

advance y PERSPECTIVA

ÓRGANO DE DIFUSIÓN DEL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I. P. N.



2005

Año Internacional de la Física



Cinvestav

53 Programas de posgrado

Contamos con 7 unidades que albergan a 546 investigadores.

Ciencias Exactas y Naturales

Ciencias Químicas

Física

Física Aplicada (Cinvestav Mérida)

Física Teórica (Cinvestav Mérida)

Fisicoquímica (Cinvestav Mérida)

Matemáticas

Maestría Doctorado

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

Ciencias Biológicas y de la Salud

Biología Celular

Biología Marina (Cinvestav Mérida)

Biomedicina Molecular

Bioquímica

Ciencias Marinas (Cinvestav Mérida)

Farmacología

Fisiología Celular y Molecular

Fisiología Médica y Experimental

Genética y Biología Molecular

Neurobiología Celular y Molecular

Neurofarmacología y Terapéutica Exp. (Cinvestav Sede Sur)

Patología Experimental

Toxicología

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

Tecnología y Ciencias de la Ingeniería

Biotecnología

Biotecnología de Plantas (Cinvestav Irapuato)

Control Automático

Ingeniería Eléctrica

Ingeniería Eléctrica (Cinvestav Guadalajara)

Ingeniería Cerámica (Cinvestav Saltillo)

Ingeniería Metalúrgica (Cinvestav Saltillo)

Ingeniería Metalúrgica y Cerámica (Cinvestav Saltillo)

Materiales (Cinvestav Querétaro)

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

M

D

Ciencias Sociales y Humanidades

Ecología Humana (Cinvestav Mérida)

Investigaciones Educativas (Cinvestav Sede Sur)

Matemática Educativa

M

D

M

D

M

D

Todos nuestros programas están en el Padrón de Posgrado del Conacyt
12 de ellos son Competentes a Nivel Internacional.



www.cinvestav.mx





Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV



Portada

De la serie "Hablar del silencio", *serigrafía / papel marillo*, 2003

La obra que se reproduce en las fotografías incluidas en este número es del pintor y escultor **Francisco Huazo**, a quien agradecemos su colaboración. arteobjeto@prodigy.net.mx

Avance y Perspectiva, órgano de difusión del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV, es una publicación trimestral. El número correspondiente a abril-junio de 2005, Volumen 24, Núm. 2, se terminó de imprimir en mayo de 2005. El tiraje consta de 5,000 ejemplares. *Editor responsable:* Susana Quintanilla. Oficinas: Av. IPN No. 2508 esquina calzada Ticomán, apartado postal 14-740, 07000, México, D.F. Certificados de licitud del título del No. 1001 otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Reserva de Título No. 577-85 otorgado por la Dirección General del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Publicación periódica: Registro No. 01603-89, características 220221122, otorgado por el Servicio Postal Mexicano. *Negativos, impresión y encuadernación:* Gama sucesores, S.A. de C.V., ingenieros civiles No. 94, delegación Iztapalapa, C.P. 09420, México, D.F. *Avance y Perspectiva* publica artículos de divulgación y notas sobre avances científicos y tecnológicos. Los artículos firmados son responsabilidad de los autores. Las instrucciones para los autores que deseen enviar contribuciones para su publicación aparecen en la última página de esta revista. Se autoriza la reproducción parcial o total del material publicado en *Avance y Perspectiva*, siempre que se cite la fuente. *Avance y Perspectiva* se distribuye en forma gratuita a los miembros de la comunidad del CINVESTAV y a las instituciones de educación superior. Suscripción personal por un año: \$150.00

CINVESTAV

Rosalinda Contreras Theurel
Directora General

José Mustre de León
Secretario Académico

Luis Alfonso Torres Gómez
Secretario de Planeación

Enrique Campesino Romeo
Secretario Administrativo

AVANCE Y PERSPECTIVA

Susana Quintanilla
Directora editorial

Gabriel López Castro
Coordinación editorial

Ricardo Salas & Frontespizio
Begoña Sáinz
Diseño y cuidado de la edición

Verónica Arellano y Ma. Eugenia Ávila
Apoyo editorial

Josefina Miranda López
María Gabriela Reyna López
Captura

CONSEJO EDITORIAL

J. Víctor Calderón Salinas
Bioquímica

Luis Capurro Filigrasso
Unidad Mérida

Marcelino Cerejido
Fisiología

María de Ibarrola Nicolín
Investigaciones Educativas

Eugenio Frixione
Biología Celular

Jesús González
Unidad Querétaro

Luis Herrera Estrella
Unidad Irapuato

Gabriel López Castro
Física

Luis Moreno Armella
Matemática Educativa

Ángeles Paz Sandoval
Química



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV

avance@mail.cinvestav.mx
T/F 57 47 70 76
www.cinvestav.mx/publicaciones

SUMARIO

AVANCE Y PERSPECTIVA

- Presentación editorial 5

Gabriel López Castro

- Materiales blandos 7

José M. Méndez A.

- El botánico, el físico y el borracho 19

Riccardo Capovilla

- Física médica en el Departamento de Física del CINVESTAV 27

Juan José Godina

- Los semiconductores: de los transistores a las nanoestructuras
y la computación cuántica 37

Isaac Hernández-Calderón

- ¿Hacia dónde va la superconductividad? La danza de las ideas 45

Rafael Baquero

- Aplicación de la espectroscopía de lente térmico en
el estudio de materiales semitransparentes 55

*José M. Yáñez, Rodrigo Mayen, Oscar Gómez, Omar Martínez
y Rivelino Flores*

MATICES

- El placer de un "¿por qué ...?" 65

Jesús Guillermo Contreras Nuño

NOTICIAS DEL CINVESTAV 69

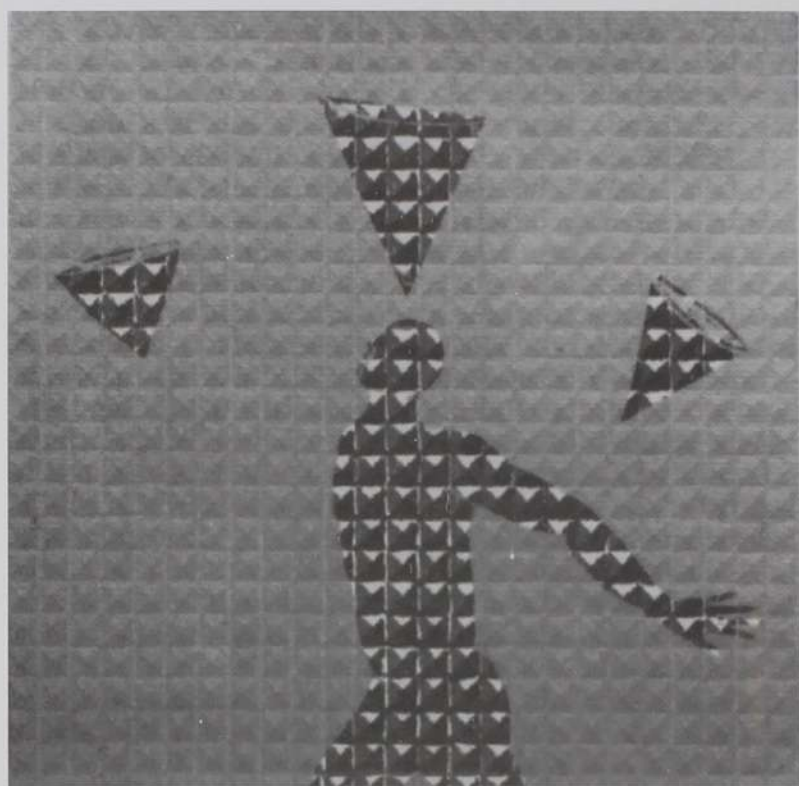
LIBROS Y REVISTAS

- Marcelino Cereijido y sus patrañas 73

Miguel Ángel Pérez Angón

- ¿Qué le falta al Universo? 75

Oscar Rosas-Ortiz

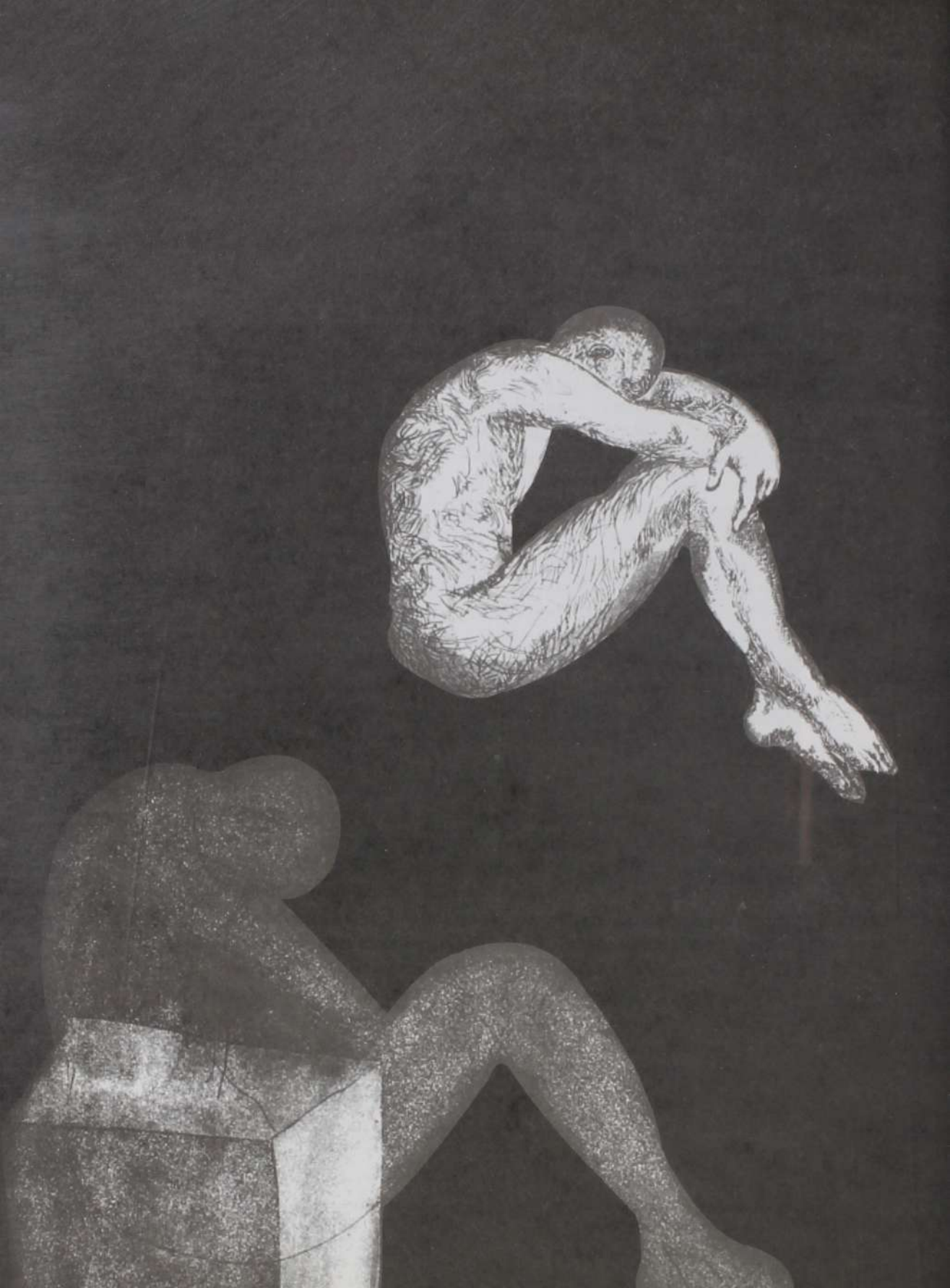


EN SU EDICIÓN DEL 31 DE DICIEMBRE DE 1999, LA REVISTA *TIME* DESTACÓ en su portada a Albert Einstein como “La personalidad del siglo”. Cinco trabajos realizados por este físico en 1905 tuvieron una influencia decisiva en la confección final de las teorías cuántica y de la relatividad especial. Ambas teorías son ampliamente reconocidas como revoluciones científicas del siglo xx y abrieron el camino para el desarrollo de nuevas ideas que han desembocado en impresionantes aplicaciones tecnológicas y cambiado el modo de vida de los seres humanos.

Para conmemorar el primer centenario de este *annus mirabilis einsteniano*, la Organización de las Naciones Unidas decidió declarar a 2005 como el Año Mundial de la Física. Esta celebración tiene como propósito difundir el impacto que la física ha tenido en el desarrollo de la ciencia y, la tecnología y en nuestra vida cotidiana. Estudiosos del tema, museos de ciencia, departamentos de física y asociaciones científicas alrededor del mundo, han sido invitados a participar en actividades que tienen como fin cumplir estas expectativas. La información de los innumerables eventos que tendrán lugar durante este año puede ser consultada en la página web <http://www.physics2005.org/>.

El Departamento de Física del CINVESTAV se une a esta celebración con la organización de diversas actividades, la información puede ser consultada en <http://www.fis.cinvestav.mx/Eventos/2005/>. Este ejemplar, al igual que el número correspondiente a octubre-diciembre de 2004 de *Avance y Perspectiva*, contiene las contribuciones de varios colegas quienes, usando como punto de partida la influencia de los trabajos de Einstein, nos presentan las diferentes especialidades de investigación en Física que se cultivan en el CINVESTAV y las perspectivas y retos que éstas enfrentarán en el presente siglo. En algunas de ellas, puede apreciarse la influencia aún muy actual de los trabajos pioneros de Einstein.

Esperamos que este ejemplar cumpla el propósito de difundir de forma amena la investigación que se realiza en el CINVESTAV y que sirva como una buena guía para interesar a los jóvenes a continuar una carrera de investigación en la física.



MATERIALES BLANDOS

JOSÉ M. MÉNDEZ A.

RESUMEN

LOS MATERIALES BLANDOS, ALGUNAS VECES CONOCIDOS COMO FLUIDOS complejos, incluyen polímeros, coloides, surfactantes y cristales líquidos, entre muchos otros. Estos materiales, aparentemente distintos entre sí, poseen propiedades estructurales y dinámicas similares que se localizan entre las de un sólido cristalino y las de los líquidos y gases moleculares simples. Los materiales blandos surgen de la complejidad y sofisticación del autoensamblado molecular. La versatilidad de este tipo de orden ha sido explotada por la industria manufacturera en la producción de pinturas, plásticos, detergentes y muchos otros productos de uso diario. En la naturaleza, el autoensamblado controla la estructura de las proteínas y de los ácidos nucleicos. Este artículo pretende dar una idea general de algunos de los principios físicos que hacen posible que el género humano y la naturaleza aprovechen el orden supramolecular de la materia condensada blanda.

INTRODUCCIÓN

En la escuela aprendí que la materia puede existir en cualquiera de los estados líquido, gaseoso o sólido. Esta clasificación me pareció natural hasta que, cuando tenía quince años, vi un programa de televisión donde un señor ponía sobre una mesa una bola de plastilina del tamaño de una papa. Sobre la plastilina colocaba con suavidad un enorme y pesado mazo. En cámara rápida se podía observar que la plastilina se deformaba, bajo el peso del martillo, como si se tratara de un líquido. Posteriormente, el mismo señor giraba el mazo en el aire, con la mayor fuerza que le era posible, para terminar golpeando con él la plastilina. Esta última reventaba en astillas, como si fuera un cristal, lo que se podía apreciar perfectamente bien en cámara lenta. La conclusión que del experimento extrajo el señor del programa fue que la plastilina se comporta como líquido, o como sólido, dependiendo de la rapidez con que se le golpee¹. Mi conclusión fue que la clasificación de los estados de la materia no era nada clara.

En realidad, la materia puede existir en una enorme variedad de estados. Tantos, que hasta la fecha no se les ha podido ordenar en una

El Dr. José Miguel Méndez A. es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV. Su correo electrónico: jmendez@fis.cinvestav.mx

clasificación universal. Es más, constantemente se descubren nuevos. No obstante, uno insiste en catalogarlos, mas no en vano, pues los catálogos generados, aunque incompletos, resultan de provecho en el trabajo de comprensión y aprovechamiento de ciertos fenómenos naturales. En el peor de los casos facilitan la comunicación entre los científicos, lo que, por sí solo, es ya una enorme ganancia. En este sentido, la categoría de materia condensada es muy útil. Ésta comprende el caso en que las moléculas que conforman ciertas sustancias permanecen contenidas en un determinado volumen, como en la atmósfera de la Tierra, en un vaso de agua o en un trozo de metal. Nuestra experiencia diaria nos permite subdividir esta categoría de muchas formas distintas. Por ejemplo, según la respuesta a la rapidez con que se golpee, como en la anécdota de la plastilina. La temperatura ambiente provee un criterio distinto, pero relevante para este artículo. La agitación térmica de las moléculas condensadas a temperatura ambiente define una escala de energía de aproximadamente $1/40$ de eV^2 , valor que puede obtenerse de multiplicar la constante de Boltzmann k_B por la temperatura T^3 . Si para causar cambios apreciables en un sistema se requiere de inyectarle energías mucho mayores que $k_B T$ por molécula, se dice que el sistema es rígido, como es el caso de los sólidos cristalinos. Si las energías necesarias son del orden de $k_B T$ por molécula, estamos tratando con materia condensada blanda.

Los líquidos y gases moleculares simples son materia condensada blanda, como una sal fundida o el gas de argón⁴. También lo son los fluidos complejos o materiales blandos, como los

Variable física (unidades)	Partículas coloidales	Partículas del solvente
s [Å]	10^3	1
m [g]	10^{-15}	10^{-23}
Q [e]	10^3	1
n [cm^{-3}]	10^{13}	10^{22}
t [seg]	10^{-8} - 10^{-3}	10^{-12}

TABLA 1. Órdenes de magnitud típicos de una suspensión coloidal.

polímeros, coloides, surfactantes, cristales líquidos y biomateriales, entre muchos otros⁴. En estos últimos, sin embargo, los cambios provocados por una perturbación del orden de $k_B T$ por molécula pueden ir mucho más allá de lo descrito por el calificativo apreciable; pueden ser incluso catastróficos. En los biomateriales, por ejemplo, un aumento en su temperatura de unos cuantos grados puede provocar la muerte de un ser vivo. Los materiales blandos existen en una enorme cantidad de estados, entre los cuales es posible "brincar" a causa de minúsculas perturbaciones, como un pequeño aumento en la temperatura o agregando una pizca de sal. Más todavía, manipulando algunas de las variables del sistema se pueden diseñar, con facilidad y a bajo costo, nuevos estados de la materia, como los cristales líquidos.

El exótico comportamiento de los fluidos complejos o materiales blandos se debe, en buena medida, a que en ellos coexisten muchas componentes disímiles en sus escalas físicas relevantes. Los coloides, por ejemplo, son la suspensión de partículas sólidas, o soluto, en un solvente líquido compuesto de moléculas de masa m , tamaño s , carga Q y densidad numérica n , todas ellas variables de valores muy distintos a los de

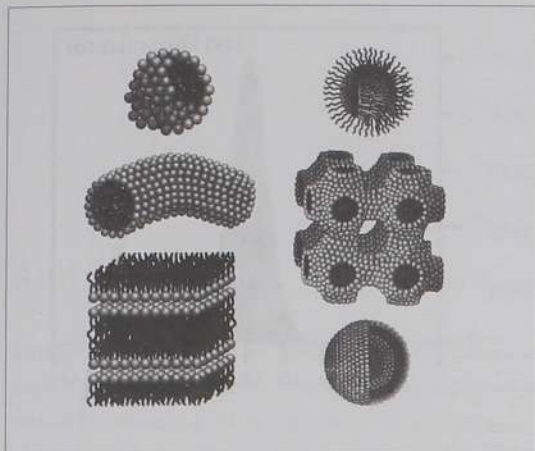


Figura 1. Algunos de los estados en que pueden existir las suspensiones de surfactante⁵.

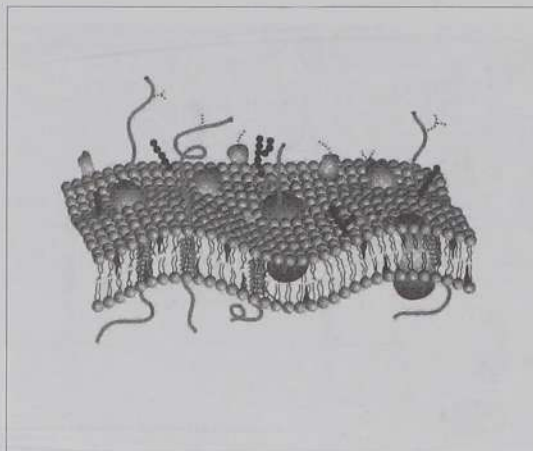


Figura 2. Diagrama esquemático de una membrana celular formada por fosfolípidos. Las incrustaciones representan proteínas, colesterol, azúcares, etc.

las partículas coloidales, como se muestra en la tabla 1. En un solvente puro los fenómenos dinámicos relevantes ocurren en tiempos característicos τ del orden de 10^{-12} segundos. Para las partículas del soluto este tiempo varía entre 10^{-8} y 10^{-3} segundos. No obstante la enorme diferencia entre sus tiempos característicos, ambas dinámicas están acopladas, de tal forma que el solvente constituye un medio en el cual las partículas coloidales pueden dispersarse, formando una suspensión estable, como una pintura o un jarabe para la tos.

La estructura de los materiales blandos se torna más sofisticada, entre más compleja sea su composición. Supongamos, por ejemplo, que en vez de partículas coloidales tenemos suspendidas en agua moléculas de surfactante, como las que constituyen el detergente común. Estas moléculas se conforman de una "cabeza" polar, o cargada, que, por motivos energéticos, gusta de estar en contacto con las moléculas del agua, lo que le ha ganado el nombre de "cabeza" hidrofílica, y de una "cola" hidrocarbúrica que, por el mismo motivo, rechaza dicho contacto, por lo que es nombrada "cola" hidrofóbica. La molécula completa, puesta en agua, no sabe qué hacer; una parte de ella quiere dispersarse en

el solvente, pero la otra parte quiere segregarse. Esta ambivalencia le ha ganado a las moléculas de surfactante el nombre de moléculas anfifílicas. Cuando pocas de ellas se vierten al agua, éstas resuelven su dilema permaneciendo en la superficie, con la parte hidrofóbica al aire y la hidrofílica sumergida, formando las famosas películas de Langmuir. Cuando son tantas las moléculas vertidas que ya no alcanza la superficie para colocarlas a todas, el exceso se ve obligado a sumergirse completamente. Estas últimas resuelven su dilema formando agregados esféricos, llamados micelas, que mantienen la parte hidrofílica hacia afuera, en contacto con el agua, y la parte hidrofóbica en su interior, alejada del agua. Si la concentración de surfactante se varía lentamente, uno puede "brincar" entre una enorme cantidad de estados distintos, algunos de los cuales se muestran en la figura 1⁵. El mecanismo, por el cual estas estructuras tan exóticas se forman, se conoce como autoensamblado.

Entre más variadas sean las partículas suspendidas, más sofisticadas podrán ser las fases termodinámicas de la suspensión. Uno sólo pone a los constituyentes juntos y ellos solos, siguiendo principios que, en su mayoría, aún no se en-

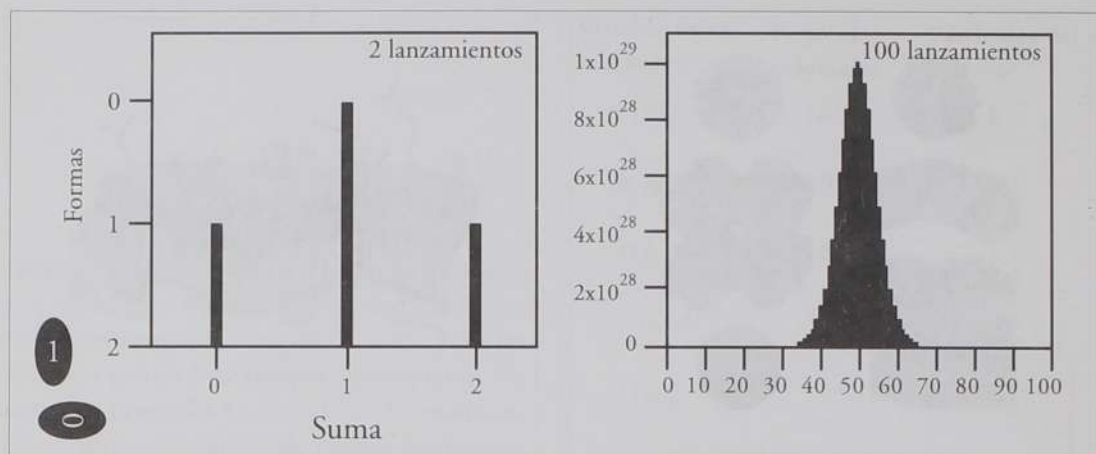


Figura 3. La figura muestra el número de formas en que se pueden obtener diversas sumas al lanzar dos y cien fichas con las caras marcadas con los números 0 y 1.

tienden por completo, se autoensamblan de maneras sorprendentes, generando orden a nivel supramolecular. La vida misma es el resultado de un complejísimo proceso de autoensamblado. Si bien es cierto que el origen de la vida no se entiende a ciencia cierta, también lo es que muchos de los componentes de los seres vivos se comportan de forma muy similar a los materiales blandos que uno puede sintetizar en el laboratorio. Una membrana celular, como la que se muestra esquemáticamente en la figura 2⁶, por ejemplo, tiene una apariencia muy semejante a las estructuras de surfactante de la figura 1, sólo que con algunas proteínas incrustadas. De hecho, la física que uno aprende experimentando con membranas artificiales puede ser utilizada con éxito en el estudio de membranas naturales. Los materiales biológicos, o biomateriales, son también materiales blandos o fluidos complejos y, por lo mismo, objetos de estudio de la ciencia de materiales. Como tales, no sólo se les considera en la investigación de los principios fundamentales que rigen su comportamiento, sino también como elementos de posible aplicación tecnológica. El ser humano, desde siempre, ha sacado provecho de los biomateriales, como cuando usa la piel de los animales para hacer

zapatos. Sin embargo, es la primera vez que estamos en posibilidades de acoplar materia viva e inerte a escala molecular, de forma controlada. Como un síntoma de que este desarrollo tecnológico es inminente, valga mencionar que ya hay organizaciones no gubernamentales (ONG's) pugnando por su reglamentación⁷.

La pretensión de este artículo es proveer al lector una idea general de algunos de los principios físicos fundamentales que hacen posible que el género humano y la naturaleza aprovechen el orden supramolecular de la materia condensada blanda. Teniendo esto en mente, después de una breve introducción, en la segunda sección se explican los principios del mecanismo de autoensamblado. En la tercera sección se detallan algunas aplicaciones, poniendo énfasis en la forma en que son determinadas por la dinámica de autoensamblado del sistema en cuestión. La cuarta sección se dedica completamente a los biomateriales, pues estos representan un tema en extremo novedoso. Finalmente, el artículo concluye con una sección de comentarios finales.

AUTOENSAMBLADO

Imaginemos una ficha honesta con el número cero en una cara y con el número uno en la otra, como se muestra en la figura 3. Si la lanzamos al aire, ambas cifras pueden caer con la misma probabilidad de $1/2$. Supongamos ahora que tenemos dos de ellas y las lanzamos al aire. De nuevo, cada una puede caer con la misma probabilidad de $1/2$ con cualquiera de las dos cifras hacia arriba. Por este motivo, los posibles resultados apareados de ambas monedas (0,0), (0,1), (1,0) y (1,1) pueden ocurrir todos con la misma probabilidad de $1/4$. Las cosas cambian cuando uno deja de valorar a las fichas como entes separados, considerándolas más bien como partes interdependientes de un todo y fijándose, por ejemplo, en la suma de las cifras. Al lanzar dos monedas existe una de cuatro maneras en que el resultado de la suma puede ser cero o dos, pero dos de cuatro maneras de que sea uno. Las sumas no ocurren con la misma probabilidad. Esto resulta más evidente entre más monedas sean lanzadas. En el lanzamiento de cien fichas, por ejemplo, sigue existiendo sólo una manera en que la suma es cero, o cien, pero hay aproximadamente 10^{29} maneras en que la suma es cincuenta. Si este análisis se extiende a cada vez más fichas, el resultado es sorprendente. Con un millón de ellas resulta que el 99.87% de los lanzamientos suman entre 498,500 y 501,500. Es como si las fichas se hubieran puesto de acuerdo para proporcionar sumas muy cercanas a 500,000. A esta regularidad numérica se le puede considerar un ejemplo de autoensamblado espontáneo. El principio detrás es muy sencillo: cuando

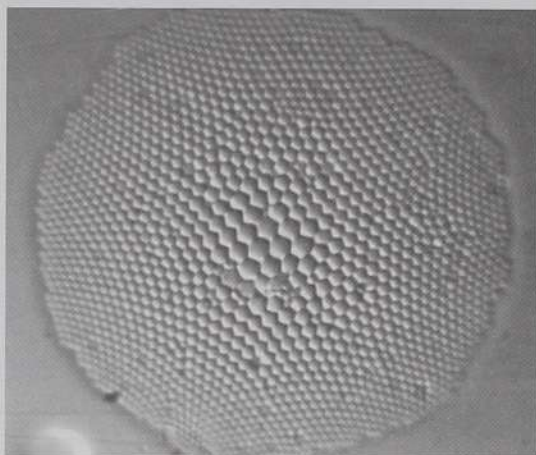


Figura 4. Imagen parcial de una emulsión de agua, aceite y detergente obtenida por microscopía interferencial⁸.

hay muchos eventos de por medio, el resultado más probable es el que termina ocurriendo.

La naturaleza de las cosas muy numerosas es organizarse a sí mismas. No importa cuán distintas parezcan las manifestaciones colectivas resultantes, el principio detrás es siempre el mismo: las cosas ocurren de la manera más probable. En el ejemplo del párrafo anterior el autoensamblado genera una regularidad numérica, pero en otros sistemas puede manifestarse igualmente de manera geométrica o mecánica, entre otras. Por ejemplo, en vez de monedas lancemos unas 10^{23} moléculas de agua, 10^{21} moléculas de aceite y 10^{15} moléculas de surfactante. La manera de hacerlo es mezclando agua, aceite y detergente en un vaso. Tomemos una gotita de la emulsión resultante y coloquémosla bajo un microscopio interferencial. Este permite observar pequeñas diferencias en el índice de refracción de la mezcla y, de esta manera, detectar estructuras internas que pasarían desapercibidas a simple vista. Por el ocular se verá un líquido mayormente desordenado, pero con algunas sorpresas. Mike Popchuk y Eric Weeks realizaron el experimento en la Universidad de Harvard⁸. En cierta región del portaobjetos encontraron la figura 4. Las moléculas del

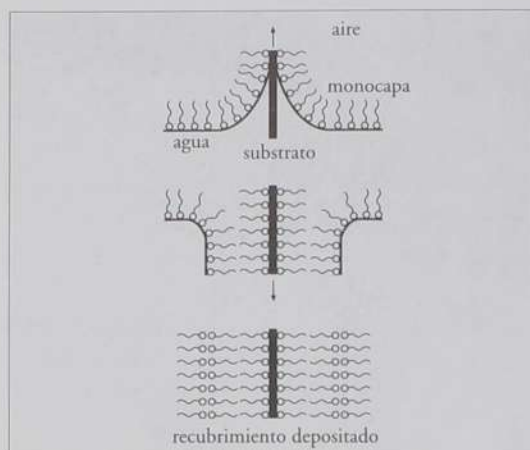


Figura 5. La figura muestra esquemáticamente el proceso de recubrimiento de superficies con ayuda de las monocapas de Langmuir⁶.

surfactante forman burbujas que atrapan al aceite en su interior. Éstas son de distintos tamaños y se ordenan como si se tratara de una figura escheriana. Aunque no se entiende con detalle el mecanismo que permite la generación de esta configuración, este es un excelente ejemplo de que el autoensamblado espontáneo puede producir estructuras geométricas con un enorme grado de complejidad. Desde luego, al contrario del caso del lanzamiento de las fichas, el análisis detallado del número de formas en que las diversas configuraciones entre las moléculas de agua, aceite y surfactante pueden ocurrir es, hasta ahora, tarea imposible. No obstante, los científicos mantenemos la convicción de que la configuración observada es, con mucho, la más probable.

En términos termodinámicos, el principio de probabilidad máxima mencionado en los párrafos anteriores toma la forma de maximización o minimización de ciertos potenciales termodinámicos, como la entropía, la energía libre, el gran potencial, y otros, según sea el caso. De esta manera, es posible desarrollar un acercamiento teórico a la problemática de los materiales blandos. Sin embargo, este tema no será tratado en este artículo.

APLICACIONES

Tal vez la aplicación más ilustrativa de los materiales blandos sean los detergentes. Éstos están compuestos por moléculas de surfactante como las de la figura 1. Aparte del comportamiento hidrofóbico de las cadenas hidrocarbúricas, éstas gustan de estar en contacto con las grasas. Por lo mismo, cuando se mezcla agua, aceite y detergente, este último forma micelas que capturan el aceite en su interior. Como en su exterior se encuentran las cabezas hidrofílicas, las micelas son solubles en el agua y sirven de vehículo al aceite que, de esta forma, puede fluir hacia el desagüe. Esta estructura es visualizada en la figura 4, donde las burbujas contienen aceite en su interior y están rodeadas por agua. Esta propiedad de autoensamblado de las moléculas de surfactante también puede utilizarse para extraer restos de petróleo de los pozos que ya perdieron su presión interna. Otra aplicación puede ser la producción de microalambres, si en vez de micelas, que son esféricas, se construyen estructuras alargadas, llamadas vesículas, en una suspensión de partículas metálicas microscópicas. El metal es atrapado en el interior de las vesículas, donde se funde conservando la forma de su recipiente. Al lavar la suspensión, sólo restan microalambres. A este método de síntesis se le conoce como mimético, pues imita el comportamiento de la materia viva.

Las burbujas de jabón son otro ejemplo ilustrativo. En este caso, una delgada película de agua queda atrapada entre dos capas esféricas concéntricas de moléculas anfifílicas con su cabeza hidrofílica volteada hacia el agua y su cola

hidrofóbica hacia el aire dentro y fuera de la burbuja. La formación de capas de anfifilas es, de hecho, muy útil. Si construimos, por ejemplo, una película de Langmuir, podemos recubrir una placa de algún material, sumergiéndola y extrayéndola varias veces de la suspensión. Cada vez que la placa cruza la superficie una monocapa de anfifilas se adhiere a ella, como se muestra en la figura 5⁶. Este proceso sirve para recubrir materiales con el fin de protegerlos del ataque de los agentes externos a que se expongan.

Una aplicación muy conocida es la de los cristales líquidos que pueden autoensamblarse en una suspensión coloidal. Las partículas del soluto interactúan entre sí constituyendo lo que se conoce como macrofluido, pues el papel que juegan las moléculas en un líquido molecular, como el solvente, es tomado aquí por las partículas coloidales (el solvente juega en el macrofluido un papel similar al del vacío en los líquidos moleculares). Las fases gaseosa, líquida y sólida son también fases del macrofluido. Éstas se pueden alcanzar variando la temperatura o la concentración, como se haría en un líquido molecular, pero, a diferencia de estos últimos, la fase del macrofluido puede variarse también cambiando el pH de la suspensión. En la fase gaseosa las partículas del soluto, o macropartículas, se distribuyen de forma más o menos desordenada en todo el volumen que ocupa el solvente. En la fase líquida éstas adquieren un orden más bien difuso. En la cristalina todas las macropartículas se colocan en los nodos de una red que se extiende por todo el volumen del solvente. Se tiene entonces un macrocristal de partículas coloidales inmersas en un líquido

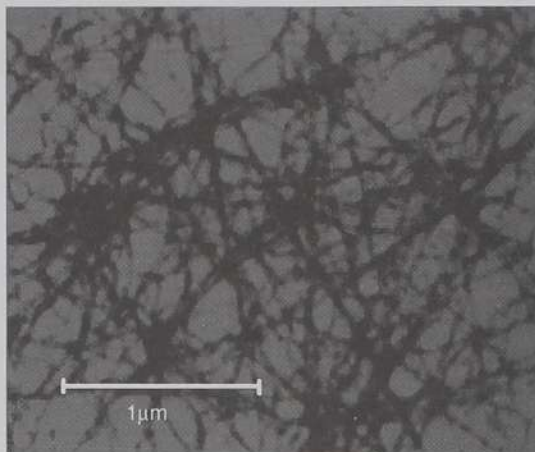


Figura 6. La foto, tomada con un microscopio electrónico¹⁰, muestra filamentos de actina con un diámetro de 8-9 nm. *In vivo* son capaces de alcanzar longitudes de hasta 100 µm.

molecular sustentante. Es decir, se tiene un cristal líquido, cuyas dimensiones pueden ser del orden de centímetros. Si las partículas suspendidas no son esféricas y se manda luz polarizada a la suspensión, ésta es dispersada de forma distinta en distintas direcciones. Cuando se observa a través de polarizadores, el resultado es un patrón de diferentes tonalidades. Con ayuda de campos eléctricos externos estos patrones pueden ser controlados en grado tal que incluso posibilitan la construcción de pantallas de computadora.

La interacción entre las partículas coloidales puede ser manipulada fácilmente. Esto permite diseñar suspensiones estables, es decir, que no coagulan, ni sedimentan, para la conservación de ciertos productos, como pinturas, jarabes y sopas. Siguiendo los mismos métodos, también puede manipularse la interacción entre proteínas suspendidas, obligándolas a autoensamblarse en un cristal líquido, lo que posteriormente permite determinar su estructura molecular por dispersión de rayos X.

Las aplicaciones de los materiales blandos son muchas. Su uso industrial ha sido intenso y extenso desde la revolución industrial misma. En la actualidad es común encontrarlos en la

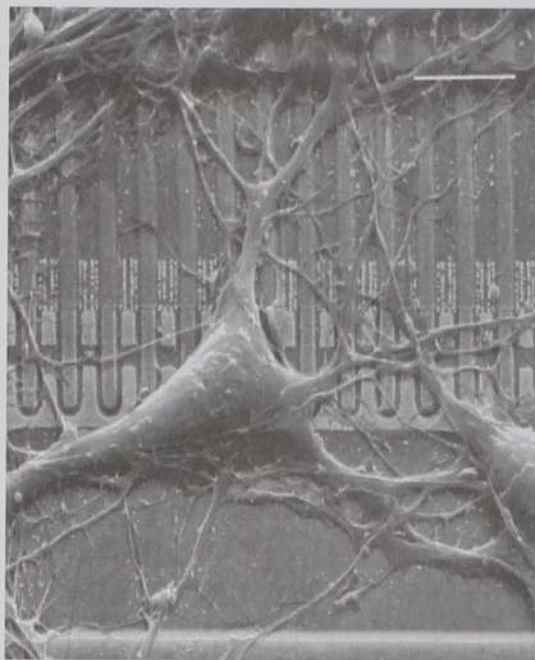


Figura 7. Neurona crecida sobre un microchip de silicio¹⁸. Al centro se reconoce la estructura de una cadena de transistores (la línea blanca representa una longitud de 10 μm).

industria metalúrgica, química, médica, farmacéutica, alimenticia, ecológica, de pinturas, y otras. Siempre se están encontrando e investigando nuevos usos. El tema de sus aplicaciones es tan amplio que resulta imposible presentar una revisión medianamente completa en un solo artículo. La pretensión de esta sección ha sido más bien mostrar cómo el mecanismo de auto-ensamblado puede generar estructuras explotables tecnológicamente. Una búsqueda en la red bajo los términos “colloids”, “colloidal crystals”, “soft condensed matter” y otros similares, ayuda al lector interesado a profundizar en el tema con centenares de direcciones de sitios que aportan gran cantidad de información sobre la ciencia y tecnología de los materiales blandos. Algunos de ellos contienen incluso cursos interactivos en línea a todos los niveles.

BIOMATERIALES

Como lo muestran los ejemplos de la síntesis mimética de microalambres y de la cristalización de proteínas de la sección anterior, no existe una frontera bien definida entre la materia blanda inerte y los biomateriales. De hecho, es precisamente la enorme cantidad de conocimientos que en los últimos cincuenta años se ha adquirido sobre los primeros lo que ha puesto en boga a los segundos. En los últimos años ha cundido entre los científicos la convicción de que, por primera vez en la historia, se tienen los elementos teóricos y experimentales que nos pueden permitir entender los procesos moleculares que definen las propiedades de la materia viva. Esto ha provocado que, en el mismo periodo, la inversión directa en la investigación básica y aplicada de los biomateriales haya crecido exponencialmente en el primer mundo. En México, en parte como reacción a este hecho, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología convocó en 1998 a la comunidad científica nacional a proponer proyectos para el desarrollo de campos nuevos, emergentes y rezagados. Uno de los proyectos ganadores se titula precisamente “Materiales biomoleculares” y es el producto de una intensa colaboración entre científicos de la Universidad de Sonora, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, de la Universidad Nacional Autónoma de México y del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Probablemente este sea, a la fecha, uno de los intentos más serios por hacer en México investigación básica y aplicada de los bioma-

teriales⁹. A continuación se dan algunos ejemplos que permiten apreciar lo dramáticamente actual que resulta el tema.

Uno de los ejemplos más ilustrativos de los biomateriales, y de cómo los métodos de la física de la materia condensada blanda sirven para su estudio, son los biopolímeros, en especial los que forman el citoesqueleto. Las células vivas son sistemas muy organizados con propiedades mecánicas sorprendentes. Pueden, por ejemplo, soportar tensiones extremas y cambiar de forma en segundos. Estas habilidades son posibles gracias al citoesqueleto: una red fibrosa intracelular hecha de biopolímeros de distintas longitudes y rigidez, similar a la red de actina de la figura 6¹⁰, y de un "zoológico" de proteínas asociadas. Aparte de sus tareas mecánicas, los filamentos del citoesqueleto también funcionan como rieles para motores moleculares que se ocupan de los procesos de transporte intracelulares necesarios para la vida, forman micromúsculos para el movimiento de las células y respaldan procesos esenciales para la división celular.

En comparación con los polímeros sintéticos, los filamentos del citoesqueleto poseen una dinámica con escalas de tiempo y longitud mucho mayores. Esto abre nuevas posibilidades para su estudio experimental. Por ejemplo, existe la posibilidad de marcar fibras aisladas con moléculas fluorescentes, o con partículas coloidales, y observar su movimiento con métodos ópticos directos, con gran resolución espacial y temporal. Con ayuda de métodos mecánico-ópticos se puede incluso observar el movimiento de una proteína aislada. Por ejemplo,

cuando una proteína motórica se mueve a lo largo de un filamento del citoesqueleto. Así, poco a poco mejoran las mediciones cuantitativas de las variables involucradas en los procesos microscópicos que permiten entender fenómenos tan alejados del equilibrio y tan complejos como el movimiento y la división celular, o como la transcripción de la información genética. A la luz de este ejemplo, es razonable esperar que el estudio detallado de los biomateriales conduzca a descubrimientos importantes hacia la comprensión de los procesos que tienen lugar en organismos vivos.

Desde siempre el ser humano ha hecho uso de los biomateriales, como cuando utiliza la piel de los animales para protegerse del frío. El acoplamiento entre materia viva e inerte también es común, como en las prótesis, o cuando se usan lentes. Sin embargo, el acoplamiento a escala molecular es una posibilidad que apenas en estos días está adquiriendo viabilidad. Las potencialidades tecnológicas de dicho acoplamiento son enormes. Probablemente una de las más excitantes esté relacionada con una posible interfaz entre células nerviosas y circuitos semiconductores. Dicho en otras palabras, la unión entre computadoras y el cerebro al nivel de sus componentes microscópicas, como se ilustra en la figura 7¹⁰. Por el momento, el plantearse esta posibilidad no significa que se le considere viable, en el sentido de que sea previsible la integración de tejido cerebral en las computadoras, o de circuitos semiconductores en el cerebro. Se trata más bien de una pregunta física de carácter técnico: hasta qué punto el desarrollo dramático de los últimos cincuenta

años en la física de la materia condensada y en la neurofisiología experimental permite el acoplamiento de sistemas excitables iónica y electrónicamente. Desde luego, la posibilidad de que tales investigaciones conduzcan, tarde o temprano, a una mejor comprensión del cerebro, o a usos técnicos o médicos, no puede descartarse.

Al igual que con los materiales blandos inertes, también es imposible hacer una revisión medianamente completa del tema de los biomateriales en un solo artículo. Nuestra intención ha sido, básicamente, argumentar en el sentido de que estos pueden ser entendidos con ayuda de los mismos principios físicos que sirven para comprender a los materiales blandos inertes. Desde luego, sin dejar de mencionar posibles aplicaciones, de las cuales, habiendo un sinnúmero, puede decirse que el desarrollo más interesante está por ocurrir.

COMENTARIOS FINALES

La intención de este artículo ha sido proporcionar al lector una idea general de algunos principios físicos que hacen posible que el género humano y la naturaleza aprovechen el orden supramolecular de la materia condensada blanda. Se ha mostrado que el concepto fundamental detrás de dicho orden es la capacidad de autoensamblado de los sistemas de muchos cuerpos. Esta idea se ha ilustrado con algunas de las aplicaciones más conocidas de la materia blanda inerte. También se han dado algunos ejemplos de problemas de frontera en investigación básica de los biomateriales, sin dejar de insinuar posibles aplicaciones futuras.

En general, la ciencia de los materiales blandos se encuentra en un estado de desarrollo que podría calificarse de inmaduro, si se le compara con el conocimiento que se tiene, por ejemplo, de los sólidos. Esto se debe, en buena medida, a que no existe un material blando ideal de referencia, como lo es el gas ideal en el caso de los gases, o el cristal perfecto en el caso de los sólidos. Por este motivo, al estudiar materiales blandos no es posible iniciar con teorías simples y extenderlas después a casos más complicados con ayuda de cálculos perturbativos. Uno debe tratar, desde un principio, con el problema completo. Las ecuaciones resultantes son tan complicadas que sólo con el desarrollo de la computación de alta velocidad ha sido posible investigarlas con detalle. Por otro lado, también es gracias a la microtecnología que hoy en día se tiene el equipo necesario para hacer experimentos controlados en este tipo de sistemas. Con estos elementos tecnológicos a la mano, la ciencia de materiales blandos está experimentando, hoy en día, un impulso sin precedentes.

Los lectores interesados en profundizar en los temas tocados en este artículo pueden iniciar con una búsqueda en internet bajo términos como "colloids", "polymers", "soft condensed matter", "biomaterials", "self-assembling" y otros similares. El resultado serán miles de direcciones que conducen a sitios localizados en todo el mundo. Si eligen navegar por aquellos relacionados con instituciones académicas de investigación, pronto podrán experimentar fascinación por el viaje.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico proporcionado por Conacyt a través del proyecto para el desarrollo de campos nuevos, emergentes y rezagados (convocatoria 1998-1999) "Materiales Biomoleculares" y del proyecto de investigación 33815-E.

NOTAS

¹El programa trataba sobre la dinámica de los movimientos telúricos. En particular, la parte de la anécdota intentaba demostrar que cuando estos movimientos son lentos, como los de la deriva continental, las deformaciones del terreno son plásticas. Cuando los movimientos son rápidos, como los que tienen lugar durante un temblor, en cambio, el terreno se comporta rígidamente, sufriendo fracturas y agrietamientos.

²Un electronvolt, abreviado eV, equivale a la energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un voltio a lo largo de una longitud de un metro.

³La constante de Boltzmann k_B permite ligar el número de estados microscópicos W de un sistema aislado con su entropía S , según una de las fórmulas más famosas de la física moderna: $S = k_B \ln W$. La constante de Boltzmann es una de las constantes fundamentales de la naturaleza.

⁴Los líquidos y gases moleculares compuestos por partículas esféricas que tienen como máximo unas cuantas especies de interacción simple, como la coulombiana o la de Lenard-Jones, son llamados fluidos simples. En contraposición, los sistemas de constitución más variada se conocen como fluidos complejos.

⁵La figura fue tomada del libro *The colloidal domain: where physics, chemistry, biology, and technology meet* de D. Fennell Evans y Hakan Wennerström, Wiley-VCH (1999).

⁶La figura fue tomada del libro *Introduction to soft matter: polymers, colloids, amphiphiles and liquid crystals* de Ian W. Hamley, Wiley (2000).

⁷Véase, por ejemplo, el artículo "Apremia ONG a normar nanotecnología" de José Galán, publicado en el periódico *La Jornada* del día 2 de mayo de 2003. En él se advierte de intentos de científicos norteamericanos de fabricar "cyborgs", como los de los relatos de ficción científica. La leyenda del Dr. Frankenstein sigue angustiendo a las mentes inocentes.

⁸Información obtenida del sitio del grupo del Dr. David A. Weitz de la Universidad de Harvard. Este es uno de los sitios más gratos que sobre el tema existen en la red, en el que se discuten novedosos resultados experimentales de problemas de frontera de la materia condensada blanda (<http://www.deas.harvard.edu/projects/weitzlab/>).

⁹El sitio del proyecto se encuentra en <http://www.ifisica.uaslp.mx/~maol>. Las páginas de las instituciones involucradas son <http://www.uson.mx>, <http://www.uaslp.mx>, <http://www.unam.mx> y <http://www.cinvestav.mx>.

¹⁰La figura fue tomada del número de febrero de 2001 de la Revista de la Sociedad Alemana de Física, *Physikalische Blätter* 57 (2001),

donde se discute ampliamente sobre el tema de la biofísica. Un resumen en español de este número se encuentra en el artículo de divulgación "Biofísica" de José M. Méndez A., publicado en *Avance y Perspectiva* 20 (2001) 211-219.



EL BOTÁNICO, EL FÍSICO Y EL BORRACHO

RICCARDO CAPOVILLA

EL BOTÁNICO

ROBERT BROWN, BOTÁNICO ESCOCÉS, VIAJÓ A AUSTRALIA Y REGRESÓ A INGLATERRA tres años después con una gran cantidad de nuevas plantas que fue capaz de clasificar. Entre sus muchos logros está el descubrimiento del núcleo de la célula de las plantas. Para los físicos el nombre de Brown está asociado con sus cuidadosas observaciones de un fenómeno que lleva su nombre: el movimiento browniano.

En 1827, Brown observó en su microscopio granos de polen suspendidos en agua quieta. Los granos de polen se movían rápida, incessantemente y de manera errática. No era el primero en observar este fenómeno, pues él mismo, en una de sus publicaciones, cita a diez predecesores. De hecho, este movimiento resultaba un poco incómodo para los primeros practicantes del arte de la microscopía. En un primer momento, pensó que las partículas estaban vivas, que había encontrado las moléculas elementales de los cuerpos orgánicos y también que el movimiento tenía algo que ver con el comportamiento sexual (como estaba estudiando el proceso de fertilización de algunas especies de flores, pensó que estaba viendo directamente la fuerza de la vida). Sin embargo, al continuar sus experimentos encontró que trocitos de madera mostraban el mismo comportamiento. La explicación vitalista fue abandonada. Probó con vidrio, rocas y hasta con fragmentos de ¡La Esfinge! Sin embargo, siempre observó el mismo comportamiento. Brown fue capaz de descartar varias posibles explicaciones mecánicas y tuvo el cuidado de no llegar a ninguna conclusión precipitada¹.

La comunidad científica tomó nota. En las décadas posteriores, varios investigadores continuaron experimentando y obtuvieron un cuadro más detallado de este movimiento errático. Muy pronto se llegó a la conclusión de que Brown estaba en lo correcto: el movimiento es universal, en el sentido de que es independiente de la composición y de la densidad de las partículas suspendidas. Además, el movimiento es verdaderamente incesante: algunos experimentos duraban hasta un año. El movimiento es más rápido si se aumenta la temperatura o se toman partículas más pequeñas o si se usa un fluido menos viscoso.

El Dr. Riccardo Capovilla es investigador del Departamento de Física del CINVESTAV. Correo electrónico: capo@fis.cinvestav.mx.



Figura 1. Robert Brown.

Si están suficientemente dispersas, las partículas se mueven de manera independiente y, un hecho crucial al cual volveremos más tarde, su movimiento es altamente irregular. En tiempos en que la existencia de los átomos o de las moléculas no estaba generalmente aceptada, es notable que haya surgido una explicación cualitativa. Según lo sugerido por Giovanni Cantoni, e independientemente también por Joseph Delsaulx e Ignace Carbonelle, el movimiento es debido a las colisiones, de origen térmico, de las “pequeñas partículas sólidas en el líquido”^{2,3}. Las objeciones llegaron rápidamente. La más aguda de ellas vino de Carl Nageli: las colisiones de las pequeñas partículas líquidas con las más grandes de polen tenían que promediarse³. De esta manera, sin embargo, ningún movimiento neto podría originarse. Estaba equivocado, pero era una crítica razonable pues simplemente no apreció el enorme número de colisiones al azar que estaban involucradas (por cierto, es mejor estar equivocado, como observó irónicamente alguna vez Wolfgang Pauli, que ni siquiera estarlo). De cualquier manera, estas explicaciones no fueron capaces de producir un modelo cuantitativo del movimiento browniano. La idea cualitativa era correcta, pero la naturaleza extremadamente irregular del movimiento hacía imposible un

monitoreo directo. La trayectoria de una partícula browniana es un ejemplo de lo que, a principios de 1900, era una curiosidad matemática: curvas que son continuas pero no diferenciables en ninguna parte. La velocidad no está definida, razón por la cual era tan difícil de medir.

EL FÍSICO

En 1905 Albert Einstein, físico suizo, remitió su tesis doctoral para publicación. La tesis consideraba el problema mundano de la difusión del azúcar en agua. Su motivación principal era encontrar evidencias de la naturaleza mecánica, atomista de la materia y, en particular, obtener predicciones que pudieran medirse en el laboratorio. En esta época, ése era un tópico muy controversial. Ernst Mach rechazaba la existencia de los átomos porque no eran directamente observables; Wilhelm Ostwald afirmaba que solamente cantidades termodinámicas macroscópicas, como la energía, eran relevantes⁴.

Ludwig Boltzmann, el pionero de la mecánica estadística, se suicidó aparentemente a causa de la resistencia que encontró a sus ideas sobre la naturaleza discreta de la materia. La dirección que tomó Einstein fue la de tratar de encontrar nuevas formas de determinar el número de Avogadro. Curiosamente, considerando que su nombre está asociado a sus teorías relativistas, su tesis es su publicación más citada, tal vez por la enorme gama de aplicaciones que tiene. Once días después de haber puesto su tesis a consideración envió, como un subproducto de ella, un artículo con uno de sus típicos títulos largos pero informativos: “*On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular-kinetic theory of heat*”⁵. Aparentemente, Einstein ignoraba completamente el trabajo de investigación teórico y experimental sobre el movimiento browniano de los ochenta años previos, un hecho que puede poner en dificultades a los filósofos de la ciencia que tratan de mapear el “método científico”. Lo

más importante es que tuvo éxito en su intención original de obtener una nueva manera de determinar el número de Avogadro en el laboratorio⁶ y ayudó a establecer de una vez por todas la naturaleza discreta de la materia⁷. Este fue un logro enorme en sí mismo. De acuerdo con Richard Feynman, "si, en algún cataclismo, todo el conocimiento científico fuera destruido y solamente una frase pudiera ser comunicada a la siguiente generación de criaturas, ¿cuál frase tendría la mayor cantidad de información en el menor número de palabras?" Yo creo que es la hipótesis atomista [...] según la cual "todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se mueven de manera perpetua"⁸.

El artículo de Einstein se basa en dos suposiciones fundamentales. La primera es que, como habían sugerido otros anteriormente, el movimiento es causado por frecuentes colisiones de las moléculas líquidas que se mueven incesantemente sobre las partículas suspendidas. La segunda es que, debido al gran número de moléculas líquidas involucradas y a causa de lo complicado que es su movimiento, el movimiento de las partículas suspendidas se debe describir de manera probabilista. Esta última era una suposición muy audaz. Einstein estaba aplicando la estadística a objetos relativamente grandes, con un tamaño típico del orden de un micrón, mientras que los métodos estadísticos habían sido usados en física anteriormente por Ludwigg Boltzmann y Josiah Willard Gibbs, pero solamente en sus teorías cinéticas de los gases. La suspensión se toma lo suficiente diluida de tal manera que las partículas no interactúan entre sí: se mueven independientemente. El movimiento de cada partícula se considera como una



Figura 2. Albert Einstein.

secuencia de cambios al azar no correlacionados. La partícula se mueve un poquito y después otro poquito, de forma no correlacionada con el paso anterior. ¡Esto era suficiente! En un verdadero festín de física teórica, logró llegar al corazón del problema. Einstein continuó con argumentos razonables: la partícula tiene que empezar en algún lado; la partícula tiene que estar en algún lado; si la partícula está aquí ahora, significa que estaba cerca un poco antes; no hay ninguna dirección preferida. De estos argumentos Einstein derivó, de una manera espectacularmente económica, que la posición de la partícula tenía que obedecer la ecuación de difusión, que la densidad de probabilidad tenía que ser una función gaussiana, y que la constante de difusión D está relacionada con el desplazamiento cuadrático medio de las partículas en un tiempo t por medio de la ecuación $\langle X^2 \rangle = 2Dt$. El factor de dos viene del hecho que él estaba considerando el movimiento en una dimensión. Como a la partícula no le importa la dirección, el desplazamiento promedio es cero, $\langle X \rangle = 0$, mientras que el desplazamiento cuadrático medio es diferente de cero, pues no depende de la dirección debido al cuadrado. Lo notable de esta expresión es que, si se pone $\lambda = \sqrt{\langle x^2 \rangle}$, se obtiene $\lambda \propto t^{1/2}$, es decir, la distancia recorrida va como la raíz cuadrada del tiempo (no es lineal en el tiempo como

uno hubiera pensado ingenuamente). Ahora podemos entender la dificultad en definir la velocidad de una partícula browniana $d\lambda/dt \sim t^{-1/2}$ la cual diverge cuando t va a cero. Dicho de manera sencilla, la velocidad de difusión no existe y las "tasas de difusión" se deben tomar con una pizca de sal⁹. Otra consideración importante sobre la expresión obtenida por Einstein para el desplazamiento cuadrático medio es que evita el problema de la velocidad al introducir una cantidad, el desplazamiento cuadrático medio, que es directamente observable. Era el inicio del modelaje estocástico de fenómenos naturales y de la apreciación de la importancia del ruido y de las fluctuaciones¹⁰.

EL BORRACHO

El borracho es uno imaginario. Está parado cerca de un poste. El borracho lanza una moneda y de manera milagrosa la agarra. Si sale águila se va a la derecha, si sale sol se va a la izquierda. La moneda no está trucada. El borracho camina sobre una línea. Lo hace otra vez, sin ninguna memoria del paso anterior —aquí es donde entra el alcohol— es decir, los pasos no están correlacionados. No se puede ser más fundamental que esto. Este es el ejemplo más sencillo de lo que se llama un camino al azar. Una pregunta natural es: con estas reglas, ¿qué tan lejos del poste puede llegar el borracho? Debido al hecho que es igual de probable irse a la derecha que a la izquierda, en promedio el borracho no va a ningún lado. Sin embargo, si preguntamos qué tan lejos va independientemente de la dirección, vamos a encontrar que en N pasos de longitud d , caminaría $\langle X^2 \rangle = Nd^2$.

Aquí N juega el papel de un tiempo discreto. Más precisamente, podemos poner $N = t/\tau$, donde τ es el tiempo empleado en cada paso y t el tiempo total. Si definimos un coeficiente de difusión $D = d^2/2\tau$, recuperamos la expresión obtenida por Einstein. El modelo de Einstein del movimiento browniano es una versión continua de un camino al azar en una dimensión. En dos dimensiones, el borracho estaría caminando sobre una red regular con igual probabilidad de irse en cualquiera de las cuatro direcciones posibles y el desplazamiento cuadrado promedio es $\langle X^2 \rangle = 4Dt$. Simulaciones de computadora muestran una característica interesante del camino: el borracho tiende a explorar muy bien una región del espacio (ver figura 3). Tiene la tendencia de regresar muchas veces al mismo punto, antes de irse finalmente a otra región del espacio, donde hace lo mismo.

Curiosamente el término "camino al azar" fue introducido en 1905, el mismo año del artículo de Einstein, por Karl Pearson. Pearson estaba interesado en describir las migraciones de mosquitos que infestan regiones despejadas de jungla. El problema era demasiado difícil, por lo que inventó un modelo idealizado del azar, el cual no pudo resolver tampoco y sometió un artículo a *Nature* en forma de una pregunta. Una semana después, vergozosamente para Pearson, Lord Rayleigh ofreció una solución: él había resuelto el mismo problema en el contexto de las vibraciones sonoras. En cualquier caso, los dos, junto con Einstein, habían sido precedidos por Louis Bachelier. En su tesis *Théorie de la spéculation* publicada en el año 1900 bajo la dirección de Henri Poincaré, Bachelier observó las fluctuaciones en

los precios de la bolsa, considerándolos como una secuencia de eventos al azar no correlacionados. Este es otro ejemplo de un camino al azar. Tal vez el lector está empezando a darse cuenta de la generalidad de los fenómenos descritos por un modelo tan sencillo: partículas suspendidas en un fluido, acciones en la bolsa, migraciones de mosquitos... Hay más. Un fenómeno importante que se describe en una primera aproximación como un camino al azar, son los polímeros¹¹. Los polímeros son macromoléculas que consisten de unidades básicas, monómeros ligados, que forman una estructura lineal. Pueden ser muy flexibles como espaguetis cocidos; artificiales, como el polietileno; o naturales, como el ADN. Muchas de las propiedades de los polímeros dependen de su composición química, de las condiciones externas; estas propiedades ocupan el interés de los químicos. Sin embargo, hay propiedades que son universales en el sentido de que no dependen de los detalles microscópicos, y éstas son las de interés para el físico. En una primera aproximación, los polímeros se pueden considerar como cadenas de N segmentos, de longitud b , ligados secuencialmente. Los segmentos pueden apuntar en cualquier dirección, sin memoria, es decir, sin ninguna correlación entre la orientación de un segmento y la del segmento que le sigue. Bajo estas suposiciones, la distancia cuadrática media entre el principio y el final de la cadena es $\langle X^2 \rangle = Nb^2$, otra realización de un camino al azar. Este modelo se conoce como cadena "ideal" o gaussiana. Se dice ideal porque las verdaderas cadenas se estiran más. Lo que este modelo no toma en cuenta es que la cadena no puede tocarse a sí misma (se evita a sí misma). La inclusión de este efecto hace las cosas mucho más difíciles.

Regresamos al camino al azar. Un camino al azar que se evita es un camino al azar con una condición adicional: ningún sitio puede ser visitado nuevamente. En una dimensión el problema es trivial y el resultado es $\langle X^2 \rangle = N^{1/2} d^2$. En dos o más dimensiones ¡no se ha resuelto todavía!

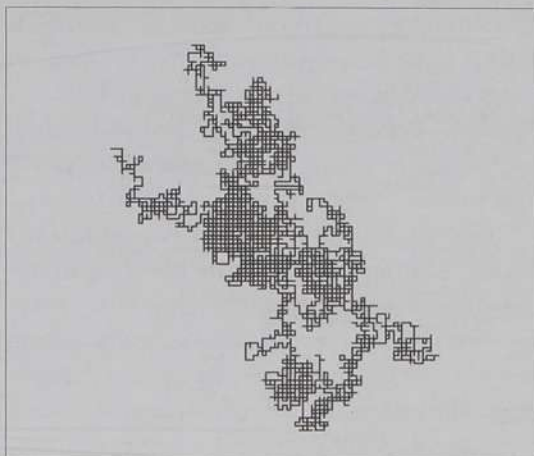


Figura 3. Ejemplo de una trayectoria al azar.

La importancia de los polímeros es múltiple: muchos de los materiales con los cuales vivimos están hechos de polímeros. Desde la perspectiva de un físico teórico, los modelos para polímeros proveen el ejemplo más simple, pero no sencillo, de teorías de campo geométricas. Si los polímeros son más pequeños que una longitud característica conocida como longitud de persistencia, pero más grandes que el tamaño de los monómeros, es razonable describirlos como curvas en el espacio. Los grados de libertad son esencialmente geométricos: la forma de la curva. Debido a que el polímero es homogéneo, una energía efectiva que modela un polímero flexible está determinada por algún invariante geométrico de la curva. La generalización a dos dimensiones de los polímeros son las membranas. La generalización no es trivial: la geometría de las superficies es mucho más complicada que la geometría de las curvas. Una clase especialmente interesante de membranas son las membranas lípidas fluidas. Están hechas como un sandwich de moléculas fosfolípidas (las moléculas son como renacuajos, con una cabeza a la que le gusta el agua y una cola que odia el agua) el truco de la bicapa permite ocultar las colas del agua. La fluidez viene del hecho de que las moléculas se pueden mover libremente en el plano de la membrana.

Son de interés para el físico como un ejemplo de una teoría de campo geométrica, para el químico por la abundancia de lípidos en la naturaleza, para el biólogo debido a que las membranas de las células, tanto exteriores como interiores, están hechas principalmente de lípidos¹². Las membranas son muy delgadas comparadas con su tamaño, por lo que es razonable describirlas como superficies bidimensionales, los grados de libertad son esencialmente geométricos. Su fluidez implica que son descritas por una energía efectiva que está dada por algunos invariantes geométricos de la superficie. Como los granos de polen fluctúan, las membranas también fluctúan y son lo suficientemente grandes para poder ser visibles en el microscopio. Posiblemente a Robert Brown y a Albert Einstein les habría gustado la física de estos objetos.

NOTAS

¹ Nelson, E., 1967, *Dynamical Theories of Brownian Motion*, Princeton University Press, 1967; <http://www.math.princeton.edu/nelson/books.html>.

² Pais, A., 1982, *Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press.

³ Gallavotti, G., 1999, "Statistical Mechanics. A short treatise", Springer Verlag; <http://ipparco.roma1.infn.it/pagine/deposito/>

⁴ Hoy en día, algunas objeciones a las teorías de cuerdas son de la misma naturaleza: todavía nadie ha probado que estén equivocadas.

⁵ Einstein, A., 1956, "Investigations on the Theory of the Brownian Movement", Dover.

⁶ La explicación del movimiento browniano fue descubierta independientemente por Marian von Smoluchowski quien exploró sus consecuencias tanto teórica como experimentalmente en los años siguientes. Einstein estaba ocupado con otras cosas.

⁷ La confirmación experimental fue hecha por Jean Baptiste Perrin, quien recibió el premio Nobel en 1926 por este logro. Algunos piensan que también la teoría de Einstein debería haber recibido este honor. Recientemente George Oster criticó al Comité del Nobel: "¿qué estaban pensando?", escribió. Oster, G., 2002, *Nature*, vol. 417, 25.

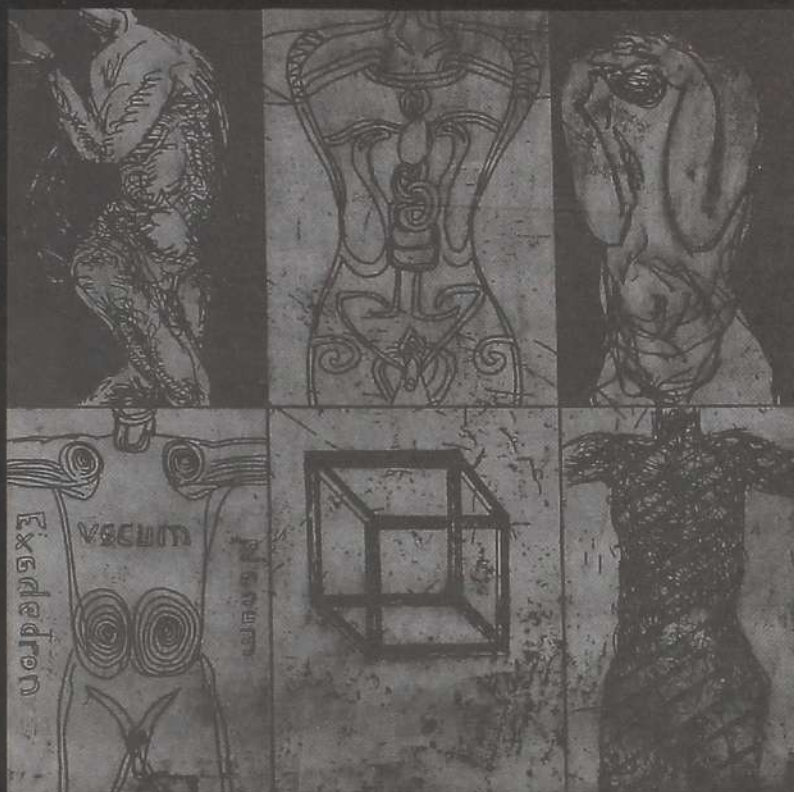
⁸ Feynman, R.P., 1963, R.B. Leighton, and M. Sands "The Feynman Lectures on Physics" vol. 1, ch. 1 (Addison Wesley).

⁹ Berg, H.C., 1983, *Random Walks in Biology*, Princeton University Press.

¹⁰ C.W., Gardiner, 1985, *Handbook of Stochastic Methods*, Springer Verlag.

¹¹ Doi, M. and Edwards S.F., 1986, *The Theory of Polymer Dynamics*, Oxford, University Press.

¹² Boal, D., 2002, *Mechanics of the Cell*, Cambridge, University Press.





FÍSICA MÉDICA EN EL DEPARTAMENTO DE FÍSICA DEL CINVESTAV

JUAN JOSÉ GODINA

HASTA MEDIADOS DEL SIGLO XVIII NO ERA CLARO QUE LAS LEYES DE la física y la química formuladas a partir de observar el comportamiento de materia inanimada, pudieran aplicarse para estudiar materia viviente. Los seres vivos están sujetos a las mismas leyes de movimiento que los objetos inanimados pero la pregunta de aplicabilidad de las leyes de la física ocurre a un nivel primario. Los organismos vivos son muy complejos, incluso un virus, uno de los organismos biológicos más simples, consta de millones de átomos interactuantes. De igual manera una célula que es la semilla básica para la construcción de tejidos, contiene en promedio 10^{14} átomos. Los sistemas vivos exhiben propiedades que no encontramos en objetos inanimados como crecer, reproducirse y morir. Estos fenómenos son tan diferentes de las propiedades predecibles de la materia inanimada que muchos científicos en las postrimerías del siglo XIX creyeron que distintas leyes gobernaban la estructura y organización de moléculas en la materia viviente. Incluso el origen físico de moléculas orgánicas estaba en duda. Dichas moléculas tendían a ser largas y más complejas que las obtenidas de fuentes inorgánicas. De hecho se pensaba que estas moléculas largas encontradas en materia viviente podían ser producidas solamente por organismos vivos a través de una "fuerza vital", que no podía ser explicada por las entonces conocidas leyes de la física. Este concepto fue desmentido en 1828, cuando Friederich Wöhler sintetizó una sustancia orgánica, la urea, a partir de química inorgánica. Desde entonces muchas otras moléculas orgánicas fueron sintetizadas sin la intervención de organismos biológicos. En la actualidad la mayoría de los científicos creen que no hay tal "fuerza vital" residiendo en las sustancias orgánicas, de modo que todos los organismos vivos están gobernados por las leyes de la física a todos los niveles.

Durante los pasados cien años buena parte de la investigación biológica ha estado dirigida al entendimiento de los sistemas vivientes en términos de leyes físicas básicas. Este esfuerzo ha permitido tener algunos éxitos significativos. La estructura atómica de muchas moléculas biológicas complejas ha sido determinada y hoy es posible

El Dr. Juan José Godina es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV. Correo electrónico: jj@fis.cinvestav.mx

describir el papel de estas moléculas dentro de los seres vivos, así como explicar el funcionamiento de células y muchas de sus interacciones con otras. El trabajo todavía no concluye y estamos lejos de completarlo porque, pese a que conocemos la estructura de una molécula compleja, no nos es posible predecir su función a partir de su estructura atómica. Los mecanismos de neurisma celular, crecimiento, reproducción y comunicación son todavía entendidos de manera cualitativa. Muchas de las preguntas básicas en biología están aún sin respuesta. Sin embargo, la investigación biológica no ha revelado ningún área donde las leyes de la física no sean aplicables.

Las sorprendentes propiedades de la vida se obtienen debido a la compleja organización de los sistemas vivos, cuyos secretos podrán ser revelados solamente bajo investigaciones sistemáticas y multidisciplinarias que permitan enmarcar en forma determinante su comportamiento y puedan ser condensadas en sencillas leyes físicas.

En el Departamento de Física del CINVESTAV estamos conscientes de esta dificultad y diferentes grupos de colegas han encontrado a lo largo de sus investigaciones (se describen sólo algunas) contactos directos así como potenciales hallazgos susceptibles de aplicación inmediata en la medicina que trataremos de describir en forma sencilla a través de este documento.

IMAGENOLOGÍA

Las imágenes de la forma de órganos internos obtenidas por Tomografía Computarizada (TC) de rayos X son excelentes; sin embargo los ra-

ayos X no dan información respecto a la estructura interna del tejido. La TC puede hacernos saber sobre cambios en la estructura de los tejidos y alteraciones patológicas dentro de los órganos. La Imagenología por Resonancia Magnética (MRI), introducida desde 1980, es uno de los más recientes apoyos para las técnicas de manejo de imágenes (imagineo) en medicina. La técnica usa las propiedades magnéticas del núcleo del átomo para proporcionar imágenes de órganos internos del cuerpo humano con información detallada respecto a la estructura del tejido suave.

El imagineo por rayos X y ultrasonido son, en principio, relativamente simples. Utilizan la energía reflejada y transmitida para visualizar las estructuras internas. MRI es algo más complejo, y obviamente su ventaja es la obtención de imágenes en tres dimensiones usando el fenómeno de resonancia magnética nuclear. Para ello se localizan señales de pequeñas secciones del cuerpo y entonces se construye la imagen de estas señales individuales. En TC, las imágenes se obtienen extrayendo la información de la intersección de puntos de haces de rayos X enfocados. En MRI, esto no se puede hacer ya que la señal tiene una longitud de onda de algunos metros, la cual no puede ser colimada y dirigida hacia pequeñas regiones de interés.

El grupo de trabajo del Dr. Gerardo Herrera Corral, en colaboración con el Dr. Luis Manuel Montaña y la estudiante Rosa María San Miguel, estudia aspectos de aplicación de los detectores de altas energías a la física médica; en particular realiza estudios sobre radiología digital en mamografía y angiografía con un detector

de silicio de franjas acoplado a un chip de electrónica rápida de 64 canales y sobre todo en imagenología por medio de una técnica que está en boga: Imagenología por contraste de fase.

CARACTERIZACIÓN DE PROTEÍNAS

Hace casi medio siglo que Max Perutz y colaboradores determinaron la primera estructura tridimensional de una proteína (la mioglobina), mediante la técnica de difracción de rayos X. A partir de entonces, y hasta este momento, se conoce la estructura de varios cientos de miles de proteínas. Sin embargo, a diferencia de la genética, apenas se empiezan a entender algunas de las propiedades estructurales de las proteínas y la relación que existe con su función, así como los eventuales problemas que se pueden generar. Por ejemplo, ya se sabe que la enfermedad de Alzheimer está asociada al plegamiento defectuoso de ciertas proteínas. Normalmente dichas proteínas forman glóbulos relativamente compactos, los cuales son muy estables. Sin embargo, y por razones aún desconocidas, estas proteínas pueden adoptar una forma más abierta y alargada que favorece la formación de fibras (llamadas amiloides), las cuales se precipitan en forma de plaquetas. Las proteínas son polímeros lineales, cuyos monómeros son los aminoácidos (existen 20 posibles aminoácidos, también llamados residuos). La estructura tridimensional que adopte el polímero lineal depende de la secuencia de residuos, así como de otros factores externos. Con la finalidad de predecir la estructura final de una proteína, se han propuesto muy diversos modelos

que incluyen cálculos de primeros principios, hasta simples redes cúbicas. En el grupo de investigación del Dr. Mauricio Carbajal de Física Estadística, se ha propuesto un modelo simplificado de proteína en colaboración con la estudiante Patricia Pliego (en el que no se toman en cuenta los átomos de forma explícita) que hace uso de una energía potencial efectiva entre pares de residuos, la cual es extraída de datos experimentales. En una etapa inicial y para un aminoácido en particular (la alanina) el modelo describe correctamente dos estructuras típicas: hélices y hojas. El estudio establece que las hojas (que requieren de al menos dos cadenas) son energéticamente más estables que las hélices. Al estar relacionadas las hojas con las fibras de amiloide, de acuerdo con este estudio (como ya se tiene evidencia experimental) la formación de plaquetas es un proceso irreversible.

INTERFERÓMETRO DE SUPERCONDUCTIVIDAD CUÁNTICA (SQUID)

El grupo de estado sólido del Departamento de Física ha estudiado propiedades de materiales superconductores. Estos materiales tienen una serie de propiedades interesantes, dentro de las cuales destaca la de absorber flujo magnético sólo en cantidades que son múltiplos de la unidad $\phi = hc/2e = 2.07 \cdot 10^{-7} \text{ G/cm}^2$ ($G = \text{Gauss}$). A nivel mundial, dicha propiedad está siendo explorada para fabricar detectores muy sensibles de campo magnético. La electrónica asociada con estos dispositivos se basa en lo que se conoce como detectores SQUID (Superconducting

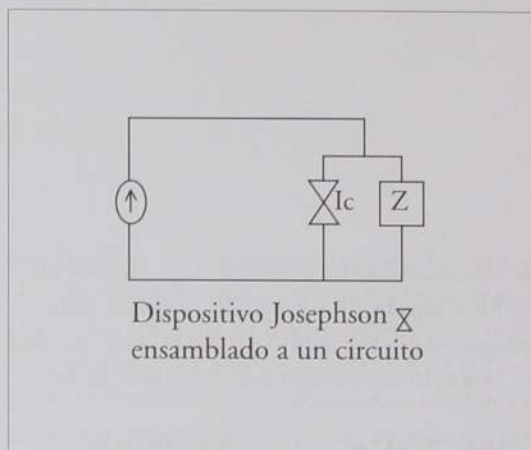
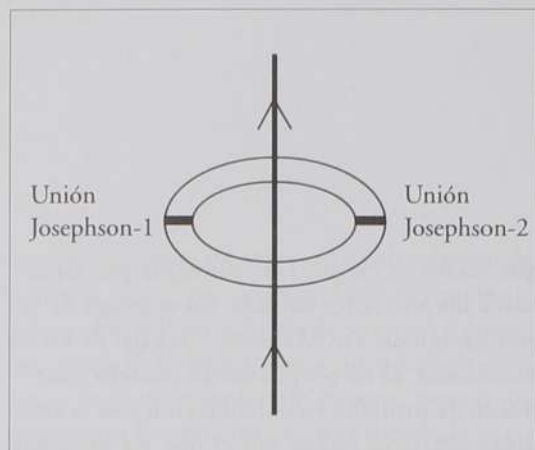


Figura 1a. y Figura 1b. En los detectores SQUID uno de sus componentes es el anillo superconductor "debilitado" por uniones no superconductoras (uniones Josephson).

Quantum Interference Devices) y que consta de una circuitería AC (corriente alterna) común en el que una de sus componentes es un anillo superconductor "debilitado" por uniones no superconductoras (uniones Josephson), ver figura 1a y figura 1b. Cada vez que un cuanto de flujo atraviese el área del anillo, se incrementa la resistencia en la parte superconductora y una mayor cantidad de corriente pasa por la rama caracterizada por la impedancia Z . Así, el anillo superconductor detectará los cambios de flujo que atraviesan su área y estos cambios serán detectados por el resto del circuito a través de la electrónica adecuada. Lo más importante es notar que el dispositivo así descrito es viable para la detección de campos magnéticos muy débiles. En particular, estos dispositivos están siendo explorados en la detección de campos magnéticos generados por las células del cerebro humano. La idea fundamental es inducir, a través de campos magnéticos relativamente intensos, momentos magnéticos en dichas células y estudiar estos momentos con los detectores SQUID, figura 2. A pesar de que estos dispositivos son potencialmente viables, su implementación requiere de la unión de grupos multidisciplinarios que abarcan la física de materiales, la electrónica y la medicina, actividad que se refuerza gracias a la

labor del Dr. Agustín Conde y su equipo de trabajo. Así las cosas, sólo se está a la mitad del camino de una potencial aplicación de la física en la vida cotidiana.

VECTORES NO VIRALES DE TERAPIA GÉNICA

Es sabido que los virus son eficientes para facilitar el transporte de ADN a través de la membrana de las células. Esto lo logran, en parte, debido a que la cápsula viral contiene anclados en su superficie tanto anticuerpos como ligandos (proteínas) que son selectivos a células blanco de interés. Tradicionalmente los vectores virales se usaron para fines de terapia génica, reemplazándoles parcialmente su secuencia codificada de ADN por la del nuevo gen de interés. Aunque de esta forma se obtienen virus con capacidad de replicación defectuosa y disminuida, generan invariablemente fuerte respuesta patogénica en el cuerpo humano cuando se los usa en terapia génica. En años recientes se ha hecho posible usar vehículos sintéticos, hechos de liposomas, para el transporte extracelular en vivo e *in vitro* de ADN en forma dirigida tal y como lo hacen los virus. La idea esencial al usar estos nuevos vectores artificiales es copiar las características funcio-

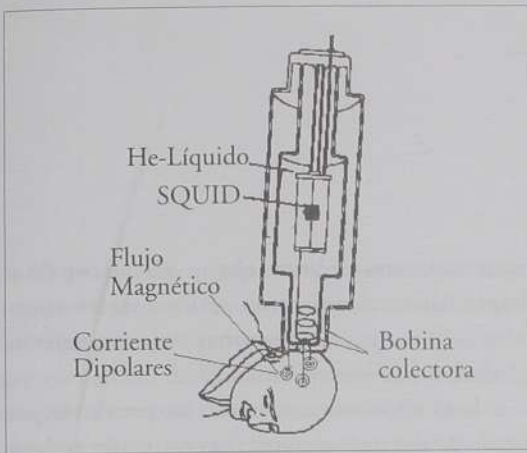


Figura 2. Estudio de campos magnéticos del cerebro usando SQUID.

nales de las cápsulas de virus, y que de esta manera sirvan como vehículos de transferencia de genes transportando no sólo una secuencia codificada sino largas cadenas completas de ácido nucleico lo cual sí se ha logrado. Los nuevos sistemas liposoma-ADN fabricados en diversos laboratorios del mundo, muestran que su eficiencia en términos de genes que finalmente se logran expresar en el núcleo celular es muy baja. Por lo que el interés del grupo de Física Estadística del Dr. Martín Hernández Contreras es comprender los mecanismos físicos que ayuden a su estabilidad e incrementar los niveles de expresión génica y eficiencia de estos sistemas. Los liposomas son estructuras vesiculares cerradas hechas de lípidos sintéticos que contienen carga eléctrica positiva. En su interior encierran parte del fluido en el que se encuentran flotando, de manera que si se agrega ADN en la solución (el cual es un biopolímero con carga negativa) lo que ocurre a continuación es la agregación inducida por la atracción eléctrica entre ellos, con el resultado observado experimentalmente de que el ADN se instala en el interior del liposoma. En este proceso de autoensamblado espontáneo, parte de la membrana de lípidos que forma al liposoma se usa para formar un emparedado en el interior, entre el que queda atrapado el ADN como se muestra

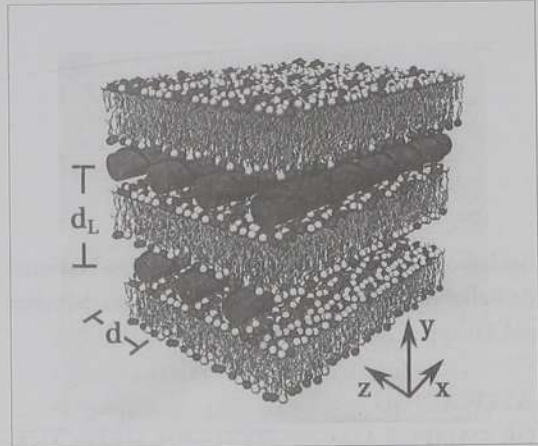


Fig.3. Proceso de autoensamblado espontáneo.

en la figura 3. El Dr. Hernández junto con sus colaboradores ha empleado estos resultados para estudiar físico-químicamente las propiedades que ayudan a entender cómo se forma este autoensamblado de manera que dichos estudios contribuyan a la manipulación racional y controlada del liposoma-ADN para su uso en terapia génica.

REGENERACIÓN ÓSEA

El grupo de investigación del Dr. Miguel Meléndez Lira y colaboradores ha tomado como base su amplia experiencia en caracterización óptica y estructural y síntesis de materiales semiconductores para desarrollar estudios de biomateriales aplicados en el área de ortopedia, más específicamente en lo que concierne a la regeneración ósea, empleando biomateriales y el desarrollo de recubrimientos biocompatibles, con base en las propiedades luminiscentes del tejido óseo.

Asimismo, con el uso de espectroscopía óptica actualmente se desarrolla un glucómetro (aparato para medir niveles de glucosa en la sangre) no invasivo y la implementación de la espectroscopía de reflectancia difusa para la detección de cáncer de piel con la participación de estudiantes de licenciatura. Estos trabajos se realizan con la colaboración de la M. en C. Cecilia Hernández Flores

del Laboratorio de Bioquímica del Centro Nacional de Rehabilitación y con el médico Caciano Sánchez del Hospital de Ortopedia del IMSS.

APLICACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN MEDICINA

Por millones de años los seres vivos hemos estado sometidos a influencias magnéticas de origen natural. El resultado del desarrollo tecnológico de la humanidad, desde el descubrimiento de la energía eléctrica y las telecomunicaciones, ocasionó que nuestro planeta se poblara de muy diversas ondas pertenecientes al espectro electromagnético. Así nos encontramos con los llamados campos electromagnéticos (CEM) de frecuencia extremadamente baja, debido a la electricidad alterna que tenemos en casa y otras ondas de mucho mayor frecuencia como las del radio, la televisión, el radar y las del teléfono celular, tan popular en nuestros días.

Surge entonces de manera natural la curiosidad por preguntarnos: ¿Cuánto nos está afectando dicha radiación? ¿cómo nos afecta? Esto es, ¿cuál es su efecto sobre nuestros procesos biológicos como seres vivos? ¿la podemos usar en nuestro beneficio o es dañina?

Sabemos que los seres vivos, tanto plantas como animales, somos estructuras bioeléctricas. Toda célula se comporta como un dipolo, ya que al tener una distribución asimétrica de cargas hace que el interior celular sea negativo y el exterior positivo. La diferencia de potencial a través de la membrana celular varía dependiendo del tipo de célula que se trate. En los animales y los seres humanos en particular, son frecuentes las

manifestaciones eléctricas que se valoran con fines diagnósticos: electrocardiogramas, electroencefalogramas, electromiogramas y electrorretinogramas, entre los más usados¹.

Los CEM interactúan con los seres vivos por medio de dos mecanismos² (hay otros aún no bien entendidos en términos de reacciones con radicales libres, reacciones bioquímicas enzimáticas): inducción de campos eléctricos producidos de acuerdo con la ley de Faraday de inducción magnética y, por los efectos directos de los campos magnéticos sobre partículas magnéticas como cristales de magnetita (Fe_2O_4) los cuales están presentes en gran número de organismos; así, las fuerzas oscilatorias magneto-mecánicas de estas partículas de magnetita podrían fungir como un mecanismo de interacción directa de los CEM con los constituyentes celulares.

En el grupo de investigación de estimulación magnética del Dr. Juan José Godina Nava, se llevan a cabo estudios sobre los efectos biológicos del CEM, particularmente asociado con frecuencias de onda extremadamente bajas (feb) y su potencial aplicación en medicina. En colaboración con el Dr. Luis Cañedo, el M. en C. Gregorio Serrano Luna y el M. en C. Miguel Ángel Rodríguez Segura, se les emplea como alternativa no invasiva a problemas de la salud como el restablecimiento de úlceras crónicas del tipo arterial, venoso y arterial-venoso, al estudiar el efecto sistémico que los CEM producen en el sanado de las heridas crónicas de diferentes etiologías.

Basado en evidencias experimentales, concernientes al hecho de que un mitógeno activado en células mononucleares periféricas de sangre, aplicadas localmente sobre la superficie de la úlcera favorecen el sanado de úlceras de pie del tipo venoso.

Se ha propuesto que los CEM activan al sistema inmunológico vía humoral, interactuando con las células mononucleares periféricas de la sangre vía canales de Ca^{++} , activando la señal de la cascada de trasducción, promoviendo la síntesis de citocinas y cambiando los patrones de proliferación celular requeridos para restablecer el tejido y cerrar una úlcera. En colaboración con la Dra. Luisa Rocha Arrieta, del Departamento de Farmacobiología, en la Unidad Sur del CINVESTAV, y de la División de Neurociencias del Instituto Nacional de Psiquiatría, se iniciaron estudios tendientes a la prevención y tratamiento no invasivo de epilepsia refractaria con el empleo de los CEM de feb.

En colaboración con la Dra. Susana Reyes Cadena, del Centro Nacional de Rehabilitación, se llevan a cabo estudios sobre el efecto de los CEM de feb en pacientes con esclerosis múltiple (EM). La esclerosis múltiple es una enfermedad crónica incurable del sistema nervioso central (SNC), que afecta a la sustancia blanca (mielina) del cerebro y la médula espinal, en donde se encuentra involucrado el sistema inmunológico. Es la enfermedad neurológica más frecuente entre adultos jóvenes. Suele aparecer entre los 20 y 40 años y afecta más a las mujeres.

Aunque no se conoce su causa se puede afirmar que:

- Tiene un fondo hereditario
- Puede ser por virus
- Puede ser por bacterias

Los síntomas posibles de esclerosis múltiple son:

- Debilidad muscular
- Espasticidad (contracciones musculares involuntarias)

- Deterioro de los sentidos del tacto, dolor, temperatura
- Dolor (moderado a severo)
- Ataxia (falta de coordinación)
- Temblores
- Alteraciones del habla
- Alteraciones visuales
- Alteración de la sensibilidad
- Vértigo
- Disfunción urinaria
- Trastornos intestinales
- Disfunción sexual
- Depresión
- Euforia
- Anormalidades cognoscitivas
- Visión doble o borrosa
- Debilidad y torpeza en las extremidades
- Fatiga excesiva

La evolución de la enfermedad es impredecible y diferente en cada paciente, desde formas benignas sin apenas sintomatología hasta los casos más graves con parálisis parcial e incluso total. En la actualidad no existe un tratamiento curativo aunque sí paliativo. Durante un ataque de esclerosis múltiple, se produce inflamación en áreas de la materia blanca (mielina) del sistema nervioso central en partes distribuidas al azar llamadas placas. A este proceso le sigue la destrucción de la mielina, cubierta grasa que aísla las fibras de las células nerviosas en el cerebro y en la médula espinal.

La mielina facilita una transmisión sin dificultad y a alta velocidad de los mensajes electroquímicos entre el cerebro, la médula espinal y el resto del cuerpo. Cuando hay daño a la mielina,

la transmisión neurológica de los mensajes ocurre más lentamente o queda bloqueada totalmente, lo que conduce a una reducción o pérdida de función.

El nombre "esclerosis múltiple" significa tanto el número (múltiple) como la condición (esclerosis, del término griego que describe el cicatrizado o endurecimiento) de las áreas en las que se ha eliminado la mielina en el sistema nervioso central.

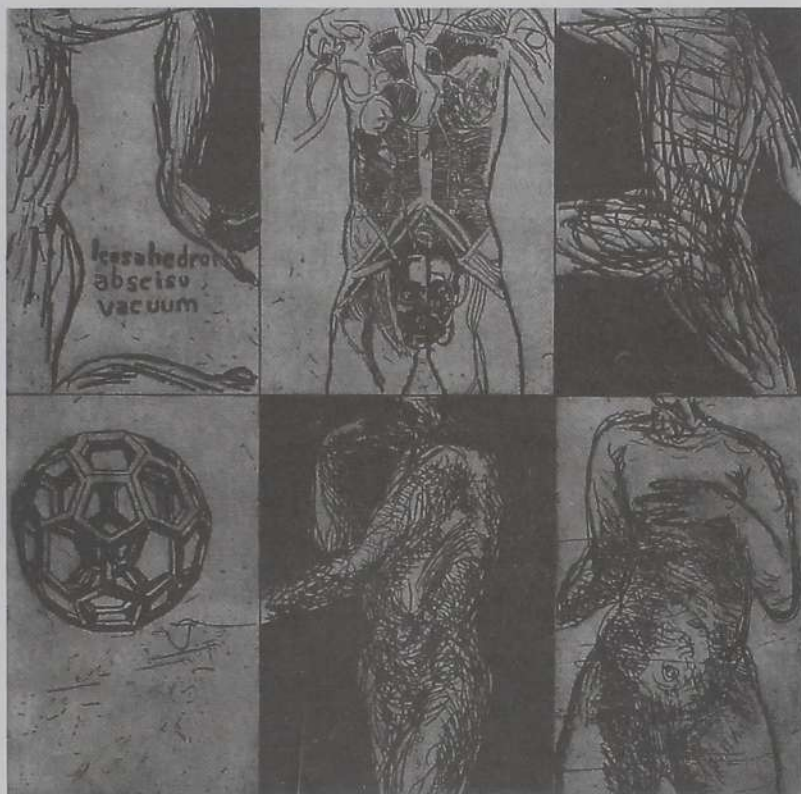
Por ahora, no existe una cura de la esclerosis múltiple. Las remisiones espontáneas, aquellas que ocurren naturalmente, pueden hacer difícil determinar los efectos terapéuticos de tratamientos experimentales. Sin embargo, la evidencia de que las imágenes de resonancia magnética (MRI) pueden trazar el desarrollo de lesiones, está ayudando a los científicos a evaluar nuevas terapias.

La terapia con la estimulación magnética y su relación con el sistema inmunológico, ha dado buenos resultados hasta la fecha y se trabaja en el aspecto de generar el sustento teórico a estas observaciones clínicas, para ello se diseñan modelos dinámicos del sistema inmunológico en colaboración con el Dr. Jesús Martínez Castro de la Escuela Superior de Cómputo y estudiantes de la misma escuela, tanto para explicar la reparación de úlceras crónicas como para el estudio de la esclerosis múltiple. Asimismo, se emplea el estudio de sistemas complejos auto-organizados en colaboración con el M. en C. Guillermo Vázquez Coutiño del Departamento de Química Analítica, UAM-Iztapalapa, y el análisis de patrones de caos aplicados al estudio del cerebro, mediante el análisis de las secuencias de tiempo de electro-

encefalogramas en pacientes con posible daño cerebral, los cuales son estimulados vía CEM de feb. En todas las áreas de investigación se encuentran estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado.

REFERENCIAS

- ¹Adair, R.K., 1991, "Constraints on biological effects of weak extremely-low-frequency electromagnetic fields," *Phys. Rev. A*, 43: 1039-1048.
- ²Tenforde, T. S., 1996, "Interaction of ELF magnetic fields with living systems", en *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Charles Polck, Elliot Postow, eds., CRC Press, Inc., Washington, D.C. pp. 185-230.





LOS SEMICONDUCTORES: DE LOS TRANSISTORES A LAS NANOESTRUCTURAS Y LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

ISAAC HERNÁNDEZ-CALDERÓN

"Pienso que en el mundo hay mercado para tal vez cinco computadoras", Thomas Watson, Presidente de IBM, 1943.

"No hay razón por la que alguien quisiera una computadora en su casa", Ken Olson, Presidente y fundador de Digital Equipment Corporation, 1977.

HOY CONTAMOS CON MUCHOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS QUE 25 AÑOS atrás podrían haber parecido asunto exclusivo de cuentos de ciencia ficción. Para muchos niños las computadoras son uno de tantos aparatos domésticos, los juegos de realidad virtual no les parecen misteriosos y enviar o recibir información de cualquier tipo y de cualquier lugar del mundo sólo requiere sentarse frente a una PC. Todo esto es el resultado del explosivo desarrollo científico y tecnológico de los últimos 40 años, con particular énfasis en los últimos veinte. No hay duda que en todo esto los semiconductores han jugado un papel predominante. No hace mucho que la computadora de bolsillo, el discman, el DVD, las pantallas de plasma, las cámaras digitales y los teléfonos celulares eran aparatos exóticos que no formaban parte de nuestra vida diaria. La industria de los semiconductores es una de las que más crecimiento ha presentado en los últimos años. En 2004, las ventas alcanzaron cerca de \$200,000 millones de dólares.

LOS SEMICONDUCTORES

Dependiendo de los intereses específicos los materiales pueden clasificarse de formas muy diversas. Desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas podemos hacerlo en tres grandes categorías: aislantes, semiconductores y conductores de la electricidad. Los semiconductores, como su nombre lo indica, son materiales que conducen la electricidad mejor que un aislante pero muy deficientemente en comparación con un metal. Son estudiados por la física del estado sólido, que es uno de los campos de investigación más desarrollados tanto a nivel internacional como nacional. No es difícil entender como surgen los diferentes tipos de materiales a partir de las propiedades de los átomos que los forman. Sabemos que podemos describir a los átomos como un núcleo positivo que contiene neutrones y protones y que está rodeado de nubes de electrones organizados en capas

El Dr. Isaac Hernández-Calderón es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV, www.fis.cinvestav.mx/nanosem. Su correo electrónico es: ihernand@fis.cinvestav.mx

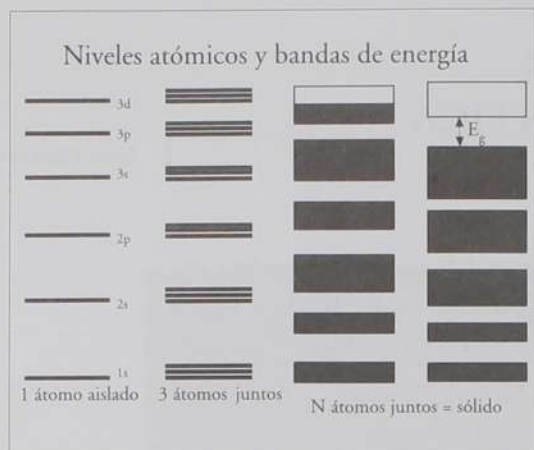


Figura 1. Transformación de los niveles atómicos a las bandas de energía de un sólido. En el caso de la banda superior semillena tenemos un metal. En el otro caso un semiconductor o un aislante, dependiendo del valor de E_g .

alrededor del núcleo. Cada capa electrónica contiene un cierto número de orbitales, siendo éstos definidos por sus números cuánticos y con una ocupación máxima de dos electrones con espín opuesto, obedeciendo el principio de exclusión de Pauli que nos dice que no podemos tener dos electrones con los mismos números cuánticos. Cuando nosotros formamos un sólido a partir de átomos aislados los orbitales de cada átomo se van acomodando de tal forma que no se viole el principio de exclusión de Pauli. Esto significa que los átomos no pueden mantener sus niveles de energía originales, se encimarían unos con otros y tendrían los mismos números cuánticos, por lo tanto se van agrupando en bandas, figura 1. Dependiendo de los átomos con los que formamos el sólido las bandas menos ligadas, las correspondientes a los electrones externos, pueden quedar parcial o totalmente llenas. Es precisamente esa última banda la que origina la gran diferencia de las propiedades eléctricas entre diversos materiales. En el primer caso tenemos metales como el cobre (Cu), la plata (Ag), el oro (Au) y muchos otros; en el segundo caso podemos tener semiconductores como el silicio (Si), el seleniuro de cadmio (CdSe) o el arseniuro de galio (GaAs) o aislantes como el diamante (C)

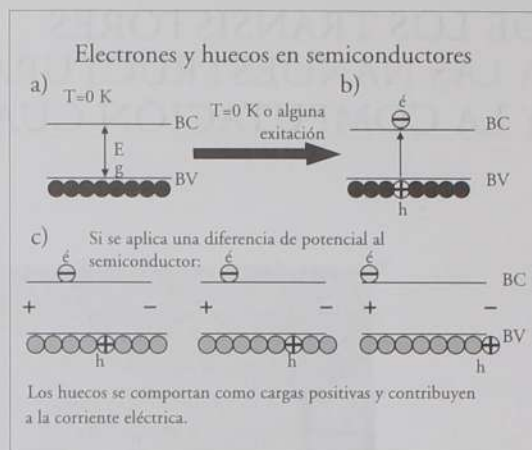


Figura 2. a) Semiconductor en su estado base a baja temperatura; b) Semiconductor excitado por alguna perturbación externa o por temperatura. El electrón pasa a la banda de conducción dejando un hueco en la banda de valencia; c) Bajo una diferencia de potencial (voltaje) hay movimiento de huecos y electrones en sentidos contrarios.

y el cuarzo (SiO_2). Aplicando un pequeño voltaje a un pedazo de material con una banda semillena los electrones menos ligados de la banda podrán pasar sin mucho problema a un nivel de energía inmediato superior y viajar dentro del metal, ya que hay muchos estados vacíos a los que pueden mudarse continuamente. Sin embargo, si la banda está llena, los electrones no se pueden mover a un estado desocupado (pues no existe) para producir una corriente. Entre los últimos estados ocupados de la banda llena y los primeros desocupados de la banda vacía se encuentra una brecha energética o banda prohibida (E_g) que sólo se puede superar adquiriendo al menos una energía igual a E_g . Si E_g es grande tendremos a un aislante. Cuando la banda prohibida no es tan grande y es posible por alguna excitación externa (temperatura, luz, campo eléctrico, etcétera) que los electrones puedan pasar de la banda llena (banda de valencia) a la banda vacía (banda de conducción), entonces se producirá una corriente eléctrica y esto es lo que caracteriza a un semiconductor. Por lo tanto, el cobre es mucho mejor conductor que el semiconductor CdSe, y el CdSe conduce más que el SiO_2 que es un aislante. Como las bandas de valencia y de conducción son las que determinan sus pro-

propiedades electrónicas, los semiconductores normalmente se pueden representar como se ilustra en la figura 2a. Cuando un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción deja un *hueco* en la banda de conducción, figura 2b. El concepto de hueco es muy importante en la física de semiconductores. Observemos la figura 2c: al aplicar una diferencia de potencial los electrones de las dos bandas se mueven hacia el polo positivo (el ánodo), pero en el caso de la banda de valencia ese movimiento es equivalente al movimiento del hueco en dirección contraria. Así, podemos describir el movimiento de los huecos como una corriente eléctrica de cargas positivas. Por lo tanto, en un semiconductor tenemos portadores de carga negativos (electrones) y positivos (huecos) y al viajar en direcciones contrarias contribuyen a la corriente eléctrica. Una característica muy importante de los semiconductores es que agregando muy pequeñas cantidades de impurezas cuidadosamente seleccionadas se puede producir en forma controlada un exceso de cargas negativas o cargas positivas, así tendremos semiconductores de tipo *n* o de tipo *p*, respectivamente. Estos semiconductores impurificados expuestos a una excitación externa como luz o un campo eléctrico pueden ser capaces de conducir importantes cantidades de corriente eléctrica. Haciendo combinaciones de semiconductores tipo *p* y *n* se pueden producir dispositivos semiconductores de gran importancia tecnológica.

DISPOSITIVOS TIPO DIODO

Uno de los dispositivos semiconductores más sencillos y útiles se forma por medio de una *unión*

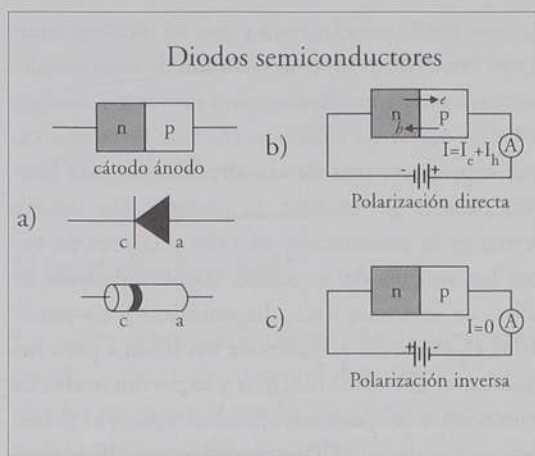


Figura 3. a) Representación esquemática de un diodo, su símbolo en electrónica y un diodo mostrando un listón para indicar la posición del cátodo.

p-n: el diodo. Este dispositivo conduce corriente eléctrica cuando el polo positivo de una batería se conecta al lado *p* y el polo negativo al lado *n* (polarización directa), pero no conduce si los polos se conectan con polarización inversa, figura 3. Esta propiedad permite usarlos como rectificadores de corriente. Los diodos llamados Zener tienen la característica de servir como reguladores de voltaje. Una aplicación muy importante de la unión *p-n* son los diodos emisores de luz o LEDs (del inglés, light emitting diode) que emiten luz cuando se les aplica una corriente eléctrica. Son las pequeñas luces que podemos ver en casi cualquier aparato electrónico. Los LEDs son en general eficientes conversores de energía eléctrica a energía óptica. Otro tipo de diodos son los láseres de semiconductor. Todos hemos visto aquellos que emiten luz roja, que son comunes y baratos y su tamaño es menor a un granito de azúcar. Las aplicaciones de LEDs y láseres son innumerables: comunicación, metrología, avisos luminosos, lectores y escritores de discos ópticos, señalización, entre otras. Otro tipo de diodos que son complementarios a los emisores de luz son los fotodiodos, la luz que incide sobre la unión *pn* produce el paso

de una corriente eléctrica y por lo tanto se usan como fotodetectores. Una variación de estos fotodetectores puede emplearse para convertir energía solar en corriente eléctrica, la celda fotovoltaica, que representa una de las alternativas más limpias para la generación de energía. Un interés actual es la producción de LEDs y láseres en todos los colores del espectro visible (algunos de ellos ya se encuentran disponibles) y en particular el diodo de emisión de luz blanca para luz ambiente. Estudios teóricos y experimentales de estos tipos de dispositivos optoelectrónicos se vienen desarrollando en el Departamento de Física del CINVESTAV.

EL TRANSISTOR

El impacto tecnológico de los semiconductores se inició en 1947 cuando John Bardeen y Walter Brattain emplearon un cristal de germanio tipo *n* (*n*-Ge) y dos electrodos metálicos (uno con polarización directa y el otro con polarización inversa) y se produjo la amplificación de una señal de corriente. En 1949, con la contribución de William Shockley, realizaron una estructura tipo trío que consistió en una delgada capa de *p*-Ge entre dos capas de *n*-Ge, es decir, una estructura *n-p-n*, de esa forma nació el primer transistor bipolar. Este nuevo dispositivo dio lugar a un desarrollo acelerado e impresionante de la industria electrónica. El descubrimiento del transistor se consideró de tal relevancia que sus inventores recibieron el premio Nobel en 1956. Debido a que era posible usarlo eficientemente como oscilador y como amplificador de corriente, el transistor sustituyó rápidamente a los bulbos (o válvulas de vacío) que todavía podemos ver en algunos aparatos antiguos. En suma, los transistores han resultado mucho más eficientes, menos voluminosos, más económicos y con la ventaja adicional de consumir menos energía que los bulbos. Se pueden encontrar en configuraciones *nnp*

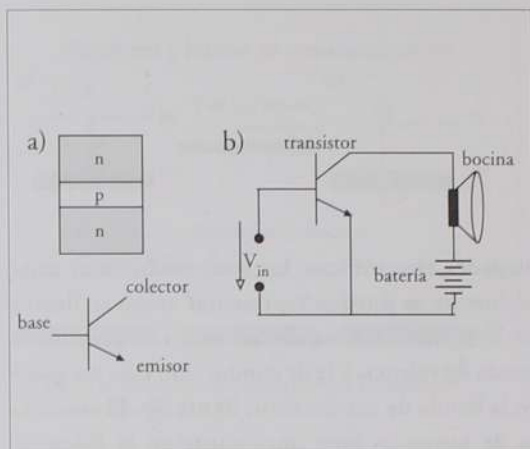


Figura 4. a) Representación de un transistor *nnp*. Se incluye su símbolo en electrónica; b) Circuito simplificado que ilustra la amplificación de audio.

y *pnp* en base a diversos semiconductores, los más comunes son de Ge y Si, siendo los de Si los que dominan el mercado. La figura 4a muestra la estructura de un transistor *nnp* y su símbolo, indicando las tres terminales de un transistor: colector, base y emisor. La figura 4b muestra un circuito simplificado de amplificación de audio. El lector interesado podrá visitar la página web <http://www.unicrom.com> que cuenta con diseños completos de circuitos electrónicos de interés general. Dependiendo de la aplicación son empleados transistores de muchos tipos tanto bipolares como unipolares (transistores de efecto de campo, FET por sus siglas en inglés) y de configuraciones y propiedades muy diversas, que han dado lugar a una amplia nomenclatura: JFET, IGFET, MOSFET, HEMT, etcétera.

CIRCUITOS INTEGRADOS

La facilidad de producir los semiconductores en forma de capas muy delgadas, de fracciones de un micrómetro y la alta resolución del procesamiento litográfico de materiales ha permitido una drástica reducción de las dimensiones de los dispositivos basados en semiconductores y han he-

cho posible la producción de circuitos integrados (chips) que pueden contener millones de diodos, transistores y otros componentes en áreas de unos cuantos centímetros cuadrados. Actualmente INTEL produce memorias SRAM que contienen más de millón y medio de transistores por milímetro cuadrado. Esta miniaturización a gran escala de los dispositivos semiconductores ha permitido aumentar la eficiencia y reducir en forma sorprendente los costos y las dimensiones de aparatos electrónicos. Entre los que más se han desarrollado se encuentran precisamente las computadoras. Una de las primeras computadoras, el "calculador e integrador numérico electrónico", ENIAC, que se terminó de construir en la Universidad de Pensilvania en 1946, con el propósito inicial de calcular trayectorias balísticas, pesaba 30 toneladas, contenía más de 18 000 bulbos, consumía alrededor de 200 kw y se necesitaban varios cuartos para albergar todas sus partes, incluyendo un poderoso sistema de aire acondicionado. Algunas décadas después ya se podían comprar computadoras millones de veces más rápidas y transportables incluso en el bolsillo de una camisa. El desarrollo de los circuitos integrados ha seguido, sorprendentemente, la llamada "ley de Moore", en los últimos 10 años la velocidad de procesamiento de las computadoras personales ha aumentado ~1000 veces ($\sim 2^{10}$) y en promedio cada dos años se duplica el número de dispositivos de un chip. Es evidente que esto no podrá continuar indefinidamente, la reducción de los tamaños se vuelve cada vez más difícil, se requieren tecnologías caras y sofisticadas y el entendimiento de nuevos fenómenos físicos.

NANOESTRUCTURAS

La constante búsqueda y obtención de nuevos materiales semiconductores, el desarrollo de sofisticados métodos de producción de películas delgadas y ultradelgadas de alta pureza y calidad cristalina y métodos de procesamiento a escala submicroscópica han conducido al desarrollo de estructuras cuyas dimensiones están en el rango de milésimas a décimas de un micrómetro, es decir, dimensiones nanométricas ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Estas nanoestructuras han dado lugar a nuevos fenómenos en la física y a la producción de dispositivos cuyas propiedades están enteramente dominadas por los fenómenos que describe la mecánica cuántica. Esto es debido a que los portadores de carga (electrones y huecos, como vimos anteriormente) se encuentran confinados en regiones que son del mismo orden que la extensión de su función de onda, decenas o centenas de nanómetros, figura 5a. Los elementos activos de muchas nanoestructuras semiconductoras son los pozos, alambres y puntos cuánticos que en la física son conocidos como sistemas de baja dimensionalidad. Un pozo cuántico lo formamos cuando colocamos una capa nanométrica de un semiconductor (el pozo) con banda prohibida $E_{g,w}$ insertada entre otro semiconductor (las barreras) con $E_{g,b} > E_{g,w}$ figura 5b, estos elementos comienzan a ser la base de la electrónica actual. Algunos de estos dispositivos cuánticos ya forman parte de sofisticados aparatos disponibles comercialmente. Éstos y otros *sistemas nanoestructurados*, en muy diversas áreas, han dado lugar a la nanociencia y a la nanotecnología. Esto implica que el aprendizaje de la mecánica cuántica

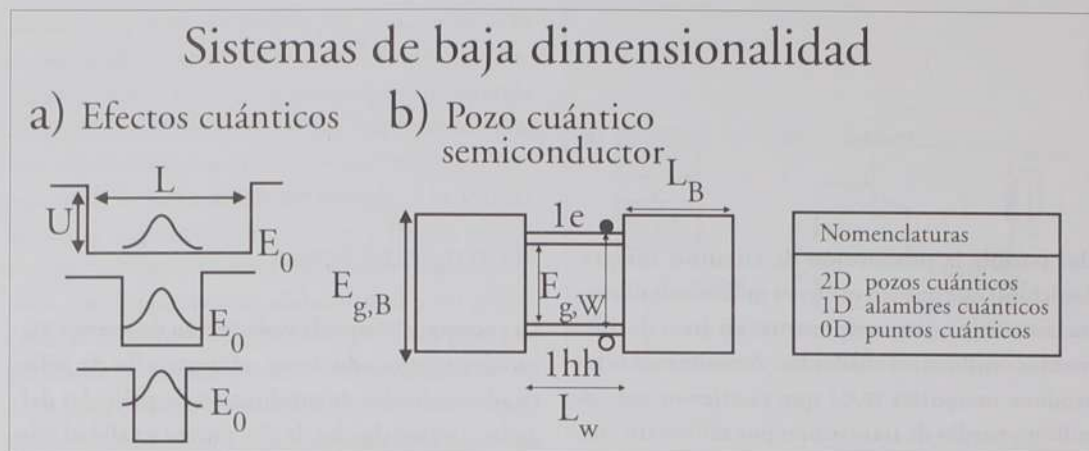


Figura 5. a) Pozo cuántico de profundidad U . Los efectos cuánticos se observan cuando la dimensión de confinamiento (L) se reduce a unos cuantos nm. Como se ilustra, la energía del estado base cambia. b) Representación de un pozo cuántico a base de semiconductores. En este caso, tenemos un pozo para los electrones y otro para los huecos (pozo tipo I).

ya resulta necesario en varias áreas de la ingeniería, particularmente aquellas relacionadas con la optomecatrónica.

El grupo de investigación NanoSem del Departamento de Física del CINVESTAV trabaja en pozos y puntos cuánticos semiconductores de dimensiones nanométricas y subnanométricas para aplicaciones optoelectrónicas desde hace al menos una década. Entre sus resultados recientes se tiene la producción de pozos y puntos cuánticos ultradelgados de CdTe y CdSe cuyo espesor se encuentra entre una monocapa y cuatro monocapas atómicas (una monocapa ~ 0.3 nm) que podrían ser empleados para la elaboración de LEDs y láseres, entre otras aplicaciones, con emisión de luz en todo el espectro visible.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Las computadoras clásicas basan su funcionamiento en el uso del sistema binario, el 1 y el 0. El valor de un bit está siempre determinado y sólo puede tomar algunos de esos dos valores. La computación cuántica está basada en el principio de superposición de la mecánica cuántica

que dice que en un sistema de dos niveles el bit cuántico o *qubit* puede tener en un cierto momento los valores 0 y 1, cada uno con cierta probabilidad; se habla de una superposición coherente entre los dos estados definidos y no de un estado intermedio. Esta propiedad de los qubits permitirá hacer operaciones complejas en tiempos notablemente menores que las computadoras clásicas, ya que todas las posibles soluciones a un problema podrán obtenerse simultáneamente. Otra propiedad de la computación cuántica es que la información se puede manipular por medio de pares de partículas que presentan el fenómeno cuántico del "amarriamiento",¹ es decir, las propiedades de una partícula quedan determinadas por las propiedades de la otra partícula, si uno mide las propiedades de una, se sabrán las de la otra. Esto permitiría una encriptación mucho más segura que la actual y el envío seguro de información. Se espera que la mayor velocidad de las computadoras cuánticas permita en el futuro resolver problemas que son imposibles con computadoras clásicas. Aquí nuevamente entran como protagonistas los semiconductores: los puntos cuánticos como

qubits y los fotones (producidos por transiciones ópticas en las nanoestructuras) o los estados de espín de los electrones en estos puntos cuánticos como las partículas "amarradas" que portarán la información.

La investigación en la física del estado sólido ha dado lugar a un buen número de premios Nobel, varios de ellos relacionados con semiconductores: 1956, William Shockley, John Bardeen y Walter H. Brattain por el invento del transistor. 1973, Leo Esaki por el diodo túnel. 1985, Klaus von Klitzing por el efecto Hall cuántico. 1998, Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer y Daniel C. Tsui por el efecto Hall cuántico fraccionario. 2000, Zhores I. Alferov y Herbert Kroemer por las heteroestructuras semiconductoras, y Jack S. Kilby por la invención de los circuitos integrados.

La física de semiconductores se encuentra en una nueva etapa, tanto de escala como de multidisciplinaridad. Sin duda el desarrollo de la ciencia y la tecnología de los semiconductores ha sido y será un factor primordial para el progreso de cualquier nación. En México se desarrollan investigaciones de nivel internacional, pero en proporciones muy reducidas. Esperemos que la situación cambie en el futuro cercano con la incorporación de nuevos investigadores y la participación de la industria privada.

NOTA

¹ "Amarramiento" es una posible traducción de la palabra en inglés *entanglement*, la que a su vez es una posible traducción de la palabra alemana *verschränkung*.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

- Kittel, Charles, 1998, *Introduction to Solid State Physics*, Nueva York, John Wiley and Sons.
- Yu, Peter, y Manuel Cardona, 2002, *Fundamentals of Semiconductors*, Berlin, Springer.
- Sze, S.M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, New York, John Wiley and Sons.
- Hernández-Calderón, Isaac, García-Rocha, M. y Díaz-Arencibia, Pedro, 2004, "Growth and characterization of ultra-thin quantum wells of II-VI semiconductors for optoelectronic applications", *Phys. Status Solidi (b)* vol. 24, pp. 558-563.



¿HACIA DÓNDE VA LA SUPERCONDUCTIVIDAD? LA DANZA DE LAS IDEAS

RAFAEL BAQUERO

EL 7 DE OCTUBRE DE 2003, NIELS BOHR HUBIESE CUMPLIDO 118 AÑOS. Ese mismo día, la Academia Sueca anunciaba que otorgaba el Premio Nobel de Física a Alexei Abrikosov y a Vitaly Ginzburg (rusos) por superconductividad, y a Anthony Legget (inglés) por superfluidez. ¡La superconductividad está de moda!

Niels Bohr fue un genio de la Física, Premio Nobel, intérprete por excelencia de la mecánica cuántica. Albert Einstein nunca estuvo de acuerdo con él. Hoy los físicos seguimos buscando una interpretación aceptable para todos, pero aun así la mecánica cuántica dio lugar al estado sólido, a la electrónica y éstas nos llevaron a la Luna en 1968.

La mecánica cuántica no se quedó allí. Con la relatividad general constituye uno de los pilares fundamentales de la concepción del Universo. Y qué mala pasada la que nos jugaron: ¡ambas no pueden valer de manera consistente en forma simultánea! Quizá por eso todas las mañanas, Merced Montesinos, un colega joven de gran inteligencia, sube muy serio por las escaleras que están frente a mi oficina con la idea fija de cuantizar a la pobre relatividad, como si ella tuviera la culpa de todo este desorden. Es un poco como cuando a Gödel le dio por probar que ninguna formulación axiomática de la aritmética que fuese completa podía ser consistente. Es un golpe conceptual fuerte.

La mecánica cuántica dio también origen a la superconductividad, la cual tiene una bellísima historia. Se presenta en metales. Estos están hechos de átomos que se ligan unos a otros muy fuertemente. Y resulta que dentro corren electrones libres como niños en recreo. Puedes imaginar los metales como cubos que tienen en los vértices átomos y electrones en el espacio vacío, paseándose a su antojo. Los átomos vibran de diferentes y muy específicas maneras, como cuando juegas con una cuerda que tienes sujeta de un extremo y está amarrada del otro. Tú quieres hacer onditas con ella. Para que se te regrese la ondita cuando llega al extremo atado sin que se atenúe tienes que agitarla de una cierta forma. Hay varias maneras que funcionan. Cada forma de ondita de las que funcionan se llama estado vibracional. Y obviamente tiene una cierta energía diferente para cada uno. La diferencia entre dos

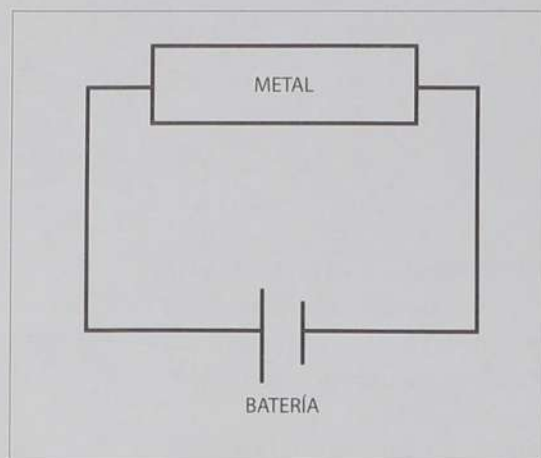


Figura 1. Circuito eléctrico. Cuando hay un potencial se produce una corriente.

estados vibracionales se llama “fonón”, un término de mecánica cuántica, de física cuántica del estado sólido.

Cuando colocas una pila cerrando un circuito por entre un metal, como en la figura 1, se produce una corriente y la resistencia se calienta. Las pérdidas por calor entre una hidroeléctrica y un centro de consumo (ciudad) pueden ser tan grandes como el 35% del total producido. ¿Quién sale al rescate? ¡La superconductividad!

La superconductividad junta los electrones en pares que no producen calor al formar una corriente (cero pérdidas). ¿Cómo se producen los pares? Se llaman Pares de Cooper y se forman porque un fonón los une. Así se producen en los materiales que se llaman convencionales. Para que se formen los pares es necesario bajar la temperatura. La superconductividad sólo se produce por debajo de una cierta temperatura llamada temperatura crítica, T_c . Para toda aplicación, entre mayor sea la T_c , mejor. Pero la T_c de los materiales convencionales es menor a -250°C . ¡Muy bajita! No sirve. Económicamente no es rentable.

En 1986 se descubrieron materiales a los que se llamó de alta temperatura crítica. Superconductores de alta T_c (SATEC). Y aquí viene

otra broma de la mecánica cuántica que dio origen a la superconductividad. Los pares de electrones podrían no estar unidos por fonones. No están unidos por la energía que es igual a la diferencia entre dos estados vibracionales. Ésta es al menos la opinión de muchos. Dicen que están unidos por la energía que es igual a la diferencia entre dos estados de polarización de espín. ¿Qué es eso? Los átomos actúan como imanes localizados que pueden cambiar su polo norte y su polo sur constantemente, fluctúan. Se dice que los Pares de Cooper se forman por medio de las fluctuaciones de espín.

LA DANZA DE LOS *NATURE*

Nature y *Science* son dos revistas de alto nivel científico. En ellas se publican artículos que permiten al lector enterarse de cómo se va modulando el pensamiento científico en torno a un tema determinado. Ha sido muy interesante que en los últimos años, en la revista *Nature*, ha aparecido una serie de artículos que resulta casi respuesta de unos científicos a las propuestas de los otros y que quiero consignar aquí como la “danza de los *Nature*”, ya que muestra hasta qué punto hay ideas encontradas que se han defendido con arduo trabajo y realizando experimentos de alto costo, trabajo, aplicación y astucia.

La cantidad detallada de conocimiento adquirido acerca de los nuevos superconductores es enorme. Y, sin embargo, no ha sido suficiente para aclarar el mecanismo de los mismos, como acabo de mencionar. Es un diálogo apasionante y voy a describir las ideas presentadas en esos escritos de una manera que pretende ser muy clara y precisa pero sin usar tecnicismos. El diálogo, puesto muy esquemáticamente, se refiere a cuál es el mecanismo, es decir, a si los electrones que forman los Pares de Copper se mantienen ligados por un fonón o por las fluctuaciones de espín.

A continuación describiré la serie de trabajos que tipifica estas tendencias. Debo mencio-

nar que no son las únicas y que hay investigaciones que atribuyen el mecanismo a una situación física totalmente diferente. Pero este diálogo es el más conocido entre lo que se ha presentado hasta octubre de 2004.

EL DIÁLOGO

La pregunta base de este diálogo¹ es, ¿el mecanismo es fonónico o por fluctuaciones de espín? La idea base es que si son fluctuaciones de espín, su huella deberá estar en una función que se llama susceptibilidad magnética², $\chi_s(\omega)$. Esta función se mide haciendo experimentos de dispersión de neutrones polarizados. Esto es, se lanza un haz de neutrones polarizados (todos con su espín orientado en una misma dirección) contra una muestra de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, para ser concretos, y lo que se mide es cuantos neutrones salen con el espín cambiado así como la cantidad de energía y de momento que perdieron. Puede mostrarse que los neutrones interactúan sólo con algunos de los electrones que se encuentran dentro de este metal. Interactúan con los del plano de CuO_2 . El plano de CuO_2 es reconocido como el escenario principal de la superconductividad en estos materiales en el sentido de que los Pares de Cooper (los causantes de la superconductividad) se forman, primordialmente, sobre ese plano. Es posible que Pares de Cooper que se forman en las cadenas de CuO tengan una importancia no despreciable. Eso está en discusión todavía. Dónde están los planos y dónde las cadenas, se identifica en la figura 2.

EL EXPERIMENTO

El resultado de este experimento³ es muy famoso. En el estado superconductor, y sólo en el estado superconductor, se presenta una resonancia. Es decir un pico en la función que indica que el evento que se produce se presenta en muchas ocasiones. Es decir, que el hecho de que el neutrón choque con un electrón y pierda esa cantidad

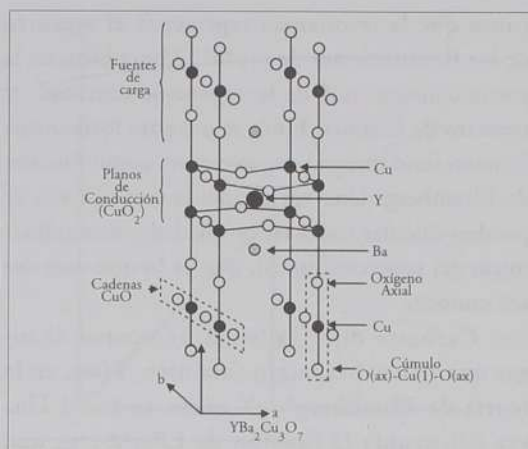


Figura 2. La estructura cristalina del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ se llama perovskita.

específica de energía, se produce muchas veces más que cualquier otro evento.

En el caso del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, la resonancia se produce cuando la energía transferida es de 38 meV. Recordemos que la huella de las fluctuaciones de espín debe estar en este resultado. La pregunta es: ¿Está diciendo este experimento, entonces, que los Pares de Cooper en los SATEC se producen por fluctuaciones de espín? El hecho de que la huella esté en esa función debe interpretarse como que la resonancia tiene la información clave acerca de si las fluctuaciones de espín generan los Pares de Cooper o no. ¿Pero cómo sacarla? Aquí comienza el diálogo.

CARBOTTE:

¿SON FLUCTUACIONES DE ESPÍN!

En efecto, este es el tema de la primera publicación⁴ en la revista *Nature* a la que quiero referirme. El trabajo fue realizado por J.P. Carbotte con algunos de sus colaboradores. Carbotte es uno de los más conocidos investigadores en superconductividad del mundo. Su argumento es: el hecho de que la "huella" de las fluctuaciones de espín esté en la resonancia de la susceptibilidad magnética, $\chi_s(\omega)$, debe interpretarse

como que la resonancia representa el espectro de las fluctuaciones de espín⁵. Ahora bien, en la teoría convencional de la superconductividad, el espectro de fonones, $F(\omega)$, se usa para formar una función fundamental que se conoce como función de Eliashberg. Una vez conocida esta función se pueden calcular todas las propiedades termodinámicas del superconductor, que es lo que uno desea conocer.

Carbotte dijo: " $\chi_s(\omega)$ debe ocupar el lugar que tiene el espectro fonónico, $F(\omega)$, en la teoría de Eliashberg". ¿Y cómo se hace? Una vez construida la función de Eliashberg, uno la coloca dentro de las Ecuaciones de Eliashberg y las resuelve numéricamente. Las Ecuaciones de Eliashberg son ecuaciones integro-diferenciales. Son dos y dependen de la temperatura. La primera sólo vale a $T=T_c$ (a la temperatura crítica) y la segunda, por debajo de T_c . De esta última salen los datos que permiten calcular las propiedades del material superconductor y los cambios con la temperatura de esas propiedades (la termodinámica).

Carbotte fue muy astuto y para evitar muchos problemas e incógnitas decidió tomar $\chi_s(\omega)$ directamente del experimento. También obvió todo tipo de problemas al utilizar la ecuación de Eliashberg válida a $T=T_c$. Realizó un cierto ajuste de parámetros de tal forma que obtuvo la temperatura crítica experimental correcta. Hasta ahí, uno no se siente muy impresionado. Todo parece un manejo hábil. Pero he aquí lo que siguió.

Armados con esta función de Eliashberg que, según ellos, describe los Pares de Cooper ligados por fluctuaciones de espín, Carbotte y colaboradores calcularon teóricamente el resultado de otro experimento importante que describe como se conduce la luz dentro de un material. Se trata de la conductividad óptica, $\sigma_{opt}(\omega)$. Resulta ser que esta función presenta, en el estado superconductor y sólo en el estado superconductor, también una resonancia en la misma energía: $\omega=38\text{meV}$. Carbotte obtuvo también este resultado

usando su función de Eliashberg. Un enorme triunfo, sin lugar a dudas.

¿Quiere esto decir que el mecanismo es por fluctuaciones de espín? La audacia de Carbotte es enorme. Pero hay que ver si se puede calcular toda la termodinámica, es decir, si se obtiene un resultado correcto al resolver la segunda ecuación de Eliashberg (a esto le llamo "realizar la Tarea de Eliashberg"). ¿Se puede?

Carbotte realizó algo muy importante. Resulta que es posible diseñar un proceso matemático que funciona para los superconductores convencionales (en los cuales los Pares de Cooper están ligados por fonones). Lo que este proceso hace es suministrar información muy precisa sobre la función de Eliashberg con base en un análisis de la conductividad óptica, $\sigma_{opt}(\omega)$. Se trata de operaciones de cálculo diferencial e integral que se aplican a la función $\sigma_{opt}(\omega)$, Carbotte aplicó el proceso a la conductividad óptica que acababa de calcular usando la función de Eliashberg que él mismo propuso y ¿qué obtuvo? ¡Nuevamente su propia función de Eliashberg!

Este hecho, sin lugar a dudas, cierra un proceso totalmente auto-consistente⁶ que da mucha fuerza a las opiniones que favorecen las fluctuaciones de espín como la clave del mecanismo de los nuevos superconductores. No es extraño que haya generado un enorme entusiasmo. Pero faltaba algo... ¿se puede realizar la "Tarea de Eliashberg" completa? Yo obtuve evidencia inmediata de que no, pero por ciertos detalles técnicos no pude demostrarlo. Eso me generó un enorme interés de seguir todos los detalles del desarrollo de esta investigación y me dio ideas para indagar por un camino propio. Corría el año 1999.

LANZARA: NO.
NO SON FLUCTUACIONES DE ESPÍN,
¡SON FONONES!

El siguiente artículo⁷ de esta serie apareció en *Nature* en el año 2001. Grupos de investigadores de las

universidades de Standford y Berkeley, en los Estados Unidos, y de la Universidad de Tokio, Japón, encontraron que los electrones, al pasar al estado superconductor, se acoplan a (interactúan con) un misterioso bosón⁸, de energía igual a 80 meV. Buscando, encontraron que ese bosón sólo puede ser un fonón. Los Pares de Cooper, concluyeron, están ligados por fonones y no por fluctuaciones de espín. ¿Cómo hicieron eso?

Debo decir, primero, que se puede hacer un experimento por una técnica que se llama «Espectroscopía de fotoemisión resuelta en ángulo» (Angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES, en inglés). Este experimento permite medir la energía y el momento de los electrones. Y fue midiendo la energía como se dieron cuenta que, en el estado superconductor, los electrones se acoplan a un “bosón” (un fonón u otro bosón) cuya energía era 80 meV. Con este dato buscaron y eliminaron todas las posibilidades hasta que concluyeron que tenía que ser un fonón. Este experimento fue realizado con varios superconductores de alta T_c (SATEC) con resultados totalmente análogos. ¿Cómo saben que se acopla? ¿Qué es lo que miden?

Ahí está la clave. Miden la energía del electrón. Cuando el electrón no se acopla (no da a la red o toma de la red la energía equivalente a un fonón) su masa tiene un cierto valor, digamos m . Pero al momento de acoplarse, sucede lo que se muestra en la figura 3. En ese caso su masa cambia de: m a m^* según la fórmula $m^* = m(1 + \lambda)$ donde λ es el parámetro que caracteriza lo intenso de la interacción (de la influencia que uno tiene sobre el movimiento del otro). Al momento de acoplarse, su energía, en consecuencia, pasa de su valor “libre”, digamos: $\epsilon = p^2/2m$ a su valor renormalizado (acoplado) $E = p^2/2m^* = p^2/2m(1 + \lambda) = \epsilon/(1 + \lambda)$ con el parámetro de acoplamiento λ positivo, mayor que cero, obtenemos una relación entre las dos energías: $E = \epsilon/(1 + \lambda)$.

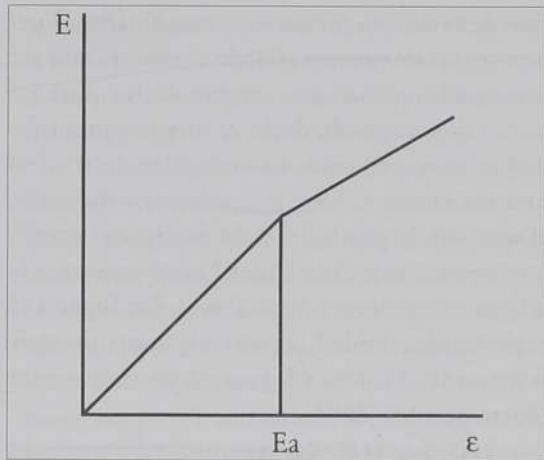


Figura 3. En general, $E = \epsilon/(1 + \lambda)$. λ es diferente de cero (positivo) cuando el electrón se acopla. E_a es la energía en la que se produce el acoplamiento.

Al dibujar una curva donde se anota E en el eje de las “yes” y ϵ en el eje de las “equis” se obtiene una línea recta a 45° mientras λ sea igual a cero (mientras no haya acoplamiento) ya que $E = \epsilon$, en ese caso. Cuando llegamos a la energía en que el acoplamiento sucede (a la energía del fonón que se acopla), deja de ser cero y entonces $E < \epsilon$ lo cual da como resultado que la curva se dobla hacia abajo. Esa especie de “rodilla” en la gráfica es el testimonio de que, a esa energía E_a , se acopló el electrón. Esto se observa en la figura 3.⁹

Una vez que los investigadores pudieron establecer esto, el siguiente paso fue buscar cuál de todos los posibles bosones se acoplaba. Después de una búsqueda detallada concluyeron que sólo podía ser un fonón. El mecanismo es, entonces, ¡por fonones! Este experimento ciertamente es impresionante y aporta un dato imposible de rehuir.

¿Pero en qué queda entonces lo que demostró Carbotte? Aquí alguien tiene que haber cometido una inconsistencia o un error. Pero... ¿cuál es? En efecto, esto parece una historia detectivesca. La pregunta siguiente sería,

¿puede existir un mecanismo combinado? ¿pueden ser las dos cosas? ¿Puede el mecanismo ser una combinación concurrente de los dos? Lo único que se puede decir es que la probabilidad es muy pequeña. La coincidencia tendría que ser enorme. Dos mecanismos diferentes, el uno con la posibilidad de destruir al otro¹⁰, que aparezcan y “se ayuden” exactamente a la misma temperatura crítica para dar lugar a la superconductividad, es una hipótesis no muy favorecida. La actitud general es: uno u otro (hasta octubre 2004).

Hay que recordar que nadie ha probado si Carbotte tiene o no razón. Habría que averiguar algo más en esa dirección. ¿Puede demostrarse que el resultado de Carbotte no es correcto de manera concluyente, siendo que hay dificultades técnicas para completar la Tarea de Eliashberg¹¹? Carbotte no contestó directamente a esta intrigante pregunta pero realizó un planteamiento que hizo tambalear las conclusiones del experimento de Lanzara. Veamos.

CARBOTTE:

EL EXPERIMENTO TIENE OTRA INTERPRETACIÓN ALTERNATIVA

En abril de 2003, apareció otro trabajo de Carbotte¹². No se publicó en la revista *Nature* pero es la continuación del diálogo que estoy refiriendo. En esencia, en un trabajo detallado y cuidadoso se concluye:

- 1) En efecto, el experimento de Lanzara, *et al.* puede explicarse con base en los fonones.
- 2) Esta no es, sin embargo, la única interpretación posible. El bosón que se acopla puede tener su origen también en las fluctuaciones de espín.
- 3) Cuando uno calcula con base en el mecanismo electrón-fonón la conductividad

óptica, $\sigma_{\text{opt}}(\omega)$, el comportamiento que se obtiene para frecuencias (ω) altas no es el que se obtiene experimentalmente.

- 4) Por el contrario, cuando uno supone que el bosón observado tiene su origen en las fluctuaciones de espín, el comportamiento que se obtiene para la conductividad óptica $\sigma_{\text{opt}}(\omega)$, tiene la misma tendencia que el resultado experimental.

Por lo tanto, lo más probable es que las fluctuaciones de espín expliquen el mecanismo de los superconductores de alta T_c , a pesar de todo. El trabajo de Carbotte reabre el problema original así como la pregunta, ¿es la resonancia en la susceptibilidad magnética, $\chi_s(\omega)$, en el estado superconductor el espectro de las fluctuaciones de espín que es causa de la superconductividad? ¿qué confusión! ¿cómo avanzar? ¿qué debe hacerse ahora para dar el siguiente paso?

TIMUSK:

LA RESONANCIA ES UN EFECTO, NO LA CAUSA

Tom Timusk es un investigador experimental retirado de la Universidad de Mc Master en la ciudad de Hamilton, Ontario, Canadá, al igual que Jules Pierre Carbotte (teórico). Pero ambos siguen muy activos en su investigación. El gobierno ha entendido que tiene dos excelentes investigadores en ellos y les ha aprobado presupuestos cuantiosos para que puedan continuar su trabajo. En parte por este nivel de compromiso del gobierno, la contribución canadiense al problema, en estos últimos años, ha sido tan sobresaliente.

¿Qué hay que probar?, se preguntó Timusk y comenzó una serie de experimentos de infrarrojo con miras a ver si era posible o no la superconductividad sin la resonancia en la susceptibilidad magnética (desaparecida la causa, desaparecido el efecto, pensó). Con experimentos de infrarrojo se mide la conductividad óptica, $\sigma_{\text{opt}}(\omega)$,

donde aparece, a la misma energía, que en la susceptibilidad magnética una resonancia. Timusk¹³, entonces, se dispuso a medir la conductividad óptica de una serie de muestras de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$ (conocido como Bi-2212) con diferente grado de impurificación. Esto es, produciéndolas con más o menos oxígeno, o lo que es lo mismo variando el valor de δ .

¿Cuál es la idea? Aquí falta un dato. Este dato es que cuando la muestra se crece con diferente contenido de oxígeno, la temperatura crítica empieza a bajar y la resonancia comienza a disminuir, es decir, el evento de que hablabamos antes se produce cada vez menos. ¿Y qué quería hacer Timusk? Pues ver si la resonancia desaparece al mismo tiempo que la superconductividad. Si ése es el espectro de las fluctuaciones de espín (como muchos parecen creer) y si las fluctuaciones de espín producen la superconductividad, entonces, al desaparecer ésta (la resonancia) tiene que desaparecer la superconductividad.

¿Y cómo armó el experimento, entonces? Produjo muchas muestras de Bi-2212 con diferente grado de contenido de oxígeno. Les midió la conductividad óptica haciendo experimentos de infrarrojo, en lo cual es especialista a nivel mundial. Observó que la resonancia disminuía. Llevó las cosas hasta hacer desaparecer totalmente la resonancia. Y ahí, hizo este trascendental descubrimiento: había producido una muestra con una temperatura crítica muy alta $T_c = 55\text{K}$, ¡con un grado de impurezas tal que la resonancia había desaparecido!

Este resultado es uno de los más importantes de los últimos años y cierra la búsqueda por el lado del uso de la susceptibilidad magnética como el espectro de las fluctuaciones de espín que produce la superconductividad. Demuestra que la superconductividad es la causa de que se produzca la resonancia tanto en la conductividad óptica como en la susceptibilidad magnética y no al revés. Pero, estrictamente, no demuestra nada más. Simplemente, no

se puede armar la función de Eliashberg como la armó Carbotte. Debe haber algo más profundo. Y entonces, ¿en qué quedamos? ¿qué pasó, son fluctuaciones de espín o son fonones?

Este resultado podría cerrar un poco la gama de preguntas que uno puede hacerse. La respuesta final, obviamente, aún no está clara. Se pudo demostrar que la resonancia no explica la superconductividad. Entonces surge la pregunta inversa: ¿cómo explica la superconductividad la existencia de la resonancia? La respuesta a esa pregunta puede ser, en efecto, ilustrativa. Pero la polémica sobre este experimento no ha cesado.

BAQUERO:

LOS DETALLES DE LOS ESTADOS ELECTRÓNICOS, ¿APORTAN ALGO?

Para terminar, relataré lo último que he podido averiguar (octubre 2004). Es trabajo de mi grupo, realizado durante varios años¹⁴.

Hay que recordar dos cosas: una es que el hecho de que si bien la resonancia en las funciones mencionadas no ha resultado una base sólida para construir la función de Eliashberg que describe la superconductividad por fluctuaciones de espín, esto no cierra el problema. La susceptibilidad magnética tiene, además de la resonancia (que se presenta como un pico), un fondo sin mayores detalles. Varios investigadores se han preguntado si la clave no estará allí¹⁵. Nadie lo sabe, obviamente. Entonces, debemos cuidarnos de concluir, precipitadamente, que las fluctuaciones de espín no son el mecanismo. Eso aún no está probado.

Lo segundo que hay que recordar es que Carbotte encontró que el comportamiento de la conductividad óptica, en el lado de las frecuencias grandes (mucho energía transferida en la interacción) no reproducía lo que indica el experimento cuando se hace el cálculo partiendo como base de que el mecanismo es fonónico. Esto debe ser contestado cumplidamente.

Las teorías armadas hasta ahora estudian sólo el plano de CuO_2 en forma separada del

resto del cristal. La primera cosa que se me ocurrió fue buscar si esta simplificación no podría tener algún efecto que se manifestara en estos problemas. Entonces lo primero que hice fue calcular la estructura electrónica de bandas por un método sofisticado (de primeros principios) y extraer de allí la información de cómo se comportan los electrones en el plano de CuO_2 . Esto requiere referirse a un material concreto. Estudié el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Para averiguar si esto podría tener alguna importancia me planteé la pregunta, "¿puede la superconductividad explicar la resonancia?", de la forma siguiente. ¿Puedo, utilizando la estructura real electrónica de bandas y una forma sencilla de describir la superconductividad, reproducir la resonancia?

Tomé en cuenta, en su forma más sencilla, los efectos que la transición superconductora tiene sobre la estructura electrónica de bandas (en qué energías existen los electrones). Caractericé la superconductividad con un solo parámetro. Y así, calculé las funciones mencionadas con fórmulas conocidas sacadas de los libros de texto o de artículos publicados en la literatura. Nada original en esta dirección. Y obtuve los siguientes resultados:

- 1) La resonancia en la susceptibilidad magnética se reproduce tal y como sale en el experimento no sólo en el estado normal sino también en el estado superconductor.
- 2) Con base en la misma estructura electrónica de bandas y el parámetro que describe la superconductividad, reproduzco el resultado experimental para la conductividad óptica tanto en el estado normal como en el estado superconductor.
- 3) Mi resultado para la conductividad óptica sí se comporta, para altas frecuencias, tal y como se predice en el experimento.
- 4) No supongo explícitamente ningún mecanismo.

Este resultado da base teórica al experimento de Timusk ya que confirma que la superconductividad sí es la causa de la resonancia. También muestra que si se toma en cuenta la estructura electrónica real, desaparecen ciertos problemas como el hecho de que no se reproduzca el comportamiento de la conductividad óptica a alta frecuencia.

Pero a la pregunta, ¿son fonones o no? No puedo aún dar respuesta clara y contundente. Sin embargo, debo confesar que todo lo que he leído y todo lo que he trabajado me inclina a creerlo. Creo que son fonones en contra de la mayoría de mis colegas en el mundo en este momento. Y lo confieso, el estar en contra de tanta gente célebre le pone más emoción a mi trabajo. Pero creer no prueba nada.

¿Son fonones?, ¿Son fluctuaciones de espín? Nadie lo puede asegurar todavía.

OCTUBRE DE 2004

NOTAS

¹ Se trata de trabajos de investigación muy especializados que no son de lectura accesible al lector no-especialista. Sin embargo, habiendo hecho esta advertencia, voy a consignar las referencias correspondientes, en el sitio adecuado, por si le son útiles a algún lector interesado.

² Más exactamente en la parte imaginaria de esta función. Pero aquí haremos caso omiso de esos detalles técnicos.

³ Una referencia muy completa sobre el tema puede bajarse de un archivo donde aparecen muchos trabajos de investigación antes incluso de ser publicados: www.arXiv:cond-mat/9901333. El autor es Phillippe Bourges y el nivel es de investigación.

⁴ Carbotte, J.P. et al., 1999, "Coupling strength of charge carriers to spin fluctuations in high-temperature superconductors", Carbotte J.P. et al., *Nature* 401, 354-356. Es muy especializada pero se lee con mucha facilidad.

⁵ Las fluctuaciones de espín (como los fonones) pueden tener diferentes energías. Se cuenta las diferentes formas (estados) que corresponden a una misma energía. Este dato se da para diferentes energías. Los diferentes datos se juntan en una función y a esta función se le llama espectro.

⁶ Propuso una función de Eliashberg. Usó la teoría para calcular la conductividad óptica. Y luego aplicó un análisis independiente para obtener información sobre la función de Eliashberg del problema con base en el conocimiento de la conductividad óptica. Y lo que obtuvo fue su propia función de Eliashberg. El proceso es, entonces, totalmente auto-consistente.

⁷ Lanzara, A., et al., 2001, "Evidence for ubiquitous strong electron-phonon coupling in high-temperature superconductors", *Nature* 412, 510-514.

⁸ Un bosón es una partícula o un quantum (cantidad fija) de energía cuyo espín es entero (0, 1, 2, 3,...). El fonón y el quantum de fluctuaciones de espín tienen espín cero.

⁹ La aparición de un cambio súbito en la pendiente de esta curva revela que el electrón se acopló a un bosón de la energía donde aparece la discontinuidad. Este resultado se obtuvo de un experimento de fotoemisión

resuelta en ángulo para el material superconductor de alta T_c (SATEC) conocido como Bi-2212. Los resultados dados por los autores del trabajo están presentados en una forma diferente. La que presento aquí es equivalente. Me pareció más apropiado para este artículo por ser más fácil de ver e interpretar.

¹⁰ Puede mostrarse que las Fluctuaciones de Espín destruyen los Pares de Cooper formados por fonones. Existe, sin embargo, una formulación que muestra que los dos mecanismos puede colaborar.

¹¹ Aquí se trata de resolver la segunda Ecuación de Eliashberg para $T < T_c$ incluyendo unos detalles muy técnicos que nadie parece haber resuelto satisfactoriamente aún. Las cosas, sin embargo, continúan de una manera sorpresiva.

¹² ARPES and optical renormalization: phonons or spin fluctuations?, E. Schachinger, J.J. Tu, and J.P. Carbotte, arXiv:cond-matt/0304029.

¹³ Hwang, J., T. Timusk y G.D. Gu, 2004, "High-transition temperature superconductivity in the absence of the magnetic resonance mode", *Nature* 427, 714-717.

¹⁴ Rubio Ponce, Alberto, "Escenarios activos en los materiales superconductores 1-2-3", tesis doctoral, CINVESTAV, 1999, y Puch Felipe, "Hacia el mecanismo de los nuevos superconductores: la importancia de la tridimensionalidad", tesis doctoral, CINVESTAV, 2003.

¹⁵ Hwang, Timusk y Gu formulan esta idea en el trabajo ya citado y Norman la destaca, en forma particular, en un pequeño comentario que aparece en el mismo número de la revista *Nature*.

APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA DE LENTE TÉRMICO EN EL ESTUDIO DE MATERIALES SEMITRANSSPARENTES

JOSÉ M. YÁÑEZ
RODRIGO MAYEN
OSCAR GÓMEZ
OMAR MARTÍNEZ
RIVELINO FLORES

INTRODUCCIÓN

LA FAMILIA DE TÉCNICAS FOTOTÉRMICAS, ENTRE LAS CUALES SE INCLUYEN LA espectroscopía fotoacústica, fotopiroeléctrica, efecto mirage, radiometría y la espectroscopía de lente térmico, utiliza una fuente luminosa de excitación sobre el sistema a estudiar. La absorción de esta radiación, conversión de la fracción absorbida en calor, difusión de este calor hacia los alrededores, la perturbación del medio circundante y la elección de la detección de la señal generada determina el tipo de espectroscopía utilizada. En la figura 1 se muestra el proceso de generación de la señal fototérmica^{1,2,3}. Dado que esta señal depende del coeficiente de absorción, de los procesos de relajación no radiativos y de la razón de transferencia del calor generado hacia los alrededores, todas estas técnicas permiten realizar estudios de espectroscopía y la determinación de los parámetros térmicos involucrados, como difusividad térmica, efusividad térmica, conductividad térmica y capacidad calorífica. Dentro de esta familia de técnicas fototérmicas, la espectroscopía de lente térmico (ELT) ha tenido un alto desarrollo durante las últimas dos décadas, debido a la versatilidad de aplicaciones en el estudio de propiedades termo-ópticas de diversos materiales, tanto en la determinación de propiedades ópticas y térmicas como una herramienta analítica en alimentos y ciencias ambientales^{4,5,6}.

En la figura 2 se observa de manera esquemática el efecto de lente térmico. La radiación proveniente de un láser de potencia adecuada se focaliza sobre una región de la muestra analizada, la cual debe ser semitransparente a esta radiación. La distribución de energía del láser incidente en general tiene una forma gaussiana respecto a la dirección radial. La parte de energía absorbida da lugar a una distribución de temperatura con el mismo perfil gaussiano del láser incidente, de tal forma que este gradiente de temperatura establecido en el material analizado da

El Dr. José Martín Yáñez es investigador del CINVESTAV 3A y coordinador general de laboratorios del CINVESTAV, Unidad Querétaro. Su correo electrónico es: jmyanez@qro.cinvestav.mx

Los maestros Rodrigo Mayen y Oscar Gómez son estudiantes de doctorado en el programa de Ciencias e Ingeniería de Materiales de la Unidad Querétaro. Su correo electrónico es: rmayen@hotmail.com y oguzman@qro.cinvestav.mx

Omar Martínez es estudiante de maestría y doctorado en el programa de Ciencias e Ingeniería de Materiales, Unidad Querétaro.

Rivelino Flores es auxiliar de investigación en la Unidad Querétaro. Su correo electrónico es: rflores@qro.cinvestav.mx

cabida a un gradiente en el índice de refracción, dando paso a un efecto transiente de difracción de la radiación incidente, el cual se puede detectar con suficiente sensibilidad analizando los cambios de intensidad del centro del haz en el campo lejano. Este efecto puede dar lugar a un incremento en la intensidad en el centro del haz (efecto positivo ds/dT , donde ds/dT es el coeficiente de temperatura del camino óptico) o a una disminución de la intensidad (ds/dT efecto negativo) dependiendo de las propiedades del material analizado.

El efecto de lente térmico fue descubierto en los laboratorios Bell en 1964 por Gordon y colaboradores entre los cuales se encontraban los brasileños R.C. Leite y S. Porto^{1,7,8}. En sus etapas iniciales se realizaban los experimentos dentro de las cavidades de los láseres. Posteriormente se implementaron diseños experimentales fuera de la cavidad con un solo láser y después se desarrollaron los sistemas duales, en los que se utilizan dos láseres, uno de excitación de mayor potencia y otro de mucha menor potencia como láser de prueba. Este último arreglo ha mostrado mayor sensibilidad en el estudio de diversos materiales. En los trabajos de R. D. Snook y colaboradores se presenta la teoría del efecto transiente de lente térmico en el modo desempalmado (radios diferentes en la muestra de los láseres de excitación y de prueba), la cual permite obtener una expresión analítica de la intensidad del haz de prueba en el campo lejano en función del tiempo. Esta expresión involucra una dependencia de parámetros experimentales y dos parámetros de ajuste que dependen de la difusividad térmica y del factor de aumento del coeficiente de absorción óptica. La teoría primero estima la distribución de temperatura dentro del material debido a la absorción del haz de excitación con una distribución gaussiana de la intensidad. Posteriormente se calcula la intensidad del haz de prueba que atraviesa esta región utilizando la teoría de difracción en campo lejano⁷⁻¹⁰.

Entre los parámetros que se determinan directamente con esta configuración están la difusividad térmica a , y el factor de aumento del coeficiente de absorción óptica $Q = -(Pbl/kl_p)ds/dT$, donde P es la potencia del láser de excitación, bl es la densidad óptica de la muestra analizada, k es su conductividad térmica, l_p es la longitud de onda del láser de excitación y ds/dT es el coeficiente de temperatura del camino óptico. La dependencia de Q respecto de parámetros termo-ópticos permite obtener una alta sensibilidad, con lo cual se han reportado mediciones de absorbancia del orden de 10^{-7} - 10^{-8} . Por otra parte, comparada con la técnica convencional de transmisión, la ELT es menos susceptible a errores debidos a la dispersión de la luz presente en los sistemas ambientales y en muchos sistemas en el área de alimentos^{4,5}.

Actualmente se han realizado progresos importantes en la construcción de espectrómetros de LT que operan en el infrarrojo y espectrómetros que permiten realizar estudios en dimensiones microscópicas, pudiendo obtener imágenes con resolución lateral submicroscópicas de la difusividad térmica y absorbancia, los cuales se han aplicado ampliamente en el campo de la geología, botánica e histología⁵. La generalización de esta metodología será muy útil en toda el área de la ciencia de materiales, ya que los requisitos para poder ser estudiados mediante la ELT es que sean semitransparentes a la radiación utilizada y, en el caso de la radiación visible, de manera natural se incluyen materiales vítreos, polímeros y líquidos.

ALGUNOS RESULTADOS DE SISTEMAS ESTUDIADOS MEDIANTE ELT EN EL CINVESTAV-UNIDAD QUERÉTARO

En el CINVESTAV-Querétaro, se cuenta con una serie de montajes fototérmicos, entre los cuales se encuentra un sistema de ELT dual en modo desempalmado con el cual se han realizado estudios de diversos sistemas de interés tecnológico y básico en cuanto a sus propiedades termo-ópti-

cas, como son: aceites comestibles, cristales líquidos de tipo termotrópico y monolitos de SiO_2 obtenidos mediante el proceso Sol-Gel con incorporación de metales de transición y colorantes orgánicos¹¹⁻¹³.

ACEITES COMESTIBLES

En los aceites comestibles es de mucho interés determinar la concentración relativa de los diferentes ácidos carboxílicos y de los ácidos saturados e insaturados. Las técnicas analíticas más utilizadas para estos propósitos están basadas en las espectroscopías de infrarrojo, en la región media (IR) y en el cercano infrarrojo (NIR) o cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Estos sistemas por ser líquidos y semitransparentes en la región visible son muy apropiados para estudiarse mediante la espectroscopía de lente térmico. Los resultados de difusividad térmica obtenidos en seis aceites comestibles analizados se presentan en la tabla I, en la cual se puede observar que si bien las variaciones de difusividad térmica no son muy grandes entre los diferentes aceites, se pueden encontrar variaciones hasta en un factor dos de estos valores como son el caso del aceite de canola y de maíz.

En la figura 3 se presenta el comportamiento del factor de aumento del coeficiente de absorción, normalizado a la potencia de excitación en los aceites estudiados, este parámetro se determina directamente del análisis transiente del efecto de lente térmico (en la gráfica se puede observar una clara diferenciación entre los aceites analizados, como una consecuencia de las diferencias intrínsecas de sus propiedades termo-ópticas).

CRISTALES LÍQUIDOS

Dentro de los cristales líquidos, en particular los colestéricos son utilizados frecuentemente en pantallas electro-ópticas así como en aplicaciones termográficas¹⁴ gracias a la propiedad que suelen

Tabla 1

Aceites	Difusividad térmica (cm^2/seg) $\times 10^{-4}$
Canola	4.4 ± 0.3
Soya	5.0 ± 0.4
Cacahuete	5.1 ± 0.4
Girasol	5.7 ± 0.5
Oliva	5.8 ± 0.5
Maíz	8.0 ± 0.6

Tabla I. Valores de difusividad térmica en diferentes aceites comestibles.

presentar en la mesofase colestérica de reflejar selectivamente la luz en el rango del visible, generándose así una variación de su color en función de la temperatura, como el nonanoato de colestero y el carbonato de colestero y oleilo cuyas estructuras se muestran en la figura 4.

Ambas estructuras cumplen con las reglas generales de formación de fases líquido cristalinas, esto es, tienen una forma alargada, una región central rígida (en este caso la constituida por los anillos) y un par de extremos largos y flexibles (las cadenas laterales)¹⁵. La forma de estas moléculas y el centro rígido favorecen el establecimiento de fuerzas de atracción intermoleculares relativamente grandes cuando las moléculas se acomodan paralelamente entre sí. Los extremos flexibles permiten que cada molécula se posicione entre las demás con mayor facilidad a medida que se mueven caóticamente¹⁵.

El estudio de las propiedades térmicas de los cristales líquidos colestéricos es uno de los factores importantes para determinar la factibilidad de aplicación de dichos compuestos como sensores térmicos. Por otra parte, la mezcla de estos cristales líquidos permite variar el rango de temperatura de aparición de las diferentes mesofases presentes en estos cristales líquidos, en las cuales tanto sus propiedades ópticas como térmicas reflejan de manera

Tabla II

Muestra	Difusividad térmica $\alpha \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-3}$
Monolitos Sol-Gel	
0.15% Mn p/p	2.66 ± 0.03
0.60% Mn p/p	2.43 ± 0.01
0.04% Cr p/p	4.57 ± 0.01
0.12% Cr p/p	2.35 ± 0.02
0.435% V p/p	6.51 ± 0.06
0.60% Mo p/p	1.07 ± 0.01
Cristales líquidos A 70°C	
$\alpha \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-3}$	
Nonanoato de colestero (NCO)	5.0 ± 0.1
Carbonato de colestero (CCO)	1.2 ± 0.1
Mezcla 30%CCO-70%NCO	2.3 ± 0.01

Tabla II. Valores de difusividad térmica obtenidos en los monolitos de SiO_2 y cristales líquidos.

clara las diferencias de los arreglos moleculares a largo alcance en las diferentes mesofases, mostrando cambios abruptos en la difusividad térmica y factor de aumento del coeficiente de absorción en las regiones de transición al variar la temperatura. En la tabla II se muestran los valores típicos encontrados en estos dos cristales líquidos a 70°C y en una mezcla de ellos¹².

MONOLITOS SOL-GEL CON INCORPORACIÓN DE METALES

Otro sistema que se ha estudiado en nuestro grupo en la Unidad Querétaro son monolitos de SiO_2 obtenidos mediante la técnica Sol-Gel con incorporación de metales de transición. Para obtener estos monolitos libres de fractura se utilizan las concentraciones de partida de los precursores recomendadas en la literatura de acuerdo al diagrama de fases para la síntesis de monolitos que, en nuestro caso particular, es: TEOS: Etanol:agua destilada, en la relación molar 1:4:16.

Una vez obtenido el aerogel (red sólida de SiO_2 con agua y sustancias volátiles disueltas) se utiliza una rampa de secado controlada y gradual entre 50 y 120°C para obtener los xerogeles, que son monolitos de SiO_2 con alta porosidad. Los

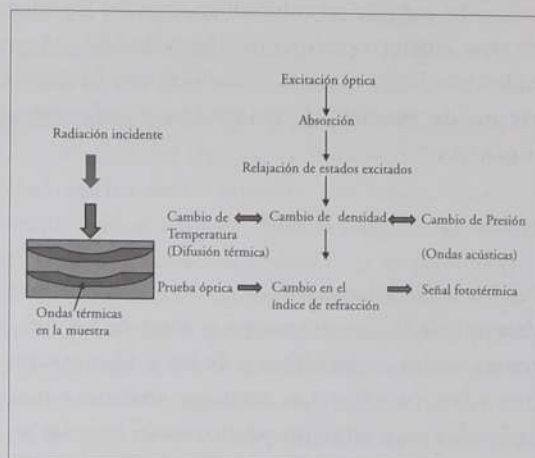


Figura 1. Procesos termo-ópticos involucrados en la generación de la señal fototérmica.

metales de transición se incorporan en la solución de partida vía sales, como nitratos, cloruros u óxidos, los metales que se han introducido son Mn, Cr, Va, Mo, Ag, Cu y colorantes orgánicos. En la tabla II se muestran los valores de difusividad térmica obtenidos mediante ELT en estos sistemas^{11,13}. En la parte superior de la figura 5 se observa el tipo de monolitos obtenidos.

Una de las propiedades relevantes de estos sistemas, derivadas de los estudios realizados en la Unidad Querétaro, es la capacidad de grabación óptica, que consiste básicamente en inducir de manera local y permanente un contraste en la transmisión de luz, la cual se induce y se monitorea con el mismo arreglo experimental del sistema de espectroscopia de lente térmico.

Mediante el láser de excitación focalizado en un área de alrededor de 40 mm, con potencias superiores a 1 mW y tiempos de exposición que pueden ser algunos minutos para potencias bajas y de algunas decenas de segundos para potencias superiores a 6 mW, se realiza un procesamiento local del material provocando aumentos localizados de temperatura superiores a los 500°C, lo cual da lugar a la inducción local y permanente de un gradiente en el índice de refracción después de retirar el haz de excitación, este efecto se monitorea

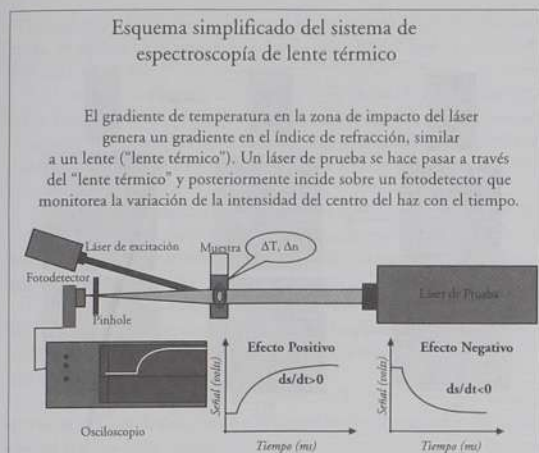


Figura 2. Esquema simplificado del sistema de espectroscopía de lente térmico y curvas transientes representativas de un efecto positivo y negativo de lente térmico.

y cuantifica con ayuda del haz de prueba de una potencia mucho menor, el cual sufre un proceso de difracción muy pronunciado dando lugar a cambios abruptos en la transmisión de la radiación entre zonas procesadas y las zonas normales del monolito de SiO_2 ^{11,13}.

En la figura 5 se ilustra el proceso de grabación óptica. La secuencia (a) muestra la transmisión normal del haz de prueba (láser de He-Ne 632.8 nm) y el voltaje de lectura del centro del haz en el campo lejano medido por un fotodiodo. En la secuencia (b) se muestra la incidencia del haz de excitación en la misma región (láser de Ar 488 nm) dando lugar a un efecto de lente térmico negativo muy pronunciado que se observa como un oscurecimiento de la zona central del haz de prueba en el campo lejano y el voltaje medido por el fotodetector prácticamente va a cero. Finalmente en la secuencia (c) se retira el láser de excitación y el láser de prueba nos permite observar anillos de difracción debidos a un gradiente permanente del índice de refracción inducido por el láser de excitación que, como resultado, produce una disminución apreciable en la transmisión del haz de prueba.

Cabe mencionar que con una óptica apropiada, las dimensiones del haz de excitación se pueden reducir a tamaños micrométricos, y con la focalización

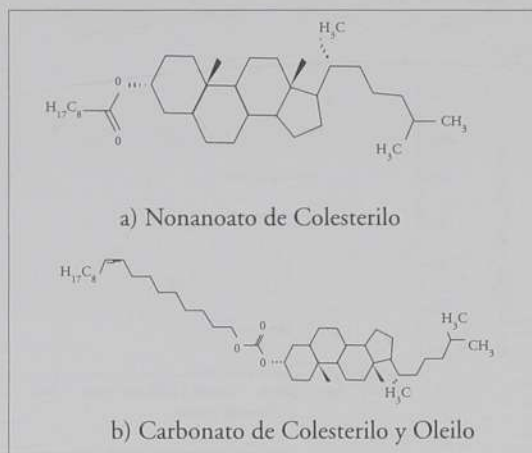


Figura 3. Comportamiento en diferentes aceites comestibles del factor de aumento del coeficiente de absorción óptico normalizado a la potencia de excitación.

controlada se pueden realizar los procesamientos en el material en diferentes planos. Esto, aunado a un sistema de lectura basado en métodos de interferometría, en principio se tiene un sistema con una alta capacidad para la grabación de información similar a un sistema DVD con una configuración de multicapas¹⁶.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Como se ha mostrado brevemente en este reporte, la espectroscopía de lente térmica es una técnica que ha encontrado muchas aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia de materiales, así como en sistemas ambientales y alimentos. Con esta técnica se pueden realizar determinaciones directas de la difusividad térmica y del factor de aumento del coeficiente de absorción óptico. Esta última propiedad es la que se ha explotado para hacer de la ELT una herramienta analítica de alta sensibilidad que combinada con técnicas de alta selectividad como HPLC y cromatografía iónica, han hecho que estas metodologías se hayan validado por intercomparación con muestras de referencia y métodos de análisis standard⁵.

Por otra parte la ELT es una técnica cuya instrumentación y rango de aplicabilidad seguirá desarrollándose en los próximos años. De gran interés

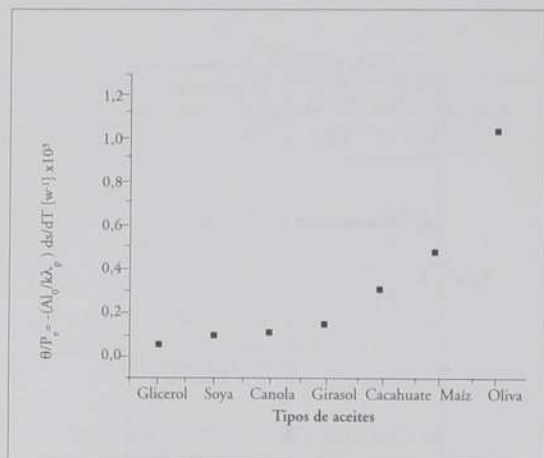


Figura 4. Estructura molecular del Nonanoato de colestero y del Carbonato de Colestero y Oleilo.

en la rama analítica es la utilización de fuentes de radiación en el mediano y cercano infrarrojo, así como fuentes sintonizables en un rango amplio de longitudes de onda, que permitan una reducción apreciable en el costo y tamaño del montaje experimental, así como su combinación con otras técnicas de evaluación como la espectroscopía de difracción circular, entre otras⁴. Otro aspecto relevante de esta técnica no destructiva y sin contacto con la muestra es la implementación de un sistema de control de temperatura que permita realizar los estudios y determinación de los parámetros termo-ópticos en función de la temperatura, lo cual proporciona información complementaria a la obtenida mediante calorimetría diferencial de barrido.

Finalmente hacemos notar que dentro de los sistemas estudiados en el CINVESTAV-Querétaro, además de la determinación directa de los parámetros termo-ópticos, el sistema de ELT cuenta con una serie de aditamentos para mediciones en función de la temperatura y el uso de esta técnica como una herramienta analítica así como su implementación en la determinación de la eficiencia cuántica de la fluorescencia, son temas a incursionar en un futuro inmediato.

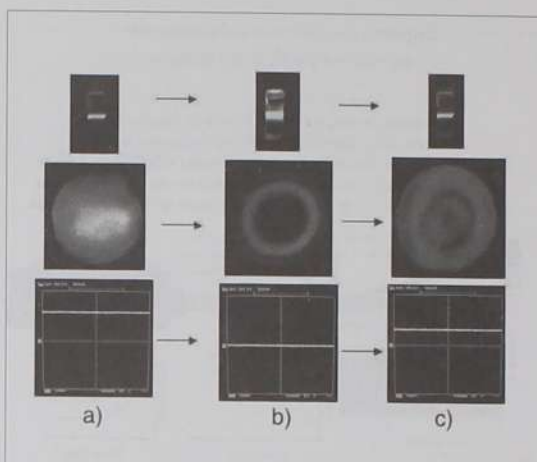


Figura 5. Secuencia del proceso de inducción del efecto de memoria óptica en los monolitos de SiO₂ obtenidos mediante el proceso Sol-Gel.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Eleazar Urbina, por su ayuda en la automatización del sistema de espectroscopía de lente térmica y la realización de algunas mediciones. Al Conacyt por el apoyo a través del proyecto 28285U.

NOTAS

¹Bialkowski Stephen, E., 1996, *Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis*, John Wiley & Sons, Inc.

²Mandelis, A., 1987, *Photoacoustic and thermal wave phenomena in semiconductors*, North-Holland, New York.

³Rosencwaig, A., 1990, *Photoacoustic and Photoacoustic spectroscopy*, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar Florida.

⁴Franco, M. y C. D. Tran, 1996, "Analytical thermal lens instrumentation", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 67, pp1-18.

⁵Franco, M., 2001, "Recent applications of thermal lens spectrometry in food analysis and environmental research", *Talanta*, vol. 54, pp. 1-13.

⁶Lima, S.M., Sampaio, J. A., Catunda, T., Bento, A.C., Miranda, L. C. M., Baesso, M. L., 2000, *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 273, pp.215-217.

⁷Shen, J., Baesso, M. L. y Snook, R. D., 1994, "Three-dimensional model for cw laser-induced mode mismatched dual beam thermal lens spectrometry and time resolved measurements of thin film samples", *J. Appl. Phys.*, vol. 75, pp.3738-3747.

⁸Baesso, M. L., Shen, J. y Snook, R. D., 1994, "Mode-mismatched thermal lens determination of temperature coefficient of optical path length in soda lime glass at different wavelengths", *J. Appl. Phys.*, vol. 75, Núm. 8, pp. 3732-3737.

⁹Shen, J., D. Lowe Roger y D. Snook Richard, 1992, "A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry", *Chemical Physics*, vol. 165, pp. 385-396.

¹⁰Colcombe Simon M., D. Lowe Roger y D. Snook Richard, 1997,

"Thermal lens investigation of the temperature dependence of the refractive index of aqueous electrolyte solutions", *Analytica Chimica Acta*, vol. 356, pp. 277-288.

¹¹Martínez-Flores, J. O., Yáñez-Limón, J. M., Espinoza-Beltrán, F. J. y González-Hernández, J., 2003, "Use of thermal lens spectroscopy to measure the thermal diffusivity, during the gelation process, of sol-gel materials added with Mn", *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, núm. 1, pp. 814-817.

¹²Mayén-Mondragón, R. y J. M. Yáñez-Limón, 2004, "Determination of Phase Transition Temperatures in Thermotropic Liquid Crystals by Modulated Optical Transmission and Thermal Lens Spectroscopy", *Journal of Physique IV*, Aceptado.

¹³Gómez-Guzmán, O., Díaz-Flores, Laura L. y Yáñez-Limón, J. M., 2004, "Preparation and characterization by thermal lens spectroscopy of SiO₂ monoliths having optical memory properties due to the incorporation of Mn and Cr", *Journal of Physique IV*, Aceptado.

¹⁴Manohar, R., Gupta, M., Shukla, J. P., 2000, "Phase transition studies of some cholesteric liquid crystals and their mixtures using dielectric, optical transmittance and density measurement techniques" *Journal of Physics Chemistry of Solids*, vol. 61, pp. 1465-1473.

¹⁵Collings Peter, J., 1990, *Liquid Crystals: Nature's Delicate Phase of Matter*, Adam Hilger, Princeton, New Jersey.

¹⁶Reyes-Esqueda, Jorge Alejandro, Vabre Laurent, Lecaque Romain, Ramaz Francois, C., Forger Benoit, Dubois Arnaud, Briat Bernard, Boccara Claude, Roger Gisele, Canva Michael, Levy Yvez, Chaput Frederic, Boilot Jean-Pierre, 2003, "Optical 3D-storage in sol-gel materials with a reading by optical coherence tomography-technique", *Optics Communications*, vol. 220, pp. 59-66.







EL PLACER DE UN “¿POR QUÉ ...?”

JESÚS GUILLERMO CONTRERAS
NUÑO

“¿POR QUÉ ...?” ES UNA FRASE QUE ASOCIAMOS CON LA CURIOSIDAD TÍPICA DE un niño. Por ejemplo, una canción infantil mexicana dice “... dime abuelita, di por qué eres viejita”. De niño recuerdo haberme preguntado por qué brillan las estrellas o por qué vuelan los pájaros. Cuenta la historia que cuando niño, Albert Einstein recibió una brújula de sus padres y quedó prendado de este maravilloso juguete preguntándose por qué, sin importar como la movamos, la aguja regresa a apuntar siempre en la misma dirección. Desafortunadamente al crecer perdemos poco a poco parte de esa curiosidad sin fronteras, de esa capacidad de sorprendernos y maravillarnos por algo que no comprendemos, de esa costumbre de alegrarnos cuando encontramos una respuesta satisfactoria a nuestras preguntas. Sin embargo, nunca perdemos del todo nuestro instinto de preguntar “¿por qué ...?” Es precisamente esta característica, el gusto innato de saber, por el placer de saber, por la cual nuestra especie se ha autodenominado *Homo Sapiens*. Existe un conjunto de profesiones donde la habilidad de preguntar “¿por qué ...?” no sólo no se pierde, sino que se incrementa. Donde continuamente se buscan distintas maneras de preguntarse la razón de las cosas, nuevas formas de manifestar nuestra ignorancia con la esperanza de que ésta lleve en sí la semilla de un entendimiento más profundo del mundo que nos rodea. Me refiero a la actividad científica, la cual abarca a la física, la medicina, las matemáticas, la biología, la lingüística, en fin todas las ramas del saber humano.

Actualmente existe una brecha incomprensible entre los que se dedican al quehacer científico y el resto de la sociedad. Esta brecha se ha formado y es responsabilidad de ambos bandos. Por un lado la mayoría de los científicos nos encerramos en nuestro trabajo y lo aislamos del mundo aduciendo falta de tiempo para hacer nuestras investigaciones y además divulgarlas. Por otro lado, desde la infancia, incluso en la escuela, se intenta convencer a la gente de que la ciencia no es interesante, que es difícil y aburrida.

Nada más lejano a la realidad decir lo anterior y que no vale la pena el esfuerzo de acercarse a ella. Cuando la miramos con esos ojos de niño curioso la ciencia es extraordinariamente divertida para todos: el que la

hace, el que la divulga y el que desde afuera se deleita con ese mundo de ideas maravillosas.

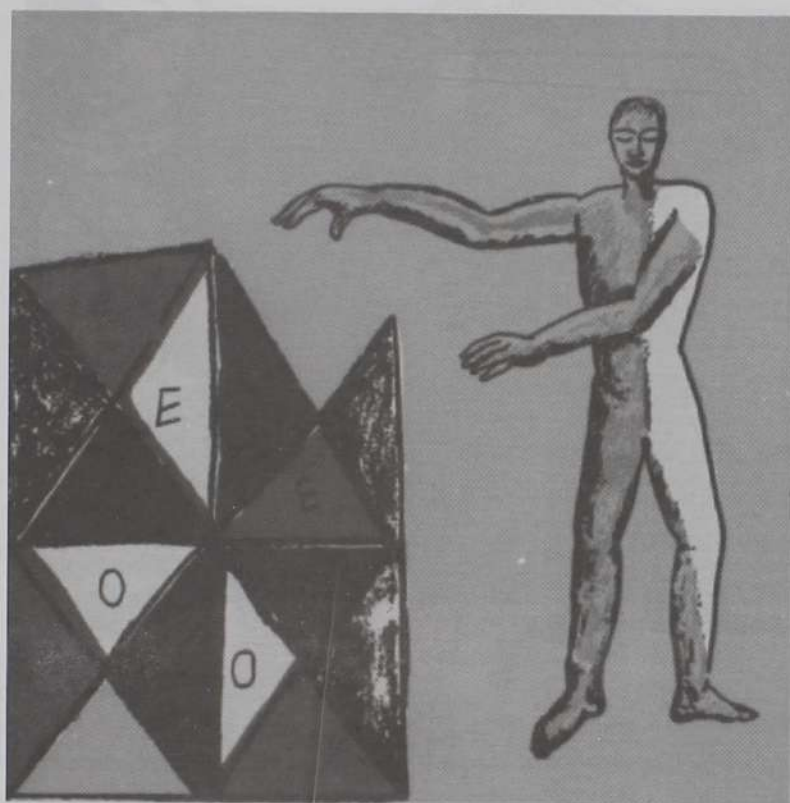
A quién, por ejemplo, no le interesa saber por qué envejecemos –tema literalmente vital de nuestra existencia– o quién puede darse por indiferente no sólo ante la belleza del brillo de las estrellas, sino ante el hecho por demás obvio que una estrella es la fuente de energía y de vida de nuestro planeta. A quién le aburre ver volar a las aves, entender por qué vuelan y subirse a un avión para acompañarlas por un rato. Todos estos temas son investigados por un gran número de científicos tanto en nuestro país como en otras partes del mundo.

Es verdad que la ciencia, para hacerla, requiere de muchos años de dedicación y su divulgación exitosa también implica cierto trabajo tanto por parte del científico, como por parte del público. Pero esto no es nada nuevo, ni quiere decir que la ciencia sea complicada o tediosa. Por citar un ejemplo que todos entendemos, pensemos que un músico necesita años de trabajo para dominar su instrumento. Pensemos que también la audiencia tiene que invertir el tiempo de oír la música, hacer el esfuerzo de conocerla y de sentirla para poder disfrutarla plenamente. Este tiempo y esfuerzo invertidos tanto por el artista como por el público son experiencias muy divertidas e interesantes, las cuales en lugar de envilecer la música la exaltan.

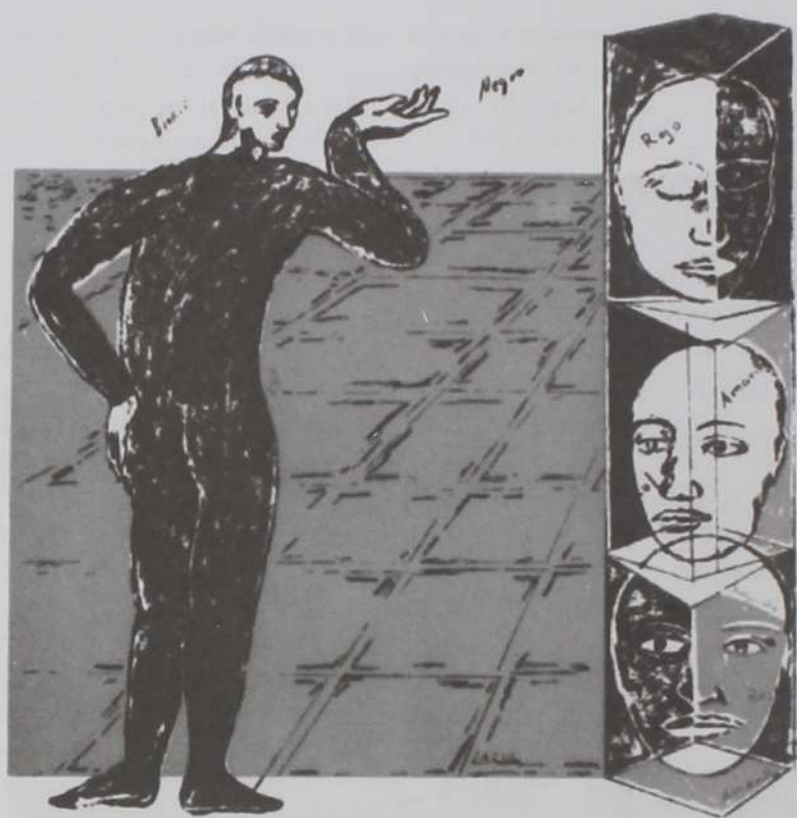
Lo mismo pasa con la ciencia. Adentrarse en ella, ya sea como profesional o como aficionado, es una excursión a un mundo magnífico, interesante y sorprendente. Una experiencia enriquecedora que nos hace crecer como seres humanos. Y al igual que en el caso de la música no es necesario ser científico, para, dedicándole un poco de

tiempo y esfuerzo, aprender otra vez a disfrutar plenamente, como en nuestra infancia, el placer de un “¿por qué ...?”

Así, aprovechando que durante el 2005 se celebra a nivel mundial el Año Internacional de la Física, el Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV se ha propuesto publicar en forma regular en el *Diario de Yucatán* una serie de artículos de divulgación que intenten despertar en el público ese gusto de observar y entender el mundo que nos rodea. Estos artículos aparecerán cada quince días: ¡esperamos que los lectores los disfruten!



DE LA SERIE "HABLAR DEL SILENCIO" *terigraña / papel muelle, 2003*



DE LA SERIE "HABLAR DEL SILENCIO" serigrafía / papel murillo, 2003

NOTICIAS DEL CINVESTAV

NOMBRAMIENTOS RECIENTES EN EL CINVESTAV

Lic. Víctor Gabriel Gutiérrez Lugo
Secretario Administrativo

Dr. José Luis Alejandro Naredo Villagrán
Director de la Unidad Querétaro

Dr. Daniel Robledo Ramírez
*Jefe del Departamento de Recursos del Mar,
Unidad Mérida*

COORDINADORES ACADÉMICOS

Dr. Juan José Alvarado Gil
*Departamento de Física Aplicada,
Unidad Mérida*

Dr. Carlos Alvarado Serrano
*Sección de Bioelectrónica,
Departamento de Ingeniería*

Dr. Ariel Álvarez Morales
Unidad Irapuato

Dr. Bernardino Castillo Toledo
Unidad Guadalajara

Dr. Guillermo Elizondo Azuela
Sección Externa de Toxicología

Dr. Felipe Gómez Castañeda
*Sección de Electrónica del Estado Sólido,
Departamento de Ingeniería*

Dr. Antonio Fernández Fuentes
*Programa de Maestría en Ingeniería Cerámica,
Unidad Saltillo*

Dr. Felipe de Jesús González Bravo
Departamento de Química

Dra. Ruth Mercado Maldonado
Departamento de Investigaciones Educativas
Dr. Jesús Alberto Olivares Reyes
Departamento de Bioquímica
Dr. Rafael Ramírez Bon
Unidad Querétaro
Dr. Francisco José Rodríguez
*Sección de Computación,
Departamento de Ingeniería*

PREMIOS WEIZMANN 2004 OTORGADOS POR LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

EL DR. CARLOS ENRIQUE VALENCIA OLETA OBTUVO EL premio a la mejor tesis de doctorado en el Área de Ciencias Exactas, bajo la dirección del Dr. Rafael Villarreal Rodríguez.

LA DRA. MARÍA LUISA BENÍTEZ HESS OBTUVO EL premio a la mejor tesis de doctorado en el Área de Investigación Tecnológica, bajo la dirección del Dr. Luis Marat Álvarez Salas.

EL DR. ANTONIO GÓMEZ NASHIKI OBTUVO EL premio a la mejor tesis de doctorado en el Área de Ciencias Sociales y Humanidades, bajo la dirección de los doctores Eduardo Remedi Allione y Sylvie Didou Aupetit.

YOUNG SCIENTIST AWARD 2004

EL DR. PRÓCORO GOMERO MELO OBTUVO EL premio a la mejor tesis, dirigida por la Dra. Ma. de los Ángeles Paz Sandoval del Departamento de Química.

PROFESOR HONORARIO

EL DR. RICARDO CANTORAL URIZA OBTUVO LA DISTINCIÓN UNIVERSITARIA OTORGADA POR LA UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS COMO PROFESOR HONORARIO.

NUEVOS MIEMBROS DE LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

CIENCIAS EXACTAS

Dr. Jorge Javier Castro Hernández
Física

Dr. Alfredo Cruz Orea
Física

Dr. José Iván Escalante García
Unidad Saltillo

Dr. Jesús González Espino Barros
Matemáticas

Dr. Martín Hernández Contreras
Física

Dr. Francisco Carlos Larios Forte
Física Aplicada

Dr. Wen Yu Liu
Control automático

CIENCIAS NATURALES

Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas
Unidad Querétaro

Dr. Ismael Jiménez Estrada
Fisiología, Biofísica y Neurociencias

Dra. Patricia Talamás Rohana
Patología Experimental

CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

Dra. Judith Kalman Landman
Investigaciones Educativas



LA COMUNIDAD DEL CINVESTAV
LAMENTA PROFUNDAMENTE EL FALLECIMIENTO
DE :

Rafael Ernesto García Ferreiro

Doctor en Ciencias Biomédicas

HIJO DE NUESTROS COLEGAS Y AMIGOS

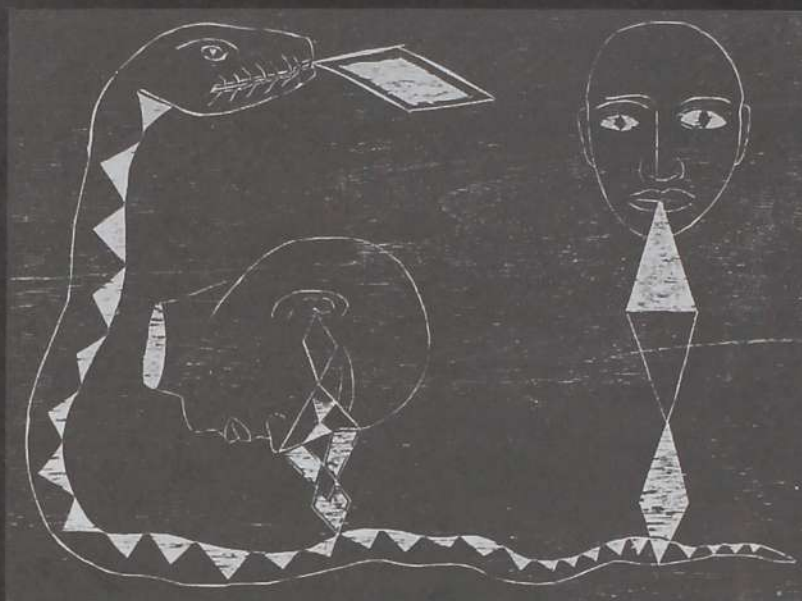
Dra. Emilia Ferreiro

*Investigadora del Departamento de Investigaciones
Educativas*

y

Dr. Rolando García

*Investigador de la Sección de Metodología
y Teoría de la Ciencia*



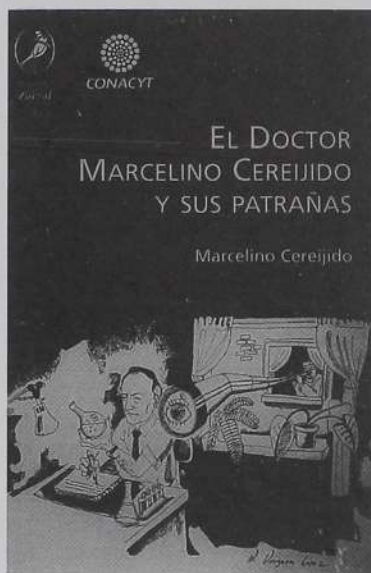
LIBROS Y REVISTAS

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ ANGÓN

MARCELINO CEREJIDO Y SUS PATRAÑAS
MIGUEL ÁNGEL PÉREZ ANGÓN

MARCELINO CEREJIDO, INVESTIGADOR TITULAR del Departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del CINVESTAV, es bien conocido en el medio científico por sus aportaciones al conocimiento sobre la fisiología celular y molecular de membranas epiteliales y de las uniones intercelulares conocidas como *tight junctions*¹. Por estas contribuciones ha sido distinguido con el Premio Interamericano de Ciencias Bernardo A. Houssay (1993) y el Premio Nacional de Ciencias y Artes (1995) que otorga el gobierno mexicano, entre otros. *Pirincho*, como lo llaman sus amigos, también es conocido por sus libros de divulgación y promoción de la ciencia² que han ayudado de manera significativa a la comprensión pública de la ciencia en países en vías de desarrollo como el nuestro. Sin embargo, es probable que sea más reconocido entre la comunidad del Centro y el público en general por la serie de artículos que publicó hace varios años en esta misma revista³, “que si bien tuvieron su origen en hechos reales, han acabado en la distorsión, la mentira y el escándalo”, como lo reconoce él mismo en el prólogo a su nuevo libro, *El doctor Marcelino Cerejido y sus patrañas*.

Cuando fueron publicados en *AyP*, los artículos ahora compilados en este libro provocaron desde sonrisas indulgentes hasta llamadas de atención o reconvenciones de algunos colegas y autoridades del CINVESTAV que se preocuparon más por el



escándalo generado que por el trasfondo de este “experimento editorial”, el cual me interesaba mucho como editor de *AyP*. Es bien sabido que las revistas institucionales de difusión como ésta no tienen una fuente segura de ingresos que provenga de suscripciones, del pago de publicidad o de la venta directa de ejemplares. En el caso de *AyP*, cuyo objetivo primordial es transmitir el entusiasmo por la investigación entre estudiantes de educación superior, es el propio CINVESTAV quien cubre buena parte del costo de su edición. En la época en que *Pirincho* empezó a publicar sus relatos en *AyP* atravesamos por una etapa similar a la actual en la que el gobierno federal no simpatiza con fomentar la investigación por el simple propósito de generar nuevo conocimiento y, menos aún con

El Dr. Miguel Ángel Pérez Angón es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV. Correo electrónico: mperez@fis.cinvestav.mx

apoyar su divulgación en tanto no se generen "recursos propios". En aquel entonces, gracias al escándalo y a la expectación generados con la publicación de los artículos de *Pirincho*, pudimos averiguar que *AyP* se leía en muchísimos lugares de México y del extranjero. Con este "factor de impacto" generado de manera tan contundente, fue posible convencer a las autoridades en turno de continuar financiando la publicación.

Carlos Chimal⁵ ha calificado a los libros de divulgación de Marcelino Cereijido como un ejemplo de claridad, humor y, sobre todo, confianza en su propia pluma. Una de las principales características de la serie de relatos compilados en este nuevo libro es precisamente la dosis de ironía con la que describe muchas de las triquiñuelas y matufias (argentinismo equivalente a engaño o trampa) típicas del gremio científico. Marcelino Cereijido resalta que el humor implícito y explícito no es un mero condimento, sino una componente esencial del quehacer científico, de la actividad asociada al proceso de investigación. En estas mismas páginas⁶ ya he enfatizado que los relatos contenidos en el nuevo libro de Marcelino Cereijido deben ubicarse en un contexto más amplio y que su publicación en *AyP* contribuyó a la creación de un nuevo género literario: la ficción científica, esto es, relatos de ficción que respetan las reglas literarias del género y que involucran una trama de corte científico donde no se viola ningún precepto conocido de la ciencia. Esta característica debe contrastarse con el género de la ciencia ficción, donde la coherencia del relato sólo tiene sentido si se acepta la violación flagrante de alguna ley de la naturaleza. En los últimos años se han multiplicado con éxito los ejemplos de este nuevo tipo de género literario, y en la mayoría de los casos con gran aceptación de lectores: *Contacto* de Carl Sagan; *El tío Petros y la conjetura de Goldbach* de Apostolos Doxiadis; *Copenhagen* de Michel Frayn; *En busca de Klingsor* de Jorge Volpi; *Lengua de pájaros* de Carlos Chimal y *La piel del cielo* de Elena Poniatowska, entre otros⁷. Sea pues bienve-

nida esta recopilación de los relatos de ficción científica de Marcelino Cereijido, a través de la cual los lectores de *AyP* que no tuvieron acceso a ese material podrán conocer los detalles sobre la gesta de su supuesto fraude científico. La esperanza será que estos relatos les provoquen vínculos más encendidos entre imaginación literaria e ideas científicas y que este nuevo género se abra paso a pesar de generarnos dudas sobre cuándo empieza la ficción y cuándo termina la realidad.

REFERENCIA

Cereijido, Marcelino, 2004, *El Dr. Marcelino Cereijido y sus patrañas*, Buenos Aires, Libros del Zorzal/Conacyt.

NOTAS

¹ Véase la espléndida entrevista que Carlos Chimal le hizo a M. Cereijido, *Avance y Perspectiva* 13, 101 (1994).

² *La nuca de Houssay*, UAZ, 1994; *Ciencia sin seso locura doble* (Siglo XXI, 1994; *Orden, equilibrio y desequilibrio*, UAZ, 1995; *El tiempo, la vida y la muerte*, FCE, 1988; *Por qué no tenemos ciencia*, Siglo XXI, 1994; *La ignorancia debida*, Libros del Zorzal, 1999.

³ Los relatos de ficción científica de Marcelino Cereijido publicados en *Avance y Perspectiva* se encuentran en los siguientes volúmenes: 11 (322); 12 (249, 307, 374); 15 (247).

⁴ *La nuca de Houssay*, op. cit.

⁵ Carlos Chimal, op. cit.

⁶ Pérez Angón, Miguel Ángel, 2002, *Avance y Perspectiva* 21, 61.

⁷ Sagan, Carl, 1988, *Contacto*, Buenos Aires, Emecé; Doxiadis, Apostolos, 2000, *El tío Petros y la conjetura de Goldbach*, Barcelona, Ediciones B; Frayn, Michel, 1998, *Copenhagen*, Londres, Methuen; Volpi, Jorge, 1999, *En busca de Klingsor*, Barcelona, Seix Barral; Chimal, Carlos, 2000, *Lengua de pájaros*, México, Era; Poniatowska, Elena, 2001, *La piel del cielo*, México, Alfaguara.

¿QUÉ LE FALTA AL UNIVERSO?

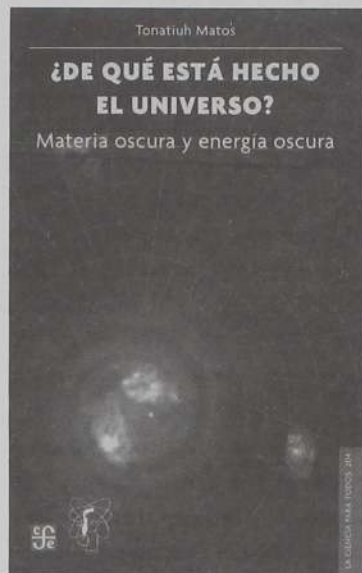
OSCAR ROSAS-ORTIZ

*Los marineros están un poco excitados.
Algo les turba su viaje.
Se asoman a la borda y escudriñan el agua,
se asoman a la torre y escudriñan el aire.
Pero no hay nada.
No hay peces, ni olas, ni estrellas, ni pájaros.
Señor capitán, ¿a dónde vamos?
Lo sabremos más tarde.
Cuando hayamos llegado.*

Joaquín Pasos

Canto de guerra de las cosas

CADA VEZ QUE MIRAMOS AL CIELO NO LOGRAMOS más que sobrecogernos ante la inmensidad del Universo. Desde que pintábamos bisontes en cavernas hasta nuestros días nos han intrigado cuestiones acerca de nuestro origen y el lugar que ocupamos en el Universo. Hemos aprendido que el fuego tiene una explicación que no requiere la existencia de un ente superior, que la Tierra no es el centro del Universo y que nuestra galaxia no agota las dimensiones de éste. Sabemos que el Universo tuvo un origen, el *big-bang*, y que ha evolucionado, conforme a reglas específicas, desde una densidad infinita de materia y una temperatura igualmente infinita hasta lo que conocemos en la actualidad. La descrip-



ción de tales reglas ha evolucionado conforme nuestra civilización perfecciona los instrumentos de medida que sirven como extensión de nuestros cinco sentidos. Las ideas y conceptos, a su vez, dictan en muchas ocasiones la forma y el modo en que estos instrumentos deben perfeccionarse. Esta retroalimentación ha existido desde que el hombre es hombre y quizá desde un poco antes. Las revoluciones científicas han marcado siempre revoluciones tecnológicas y sociales y, viceversa, las revoluciones sociales han marcado nuevas líneas de pensamiento que repercuten en el modo y estilo de hacer ciencia. Desde el concepto de los cuatro elementos (agua, tierra, aire y fuego) hasta el de los *quarks*, pasando por las teorías geocéntricas,

heliocéntricas, newtonianas, relativistas y demás, nuestra descripción del Universo siempre ha ido de la mano de ideas filosóficas, religiosas, raciales y culturales (si es que podemos hacer una clara distinción entre ellas).

Recordemos que Isaac Newton creía fervientemente en la existencia de un ente superior que diseñaría y controlaría el comportamiento del Universo del mismo modo que un relojero ajusta y perfecciona el mecanismo de un reloj. La premisa, aunque cuestionable, le fue de suma utilidad para construir una teoría satisfactoria que explicara no sólo el movimiento de los cuerpos en la superficie terrestre (*mecánica*) sino también el de la Tierra y los demás planetas del sistema solar, incluyendo el movimiento del Sol y el de la galaxia como un todo (*gravitación universal*). Tal fue el grado de perfección de la Teoría Newtoniana (*mecánica + gravitación*) que los astrónomos posteriores a Newton pudieron descubrir planetas adicionales a los que se conocían en aquella época. Así fue con Urano (1781), Neptuno (1846) y Plutón (1930), los dos últimos descubiertos como una predicción teórica de la Teoría de Gravitación Universal¹. Con todo, la Teoría Newtoniana agotó sus recursos a finales del siglo XIX². En particular, una anomalía pequeña pero persistente en el movimiento del perihelio del planeta Mercurio resultó ser el talón de Aquiles para la formulación newtoniana de la gravitación.

Albert Einstein, reconocido como el sucesor de Newton y homenajeado en este año por sus relevantes contribuciones a la ciencia, reformuló los conceptos de espacio y de tiempo (1905) para unificarlos en algo indivisible: el *espacio-tiempo*. Con esto en mente logró establecer una teoría de la relatividad (1911) que explicaba todo aquello que la gravitación newtoniana ya explicaba y que resolvía lo que ésta no podía. La explicación del rebelde comportamiento de Mercurio surgió de entender que el movimiento de los rayos de luz se ve afectado en presencia de los cuerpos masivos como consecuencia del campo gravitacional. La

formulación einsteniana de la gravitación se convirtió así en la teoría apropiada para describir el comportamiento de los cuerpos de grandes dimensiones, como los planetas, las estrellas y las galaxias. Una nueva era en nuestro entendimiento del Universo se había abierto. No obstante, y como suele ocurrir en la historia de la ciencia, pronto se vislumbraron algunas dificultades. Por ejemplo, resultó que la materia "visible" en el Universo no es toda la materia del Universo. Por "materia visible" (conocida) entendemos toda aquella materia que puede ser detectada por nuestros aparatos de medición tales como los *telescopios espaciales* (satélites artificiales equipados con un sinnúmero de detectores de la más sofisticada tecnología) e incluso nuestros ojos. Pues bien, sólo algo así como el 4% de la materia del Universo es materia visible; el restante 96% es materia desconocida, "algo que flota por doquier y no se deja ver, pero cuya fuerza gravitacional se siente con gran intensidad", tal y como lo dice Tonatiuh Matos, investigador del Departamento de Física del CINVESTAV, en: *¿De qué está hecho el Universo? Materia oscura y energía oscura*.

Tonatiuh es un probado divulgador de la ciencia y uno de sus temas de investigación es precisamente lo referente a materia oscura y energía oscura. Así que, aprovechando su experiencia científica y divulgadora, nos presenta su libro como el número 204 de la serie *La Ciencia Para Todos*, publicado por el Fondo de Cultura Económica.

Escrito en español, con ideas y pensamientos claramente expresados, el libro toma en cuenta la avidez de información de un público cautivo en el idioma inglés. El precio comercial del libro es asequible para los estudiantes de secundaria y preparatoria, a quienes va dirigido. En forma inusual para la serie, el libro contiene 23 láminas con ilustraciones a color. Además, a lo largo del texto hay 31 figuras que hacen aún más claros los conceptos. Un glosario con 130 entradas y una selecta bibliografía completan esta obra de 127 páginas, con 10 capítulos y un índice.

El material del libro lleva al lector de la mano para introducirlo en el tema. Inicia con el origen del Universo: la *gran explosión* (el *big-bang*), explicando la misteriosa relación entre la radiación (luz) emitida por una cavidad caliente (*cuerpo negro*) y la radiación proveniente del espacio exterior que los astrónomos detectaron desde mediados de los sesenta. Menciona cómo se llegó a la conclusión de que las galaxias se están alejando unas de otras, y explica cómo todo esto orilló a los científicos a aceptar la locura de una explosión de enormes dimensiones como origen probable del Universo. En un capítulo dedicado a la Relatividad General se aclaran los conceptos de espacio-tiempo, masa gravitacional, masa inercial, el principio de equivalencia y la desviación de la luz por un campo gravitacional. A lo largo del libro entendemos cómo se forman las estrellas y cómo es que “contamos” la masa y la energía que detectamos. Nos indica por qué existe una necesidad de explicar la ausencia de la materia faltante y justifica por qué la *materia oscura* y la *energía oscura* son buenos candidatos para establecer tal explicación. El tema, por demás interesante, está a la vanguardia de la cosmología y astrofísica modernas.

Finalmente la combinación autor-claridad-idioma-precio difícilmente se encuentra en un solo libro, y éste es el caso. Las nuevas generaciones de científicos lo encontrarán más que estimulante, formativo. ¿Y por qué no? si “la materia de la que el ser humano está constituido, así como la Tierra, el Sol y las estrellas, representa únicamente el 4% de la materia del Universo”, quizás esa materia *se revele* y de entre los jóvenes lectores de este libro se encuentre aquél que conteste a la pregunta: ¿de qué está hecho el Universo?

REFERENCIA

Matos, Tonatiuh, 2004, *¿De qué está hecho el Universo? Materia oscura y energía oscura*, serie *La Ciencia Para Todos*, número 204, México, Fondo de Cultura Económica.

NOTAS

¹ William Herschel se tropezó literalmente con Urano mientras estudiaba el cielo con un telescopio de su propia manufactura. Desde finales del siglo XVIII los entonces siete planetas no se ajustaban a las trayectorias que se suponía deberían describir; se propuso que algún cuerpo masivo, más allá de la órbita de Urano, era el causante. Se hicieron entonces los cálculos pertinentes asumiendo la existencia de un octavo planeta y se logró determinar su posible trayectoria. ¡Neptuno “apareció” donde la teoría había predicho! La historia de Plutón es en cierta forma parecida, sólo que se le detectó comparando el comportamiento de los objetos celestes en diferentes fechas: Clyde Tanbaugh se dio a la tarea de fotografiar sistemáticamente diversas zonas del espacio en diferentes fechas; Plutón apareció como un pequeño punto “movedizo” en las placas fotográficas.

² A finales del siglo XIX se hacía cada vez más evidente que la teoría newtoniana fallaba en los límites de lo muy pequeño y en los de lo muy rápido. Lo primero dio origen a lo que actualmente llamamos Mecánica Cuántica y lo segundo propició el surgimiento de la Teoría Especial de la Relatividad. Einstein contribuyó en forma decisiva con sus trabajos de 1905 en ambos casos. En 1907 propuso la equivalencia entre masa y energía y con ello que la masa gravitacional puede interactuar con la “masa de la radiación electromagnética”. Todo esto desembocaría finalmente en su propuesta de una Teoría General de la Relatividad, publicada en 1911.

Departamento de Física

CINVESTAV

del 11 al 22 de julio de 2005

Escuela Avanzada de Verano



CURSOS:

Materia Oscura

David Clíne (Universidad de California, Los Angeles, EUA)

Espintrónica y Computación Cuántica

Enrique de Anda (Pontificia Universidad Católica, Brasil)

Teoría de Campos

José Gracia-Bondía (Universidad Complutense de Madrid, España)

Física de astropartículas

Francis Halzen (SCEC, EUA)

Estados Supercoherentes

Luis Miguel Nieto (Universidad de Valladolid, España)

Física de Polímeros

Mónica Olvera (Universidad de Northwestern, EUA)

Física de biomoléculas y biosistemas

Joel Stavans (Instituto Weizman, Israel)

Física de semiconductores nitruados

Charles Tu (Universidad de California, San Diego, EUA)

Habrà apoyo económico para profesores y estudiantes de instituciones de provincia, consultar las bases en:

<http://www.fis.cinvestav.mx/~verano>

Información Srita. Miriam Lomeli, tel+fax 50613879, o escribir a verano@fis.cinvestav.mx.





CINVESTAV

2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE) and XI Conference on Electrical Engineering (CIE 2005)



cie
2005



Topics will Include: Mexico City, September 7-9, 2005

Bioengineering and Medical Electronics

Communications Systems

Computer Science

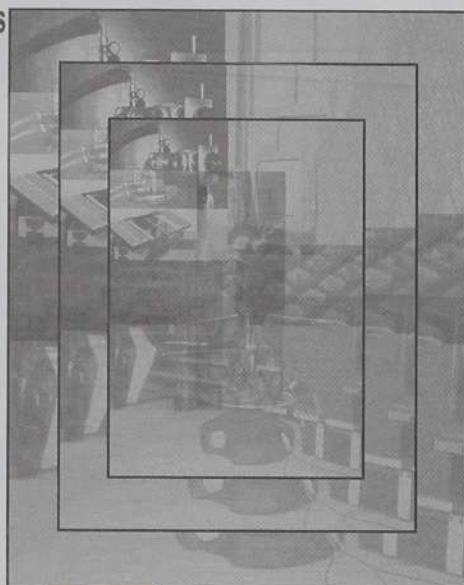
Solid-State Electronics and VLSI

Electronic Circuits

Mechatronics and Automatic Control

Semiconductor Materials

Electrical Power



Keynote Speakers:

Dr. Jitendra K. Tugnait
Auburn University, AL, U.S.A.

Dr. Julio César López Hernández
University of Campinas, Brazil

Dr. Edgar Sánchez-Sinencio
Texas A&M University, TX, U.S.A.

Dr. Christian Daul
ENSEM-INPL, France

Dr. Mark W. Spong
University of Illinois, IL, U.S.A.

Important Dates:

Full Manuscript : May 8, 2005

Review Notification: June 24, 2005

Final Revised manuscript: July 29, 2005



Web Page: iceee.ie.cinvestav.mx

Conference Chairman
Dr. Felipe Gómez-Castañeda

Information:

Mrs. Carmen Quintero
Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN
Av. I.P.N. No. 2508, Col. San Pedro Zacatenco
Delegación Gustavo A. Madero, CP 07360
México D.F., México
Phone: 52 (55) 5061-3800 ext. 6500, Fax: 52 (55) 5061-3976
E-mail: iceee@cinvestav.mx

Tutorial Courses:

CONTRIBUCIONES

Las contribuciones para la revista *Avance y Perspectiva*, deberán enviarse a las oficinas del CINVESTAV en los siguientes formatos.

TEXTOS:

Word, Disco 3/5 ó CD-ROM

Cuando se trate de artículos de investigación la extensión máxima será de 15 cuartillas; en cuanto a los artículos de difusión se aceptará un máximo de 10 cuartillas.

Si el texto incluye tablas, éstas se entregarán en archivo por separado, en disquette en texto corrido y con una impresión adjunta que muestre la forma en que debe quedar la tabla. Además, se debe indicar en el original la ubicación de éstas. La indicación es también válida para esquemas y cuadros.

Las notas deberán incluirse al final del trabajo, antes de la bibliografía o de las referencias, debidamente numeradas. Las referencias deben apegarse a los modelos siguientes:

Libro:

Wiener, Norbert, 1985, *Cibernética: o el control y la comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets.

Artículo de revista:

Ádem, José, 1991, "Algunas consideraciones sobre la pesca en México", en *Avance y Perspectiva*, vol.10, abril-junio, pp. 168-170.

Se sugiere que las referencias sean cuidadosamente revisadas por los autores y que los títulos de los artículos y los nombres de las publicaciones no se abrevien.

Todos los textos deben incluir el nombre del autor, grado académico, adscripción y cargo que desempeña, teléfono y correo electrónico.

IMÁGENES Y GRÁFICAS:

TIFF, 10 x 10 cm (mínimo), 300dpi, Blanco y negro, CD-ROM. Las imágenes se entregarán en forma física, de preferencia en transparencias. No se aceptarán imágenes de internet o cámara digital debido a que la resolución que presentan no es adecuada.

En caso de que el trabajo incluya diapositivas en power point, favor de remitirlas impresas en papel fotográfico y en máximo grado de resolución y no a través de archivos de office.



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV

avance@mail.cinvestav.mx

T/F 57 47 70 76

www.cinvestav.mx/publicaciones

Av. IPN 2508, Zacatenco, C. P. 07360

**AHORA NOS CONOCEN
COMO LA FLOTA MÁS MODERNA DEL
MUNDO, PERO SEGUIMOS SIENDO:
MEXICANA.**



La aerolínea mexicana líder en América
que además de toda su experiencia,
te ofrece viajar por una enorme red
de destinos en los aviones más modernos.



mexicana.com

MEXICANA 

Siente la experiencia

LIC. FRANCISCO JAVIER PULIDO SAAVEDRA
Jefe
Depto. Enlace Institucional



Centro de Investigación
y de estudios avanzados del IPN
CINVESTAV