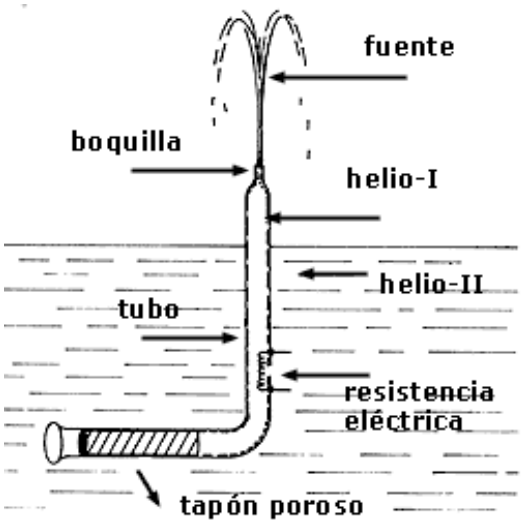

Figura 47. El efecto fuente producido por el helio superfluido

.

Otra consecuencia de la superfluidez del helio es el *efecto de reptación*, que consiste en que una película muy delgada de helio puede escalar las paredes del recipiente que lo contiene en aparente desafío a las leyes de la gravedad. Si tomamos un tubo de ensayo vacío pero enfriado a una temperatura inferior a 2.19 K, y lo sumergimos parcialmente en un recipiente que contiene helio-II, observaremos que el helio trepa por las paredes exteriores del tubo y penetra en él hasta que el nivel de helio-II dentro es igual al nivel del recipiente (Figura 48 (a)). Pero también ocurre el efecto inverso, a saber, si ahora se eleva el tubo de manera que esté fuera del recipiente, el helio reptará en sentido inverso escalando las paredes interiores, saldrá del tubo reptando por sus paredes exteriores hasta llegar al extremo inferior del tubo desde donde goteará al recipiente (Figuras 48 (b) y (c)). Ahora bien, cualquier fluido que moja una superficie forma una película delgada, pero en el caso de los fluidos ordinarios su viscosidad es tal que la película se forma lentamente y fluye muy poco. En cambio con el helio-II la película se forma muy rápido y, como su viscosidad es nula, se mueve rápidamente. Se comporta más o menos como un sifón a lo largo del cual fluye el helio. La velocidad de flujo puede llegar a ser considerable, de 30 cm o más por segundo. Como es de imaginarse, este efecto causa problemas al diseñar recipientes para almacenar helio-II (criostatos), pues el líquido escala las paredes y ¡se escapa!

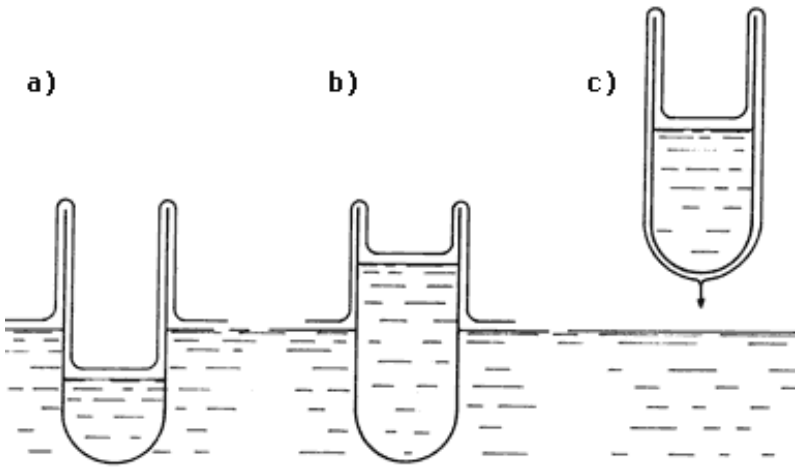

Figura 48. Película superfluida reptante.

Al tratar de comprobar su conjetura de que el transporte de calor del helio-II ocurría mediante el movimiento o flujo del helio mismo, Kapitza observó otro fenómeno desconcertante. Colocó una pequeña veleta cerca de la abertura de un tubo de ensayo de modo que cualquier flujo hacia el exterior del tubo sería fácilmente detectable y medible en términos de la desviación experimentada por la veleta. Llenó el tubo con helio-II y lo calentó e iluminó. Observó que la veleta se desviaba de su posición inicial indicando la presencia de un flujo saliente. Esto demostraba que el transporte de calor si implicaba un flujo del helio, pero lo desconcertante y paradójico fue que a pesar de existir un flujo hacia el exterior, ¡el tubo no se vaciaba y permanecía lleno helio-II! otro fenómeno paradójico como el anterior se descubrió al tratar de medir la viscosidad del helio con un viscosímetro de cilindros concéntricos (Figura 49). En este tipo de aparato se confina al fluido al espacio entre ambos cilindros y el cilindro exterior se hace girar lentamente. Un fluido viscoso ordinario transmite una fuerza y produce un par en el cilindro interior, el cual empieza a girar en la misma dirección. Por definición esta fuerza es una medida de la viscosidad del fluido. Lo sorprendente fue que al medir la viscosidad del helio-II con éste método resultó ser diferente de cero y, a ciertas temperaturas, incluso podía ser mayor que la viscosidad del helio-I.

¿Cómo es posible explicar estas paradojas?, ¿qué clase de líquido exótico es el helio-II que en algunos casos fluye con viscosidad nula, pero que en otros experimentos exhibe una viscosidad finita?, ¿cómo es posible que al calentarse el helio-II "salga" del recipiente que lo contiene pero que al mismo tiempo éste no se vacíe?

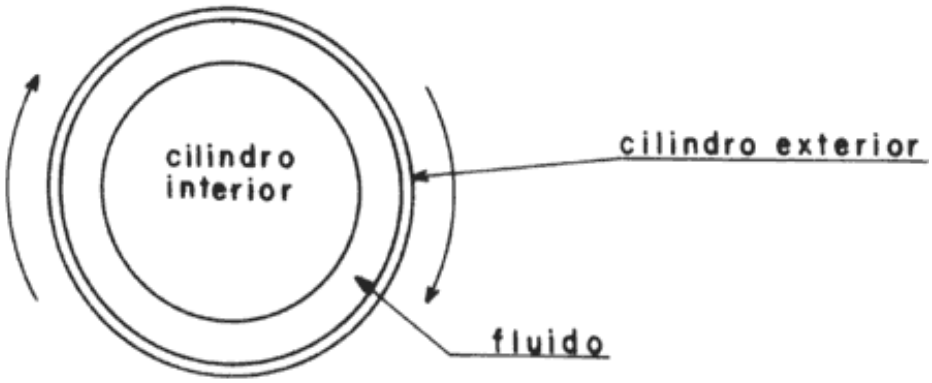

Figura 49. Viscosímetro de cilindros concéntricos.

Para contestar estas preguntas es preciso recordar que la materia a escala macroscópica, es decir, en cualquiera de las fases o niveles de agregación que hemos considerado en este libro, posee tanto las propiedades ordinarias que nos son familiares, como propiedades *cuánticas* fundamentales. Estas últimas son manifestaciones del sistema peculiar de leyes que gobiernan las propiedades de la materia a una escala microscópica, o sea, en las escalas propias del mundo individual de los átomos y las moléculas. Ahora bien, a temperaturas ordinarias el movimiento caótico, incesante, de los átomos y moléculas [Nota 8] enmascara totalmente el comportamiento cuántico de las partículas individuales y, como resultado, sólo vemos las propiedades macroscópicas ordinarias, a las que calificamos de *clásicas* para distinguirlas de las cuánticas. Pero cuando la temperatura del sistema desciende hasta el dominio de las bajas temperaturas, los movimientos térmicos de las partículas son mucho menores. Recuérdese que la cantidad de energía cinética, es decir, debida al movimiento, que en promedio se reparte entre las muchas moléculas de un material, determina la temperatura del mismo. Entonces, en términos generales, podemos decir que si la temperatura de un material aumenta, el movimiento de sus moléculas es mayor y *viceversa*. Desde este punto de vista, en el mundo de los átomos y moléculas individuales, bajas temperaturas significa "orden" y altas temperaturas "desorden". En consecuencia, a temperaturas muy bajas, las propiedades cuánticas fundamentales de una sustancia podrían ser observables y de hecho es precisamente lo que ocurre con el helio-II. Su temperatura es tan baja que los movimientos térmicos de sus moléculas ya no enmascaran a los efectos cuánticos y éstos se manifiestan plenamente a una escala macroscópica. Así que el helio-II se transforma en un *líquido cuántico* antes

de solidificarse y, de acuerdo con las leyes cuánticas, puede permanecer líquido aun en el cero absoluto. En efecto, uno de los principios de la física cuántica es que el movimiento de los átomos no tiene que cesar completamente en el cero absoluto. Por supuesto, esto es totalmente opuesto a nuestra intuición "clásica" según la cual, dada la relación entre temperatura y movimiento molecular mencionada anteriormente, este movimiento debería desaparecer por completo en el cero absoluto. Por tanto, en estas regiones de temperatura esperaríamos que al moverse poco los átomos las fuerzas atractivas entre ellos entraran en acción y produjeran la solidificación del líquido.

Tomando en cuenta estas características inherentemente cuánticas del helio-II, en 1940 el gran físico ruso Lev Davidovich Landau propuso una teoría para explicar la superfluidez. La idea básica de esta teoría constituye un verdadero desafío a nuestro sentido común, pues propone que el helio-II ¡realiza dos movimientos diferentes simultáneamente! En otras palabras, que para poder describir completamente el flujo del helio-II es necesario especificar dos velocidades en cada punto y al mismo tiempo. Por supuesto que esto es muy distinto a lo que ocurre con un líquido menos exótico para el que es suficiente conocer una velocidad en cada punto para caracterizar su flujo. Pero recordemos nuevamente que el helio-II es un líquido cuántico y que nuestra intuición es clásica; luego, suposiciones como la anterior, que chocan con nuestro sentido común, pueden ser perfectamente válidas.

De hecho esta situación puede ser visualizada fácilmente en términos de un modelo más intuitivo. El mismo Landau y el físico húngaro Laszlo Tisza propusieron una *analogía* llamada el *modelo de dos fluidos*. Imaginemos que el helio-II está compuesto por dos líquidos que se mueven independientemente uno del otro, es decir que no ejercen fuerzas de fricción entre sí al moverse. Cada fluido tiene propiedades diferentes; por ejemplo, una de las componentes se mueve sin viscosidad, mientras que la otra es un líquido viscoso ordinario. A la primera Landau la llamó *superfluida* y a la segunda *normal*. Al fluir sólo la componente normal transporta calor; en cierto sentido puede decirse que esta componente es el calor mismo y que se ha separado de la masa del líquido y que se mueve respecto a la componente superfluida. Desde luego, este mecanismo de "conducción" de calor difiere completamente de nuestra idea usual de este proceso, que está asociada al movimiento térmico desordenado de las moléculas de un sistema. Pero no debemos olvidar en ningún momento que estamos haciendo una analogía. En la realidad sólo existe un líquido, el helio-II. Este modelo y sus características son sólo una herramienta que nos facilita el análisis y la descripción del sistema real.

Figura 50. Piotr L. Kapitza.

El modelo permite explicar las paradojas de los experimentos anteriores, veamos cómo. En el experimento de Kapitza (Figura 47) el helio-II fluye sin fricción a través del capilar, mientras que en el viscosímetro de cilindros concéntricos muestra una viscosidad finita. De acuerdo con el modelo de los dos fluidos lo que diríamos es que en

el primer caso es la componente superfluida la que se mueve por el capilar, en tanto que la componente normal no pasa. En el segundo experimento, es la componente normal la que transmite la fuerza entre ambos cilindros pues es un fluido ordinario con viscosidad, de manera que lo que se mide en este experimento es la viscosidad de la componente normal. La componente superfluida desde luego no tiene viscosidad y no transmite ninguna fuerza.

Figura 51. Lev Davidovich Landau.

Ahora consideremos el otro experimento paradójico realizado por Kapitza en el cual el helio-II a pesar de "salir" de un recipiente no lo vacía. En este caso únicamente la componente normal fluye y produce la deflexión en la veleta, la componente superfluida permanece en el recipiente. Nótese que, de acuerdo a lo que hemos mencionado antes, es el calor lo que se propaga hacia afuera del recipiente. En realidad se trata de una manifestación de un fenómeno más general del helio-II, a saber, su habilidad para transmitir *ondas de temperatura.* Para entender qué son estas ondas, recordemos las ondas sonoras en un fluido ordinario. El sonido se transmite por medio de una *onda de presión*. Una onda acústica o sonora puede producirse de diversas maneras, por ejemplo, por la vibración de una cuerda de violín o de la membrana de una bocina. Así se producen regiones de alta y baja presión, análogas a las que aparecen en la superficie del agua cuando se arroja un guijarro. Después de que la onda de presión pasa por un punto, la presión retorna al valor que tenía antes de su paso. Este mecanismo de propagación es muy diferente al de la temperatura. Sabemos que cuando se aplica calor en un punto de un material que inicialmente tiene una temperatura uniforme, parte de él calienta al material en ese punto, otra parte se propaga a los puntos vecinos los cuales también elevan su temperatura, aunque en menor cantidad. Cuando cesa de aplicarse calor a una región de material, ésta no "se propaga" como la onda sonora, sino que el calor se transmite y se aleja del punto en donde se suministró y la temperatura de este punto disminuye y se iguala a la temperatura del resto del material. El resultado neto es que la sustancia está más caliente. Sin embargo, éste mecanismo ordinario de propagación del calor no ocurre en el helio-II. Si se suministra calor en un punto de este líquido, inmediatamente se produce una "onda de calor" que se propaga y se aleja del punto en cuestión. Aunque cese de suministrarse calor, la onda térmica continúa propagándose como una onda acústica, produciendo aumento en las temperaturas de los puntos por donde pasa. Pero cuando pasa por un punto y se aleja de él, su temperatura disminuye nuevamente a su valor anterior. Ya que ésta es precisamente la manera como se propaga la presión en una onda sonora, a ésta extraña onda térmica del helio se le llama el *segundo sonido*. La velocidad de propagación del segundo sonido puede medirse y resulta ser función de la temperatura. Por ejemplo, a 1.8 K es de 20 metros por segundo, que es una velocidad diez veces menor que la de una onda sonora o "primer sonido" a la misma temperatura (Figura 51).

El fenómeno del segundo sonido también puede entenderse recurriendo a la teoría de los dos fluidos. Recuérdese que se supuso que el helio-II puede realizar dos movimientos simultáneos e independientes. Cuando ambas componentes del helio-II oscilan o se mueven al unísono en la misma dirección, se produce una onda sonora igual

que en un líquido ordinario; pero si ocurre que las componentes se mueven en direcciones opuestas, pasando una a través de la otra, entonces se produce el segundo sonido.

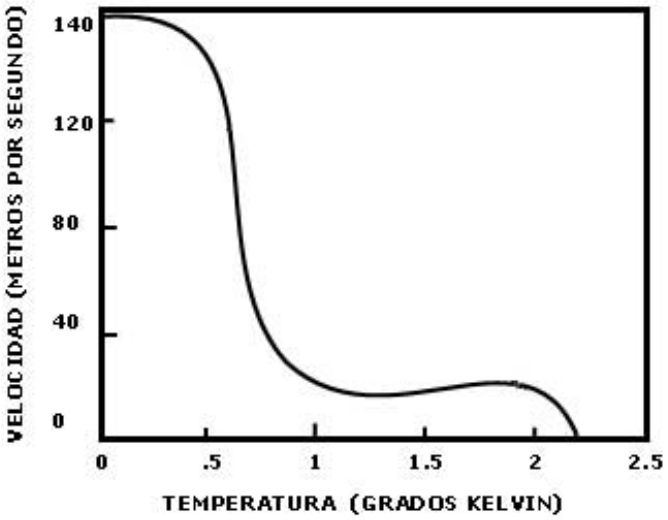

Figura 52. Velocidad del segundo sonido en helio II como función de la temperatura.

Después de haber examinado algunos de los más importantes fenómenos que ocurren en el helio-II, resulta fácil comprender por qué este líquido ha sido objeto de tantos estudios. Los fenómenos que incluye no sólo son importantes por sí mismos, sino que al estudiarlos se ha ampliado nuestro conocimiento del mundo cuántico de los átomos y las moléculas. En el helio-II la naturaleza ha puesto un líquido cuántico a disposición de los físicos para su estudio y su investigación. El helio líquido es el refrigerante que nos provee de las temperaturas adecuadas para realizar investigación a temperaturas menores de 5 K, y, por esta razón, el descubrimiento de Kamerlingh Onnes al licuarlo en 1908 constituyó una de las más grandes contribuciones al avance de la ciencia.

[Nota 8] [<--

Véase *Un movimiento en zigzag* de Eliezer Braun, vol. 13 de esta colección

---

Inicio

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 3000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS

CONTRAPORTADA

Las realizaciones tecnológicas actuales son resultado de la confluencia de los asombrosos logros alcanzados por disciplinas diferentes, especialmente científicas. A cada conquista, el panorama de la ciencia se extiende promisoriamente en todas direcciones y, entre los principales beneficios prácticos, se hallan los materiales nuevos. En *Líquidos exóticos* sus autores explican, de manera clara y detallada, la naturaleza y desarrollo del estudio macro y microfísico del estado líquido de la materia, así como sus relaciones con las fases sólida y gaseosa, remarcando la presencia decisiva de las fases intermedias o estados de la materia cuyas propiedades particulares, en condiciones específicas, ofrecen infinidad de aplicaciones, principalmente en los campos de la industria y de la tecnología. Por citar sólo un ejemplo, los "líquidos exóticos" aparecen en los indicadores numéricos electro-ópticos de las calculadoras y de los relojes digitales que son, de hecho, cristales líquidos.

Tales cristales líquidos sobreenfriados, los superconductores y la superfluidez del hielo, constituyen fluidos especiales cuyo particular comportamiento —que los autores describen como "exóticos" con plena justeza— les facilita, como en el caso del hielo II, a transmitir lo que se ha llamado un "segundo sonido" que se mueve a velocidad menor que el sonido normal.

Para alcanzar resultados tan sorprendentes hay que entender qué significa y cómo se produce el fenómeno del flujo de la materia. El aire, el agua, la sangre, son ejemplos de fluidos; de esto se desprende que el estado líquido es el más abundante en la naturaleza y, sin embargo, el menos estudiado y comprendido. *Líquidos exóticos* contribuye eficazmente a suplir esta deficiencia.

Leopoldo García-Colín, quien ha publicado otros libros en esta colección, se graduó en ingeniería química y física teórica en la UNAM y posteriormente se doctoró en física en la Universidad de Maryland, EUA. Ganador del Premio Nacional de ciencias en 1965 y miembro de El Colegio Nacional desde 1977, se ha distinguido como educador e investigador.

Rosalio Rodríguez Zepeda es egresado de la Facultad de ciencias de la UNAM y se doctoró en física teórica en la Universidad de Utrecht, Holanda. Ha trabajado en física estadística en las Universidades de Temple, Florida y las Islas Baleares. Actualmente es investigador de tiempo completo en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

Inicio