

HACIA UN MUNDO DE NUEVOS MATERIALES

por Leo M. Falicov

Departamento de Física, Universidad de California, Berkeley, California 94720, E. U. A. y División de Ciencia de los Materiales, Laboratorio Lawrence de Berkeley, Berkeley, California 94720, E. U. A.

I. INTRODUCCION

La palabra *materiales* evoca variadas imágenes en cada individuo. Es cemento, ladrillos y vigas para el constructor; pinceles, óleos y acuarelas para el artista; acrílicos, porcelana y amalgamas para el dentista; tinta y papel para el periodista; seda, lana y fibra sintética para la modista y el sastre.

El diccionario define a *material* como "substancia que se usa para efectuar cierta tarea o con la cual se hace o se puede hacer algo".

Los materiales han constituido, desde la prehistoria y en toda la historia, un factor decisivo en el desarrollo del ser humano. Las distintas etapas de la prehistoria se conocen por los nombres de los materiales preponderantes de la época: las dos edades de piedra, la de bronce y la de hierro. La ciencia de los materiales ha progresado con la civilización, y ha estado continuamente ligada a la química (o a la alquimia), a la física, a la cristalografía y a la mineralogía por un lado; a la industria, el comercio, el transporte y las comunicaciones por otro, y a las artes, el estilo de vida y las necesidades cotidianas del individuo por el tercero.

El siglo XX, como ningún otro anterior, ha estimulado el desarrollo de nuevos materia-

les. Los avances gigantescos en las comunicaciones, el transporte, la medicina y la industria, y la increíble aceleración en los cambios de los estilos de vida han sido posibles solamente por el desarrollo paralelo y coetáneo de los materiales pertinentes. Por ejemplo, los nuevos materiales estructurales han permitido la construcción de obras de ingeniería civil no imaginables a comienzos de este siglo; han permitido también avances tan dispares como una nueva medicina prostática, aviones que transportan más de 400 personas a velocidades cercanas a la del sonido, cohetes y vehículos espaciales que pueden ser usados repetitivamente y cuya vida útil es de muchos años, cerámicas estructurales con capacidad de resistir la acción corrosiva, sostenida y prolongada de sustancias ácidas o alcalinas, a temperaturas muy altas o muy bajas, y a grandes presiones.

Pero sin lugar a dudas los avances más espectaculares han sido en las áreas de los materiales eléctricos, electrónicos, ópticos y magnéticos. Estos avances han originado una "revolución post-industrial": la llamada revolución en la ciencia, ingeniería e industria de la información. No es posible, en el corto tiempo de una sola conferencia, cubrir ni aun brevemente los avances más notables en la ciencia de estos materiales. He optado, por lo tanto, por elegir unos pocos temas de actualidad, temas que me interesan personalmente y en los cuales he trabajado, y discutir sucintamente algunos puntos de interés científico general.

Conferencia pronunciada durante su incorporación como Académico Correspondiente en Berkeley, California, EE. UU., el día 26 de Marzo de 1991.

II. SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad es una fase, un estado de la materia que se observa en ciertos sólidos, generalmente metálicos. El estado superconductor tiene varias propiedades características:

1. Cuando existe en una dada substancia (y en general las substancias superconductoras son una minoría), existe sólo a temperaturas menores que la llamada *temperatura crítica o de transición*, T_c , y en general hasta el cero absoluto de temperatura ($0\text{ K} = -273,15^\circ\text{ C}$);

2. Es un estado que tiene *resistencia eléctrica nula* o, equivalentemente, *conductividad infinita* (efecto descubierto en el mercurio por Kamerlingh Onnes en 1911);

3. El estado superconductor es, para campos magnéticos pequeños, perfectamente diamagnético, es decir las líneas de flujo magnético son completamente expulsadas del interior del superconductor y, por su parte, el superconductor experimenta una fuerza que trata de alejarlo de la región de campos magnéticos intensos hacia una zona de campos débiles o nulos (efecto descubierto por Meissner en 1933 y que lleva su nombre);

4. Existe un valor mínimo de la energía, llamada *brecha de energía*, por debajo de la cual no se puede excitar al sistema; esta brecha fue propuesta teóricamente por London en 1935, deducida de datos termodinámicos en 1946, observada en experimentos de absorción en el infrarrojo en 1957, y medida por efecto túnel en 1960;

5. Hay, en el valor de la temperatura de transición, una sorprendente dependencia de la masa isotópica de los núcleos atómicos del sólido superconductor (lo sorprendente es que un fenómeno eléctrico y magnético, que depende sólo de los electrones, sea influido por la masa nuclear); este *efecto isotópico* fue descubierto en 1950;

6. La superconductividad es un efecto muy delicado; el estado superconductor se puede destruir muy fácilmente subiendo la temperatura por encima de la *temperatura crítica*, circulando una corriente eléctrica de intensidad mayor que una *corriente crítica*, o incrementando el campo magnético hasta valores superiores a un *campo crítico*;

7. El estado superconductor presenta *fenómenos macroscópicos cuánticos*, de los cuales el efecto Josephson es el más conocido; estos efectos se pueden emplear para procesar, almacenar y recuperar información, y forman la base de una tecnología superconductor de la computación.

La tabla a continuación muestra la historia de las substancias con temperaturas críticas más altas determinadas experimentalmente:

Temperaturas críticas superconductoras más elevadas.

Año del descubrimiento	T_c [K]	Substancia
1911	4,2	Hg
~ 1913	7,2	Pb
1933	9,5	Nb
1941	15	NbN
1953	17	Nb ₃ Sn
1960	18	V ₃ Si
1969	20,8	NbAlGe
1973	23	Nb ₃ Ge
1986	~30	La _{2-x} Ba _x CuO ₄
1986	~40	La _{2-x} Sr _x CuO ₄
1987	~95	YBa ₂ Cu ₃ O _{6,6-7}
1988	~110	(Bi,Pb) ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀
1988	125	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀
1987-91	-230	YBa ₂ Cu ₃ O ₇

La última línea de la tabla corresponde a resultados publicados varias veces, pero que son inestables (la superconductividad desaparece después de cierto tiempo o con tratamientos térmicos) e irreproducibles.

Como puede verse en la tabla, desde 1911 a 1973 la temperatura crítica más alta aumentó a una velocidad promedio de aproximadamente $0,3\text{ K}$ por año. Debe recordarse que el helio hierva a $4,5\text{ K}$, el hidrógeno a $20,7\text{ K}$, el neón a $27,2\text{ K}$, y el nitrógeno (aire líquido) a $77,4\text{ K}$. Dado que éstos son los medios refrigerantes más comunes, y que los costos de toda tecnología superconductor están basados fundamentalmente en los costos de refrigeración, el descubrimiento en 1973 de un superconductor que podía refrigerarse con hidrógeno en ebullición se

consideró un gran avance científico y tecnológico. No es necesario decir, por lo tanto, que los acontecimientos desde 1986 pueden llamarse fantásticos: en rápida sucesión se pasaron las barreras del neón y del aire en ebullición y aún parece posible (si la escurridiza superconductividad a temperatura ambiente se puede confirmar, estabilizar e industrializar) que en un futuro no muy lejano una tecnología general basada en transmisión, aparatos, dispositivos y métodos superconductores sea de uso generalizado.

Sin embargo, hay que reconocer que hay por delante enormes dificultades que superar. La teoría de los superconductores de alta temperatura no está aun establecida, y hay una enorme variedad de propuestas y modelos, que se contradicen el uno al otro, y que compiten por establecerse como definitivos. La confusión causada por esta superabundancia de teorías no confirmadas consumirá varios años de investigación y trabajo detallado y engorroso.

Los experimentos también se han hecho, en los últimos 5 años, cada vez más complejos y difíciles de interpretar, fundamentalmente debido a la dificultad de obtener muestras monocristalinas y de una pureza y estequiometría bien determinadas. Hay también grandes problemas con el comportamiento de estos superconductores en presencia de campos magnéticos altos, problemas que pueden causar dificultades en el desarrollo de una tecnología eficiente y económica.

Pero los problemas más serios están en la ciencia de materiales de estas sustancias. Dado que son cerámicas muy quebradizas, con diagramas de fase muy complicados y con una gran cantidad de estequiometrías posibles, que son muy poco dúctiles y maleables, y que es muy difícil cristalizarlos sin defectos, la gran barrera para el desarrollo científico y tecnológico de la superconductividad de altas temperaturas se encuentra en los laboratorios de ciencias de materiales, de los cuales los grandes avances aún están por ser obtenidos.

III. ESTRUCTURAS METAESTABLES

El diamante, joya preciada en todas las sociedades, es una forma *metaestable* del

carbono. Tiene sin embargo una vida tan larga que, visto por el ser humano, es tan estable o quizá aún más estable que el planeta.

Uno de los ideales del científico y del ingeniero de materiales es poder repetir, en el laboratorio o en la fábrica, el truco que la naturaleza efectuó al crear el diamante. Deben existir ciertas formas de ciertas sustancias que no son accesibles en condiciones normales, pero que se pueden formar bajo condiciones especiales: muy altas o muy bajas temperaturas, muy altas o muy bajas presiones, campos eléctricos o magnéticos de gran intensidad, gran pureza química e isotópica, ausencia de gravedad. Y es probable que algunas de estas formas sean metaestables y se puedan estabilizar, conservar y usar en condiciones normales de presión, temperatura y medio ambiente.

Todas las condiciones extraordinarias arriba mencionadas se pueden lograr actualmente en situaciones controladas, sea en el laboratorio, sea en naves espaciales. Y la búsqueda de nuevas formas metaestables de sustancias conocidas ha comenzado. Diamantes artificiales ya se fabrican en el laboratorio y en forma industrial. Otras formas de carbono se han detectado en los últimos años, incluyendo una molécula de 60 átomos de carbono con la apariencia de una pelota de fútbol. Es posible (ha sido predicho teóricamente) que ciertos compuestos metaestables de carbono y nitrógeno sean más duros que el mismo diamante. Un nuevo campo en la ciencia de materiales, aún pequeño y restringido, ha hecho su aparición (pese a que en sus intenciones y filosofía se asemeja enormemente a la alquimia del medioevo).

IV. CUASI-CRISTALES

Para la mayor parte de los científicos que trabajan en la ciencia de materiales la idea de *orden de largo alcance* está unívocamente asociada al concepto de periodicidad en cristales tridimensionales. La periodicidad de la estructura atómica en los cristales fue confirmada experimentalmente por la difracción de rayos X ya en 1911. La matemática asociada al estudio de las estructuras periódicas está, desde ese entonces, basada en la

teoría de los grupos espaciales, en el teorema de Bloch (Flouquet), y en la ley de Bragg. Estos conceptos, a su vez, son la base fundamental de la teoría cuántica del estado sólido, la piedra fundamental en el entendimiento de los materiales electrónicos, ópticos y magnéticos.

La teoría de grupos prueba de manera irrefutable que las estructuras periódicas son compatibles solamente con cuatro tipos de simetría de rotación: las del rectángulo, el triángulo equilátero, el cuadrado y el hexágono regular; todo otro tipo de simetría es imposible. En particular no es posible obtener estructuras periódicas que exhiban una simetría de rotación pentagonal.

Fue por lo tanto un suceso espectacular e inesperado cuando, en 1984, un grupo de cristalógrafos comunicó al mundo científico que, en la aleación $MnAl_6$ obtenida al templado rápido, la difracción de rayos X mostraba, de manera incontrovertible, una simetría pentagonal. Este descubrimiento ha reabierto el campo de la cristalografía, un campo maduro que había abandonado el nivel fundamental para convertirse en una técnica y una aplicación. La aparición de simetría pentagonal y decagonal en sistemas condensados es consecuencia del hecho, obvio pero olvidado, que es posible obtener orden de largo alcance sin necesidad de tener una periodicidad. No es necesario que algo ordenado sea repetitivo, una copia al infinito del mismo bloque fundamental.

Las nuevas cristalografía, física y química de los *cuasi-cristales* (como se ha apodado a estos nuevos entes) han sido campos fértiles para los matemáticos aplicados (geómetras, topólogos y especialistas en teoría de grupos), para los especialistas en difracción de rayos X, para los microscopistas electrónicos, para los metalurgistas, y para los científicos de la materia condensada. Uno de los resultados fundamentales de estos estudios es el nuevo resultado que materiales no periódicos pueden dar origen a diagramas de rayos X que no son difusos, y que simetrías pentagonales, decagonales y aún más complejas son posibles en sistemas completamente ordenados (aunque no periódicos).

La matemática de los cuasi-cristales se ha desarrollado basada en un espacio abstracto de seis dimensiones, proyectado al espa-

cio común de tres dimensiones. Los resultados de esta construcción abstracta producen estructuras que han sido observadas experimentalmente en una variedad de sistemas metaestables. El problema inverso de determinar a partir del diagrama de difracción de rayos X la posición precisa de los átomos (una tarea laboriosa pero rutinaria para cristales) es aún un problema no completamente resuelto.

Quedan además otros problemas por resolver. En particular, en estos nuevos sistemas ordenados, ¿dónde se ubican los átomos? ¿Cuáles son los nuevos números cuánticos? ¿Cómo se pueden catalogar y estudiar los defectos?

V. ESTRUCTURAS ARTIFICIALES

El enorme avance en la tecnología de materiales ha permitido la fabricación de estructuras complejas con características muy distintas a las observadas en las sustancias naturales. Esta nueva tecnología ha producido una nueva rama de la física de la materia condensada que se especializa en el estudio de las propiedades dinámicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de electrones en estructuras artificiales.

Los métodos empleados en la manufactura de estos sistemas son en general muy complejos y costosos e incluyen, entre otros, los siguientes: (1) epitaxia molecular, (2) litografía, (3) deposición a partir de plasmas, (4) deposición a partir de vapores, (5) deposición a partir de compuestos organometálicos, (6) dopado controlado de impurezas, y (7) intercalación (en sistemas de capas).

Las estructuras que se obtienen son de muchos tipos; entre otros: (1) heteroestructuras en capas paralelas, (2) sobrecapas monomoleculares, bimoleculares, trimoleculares, etc., (3) cuñas de ángulo pequeño y muy preciso, (4) hilos y alambres de espesor microscópico, (5) partículas pequeñas de tamaño controlado y casi uniforme, (6) agregados, (7) suspensiones, (8) anillos de tamaño microscópico y sección transversal muy precisa, (9) microtubos, y (10) otras microestructuras diseñadas "a medida".

El ejemplo más notable de física nueva que puede hacerse con estas estructuras es el descubrimiento del *efecto Hall* bidimen-

sional, por el cual se otorgó el Premio Nobel de Física en 1985. El efecto Hall es la aparición de un voltaje transversal (digamos en la dirección y), perpendicular a una corriente eléctrica (digamos en la dirección x) y a un campo magnético (dirección z), ambos a su vez perpendiculares entre sí. En muestras artificiales de varias capas de semiconductores (en particular arseniuro de galio puro y arseniuro mixto de galio y aluminio) es posible obtener, en las interfaces, regiones en la cual los electrones pueden circular libremente en dos direcciones (digamos las x e y), pero están estrictamente confinados en la tercera dirección (la z), en la cual no se pueden mover (estado ligado). La aplicación de un campo magnético en la dirección z , y el paso de una corriente en la dirección x producen un voltaje en la dirección y . El cociente de este voltaje y la intensidad de corriente da una resistencia, llamada la resistencia de Hall bidimensional. El descubrimiento importante es que esta resistencia sólo puede tomar valores discretos, dados por la simple fórmula

$$R_H = \frac{h}{v e^2}, \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck, e la carga elemental del electrón, y v es un número entero positivo. Dado que esta fórmula sólo involucra números enteros y constantes universales, se la puede considerar o bien como una definición fundamental del patrón de resistencias (basado en el conocimiento previo y preciso de las constantes h y e), o bien como una nueva manera de determinar el valor numérico de la relación (h/e^2), basado en la medición precisa de R_H , la resistencia de Hall.

Estos sistemas artificiales, que se basan en la deposición esmerada, en condiciones muy controladas, de sustancias de gran pureza química, permiten por un lado obtener dispositivos electrónicos, ópticos o magnéticos de enorme sofisticación, por un segundo obtener situaciones físicas no encontradas en los sistemas naturales, por un tercero, verificar propiedades cuánticas al nivel macroscópico, y por un cuarto obtener sistemas cuya dimensión espacial real es menor que tres: sistemas bidimensionales (interfaces "perfectas" entre

dos materiales), unidimensionales (líneas, hilos o alambres obtenidos litográficamente), y de dimensión cero (regiones muy pequeñas, submicroscópicas, llamadas "dots", que pueden cobijar un solo estado cuántico para los electrones).

VI. SISTEMAS MALFORMADOS

Dado que la ciencia en general se puede definir como la búsqueda de un sistema, un orden, un esquema en el caos aparente del universo que nos rodea, es sorprendente la gran fascinación que la ciencia ha desarrollado en las últimas décadas por estudiar el desorden y el caos. Debe reconocerse que en el desorden y el caos puede encontrarse una belleza inherente, compleja y perversa. Esa belleza se ha hecho más manifiesta en los últimos años con la formulación matemática del concepto de *fractal*, una idea de gran popularidad en una multitud de ciencias (desde la meteorología hasta la medicina, desde la física hasta la economía) y que con toda seguridad está destinada a tener una influencia amplia y profunda en el pensar científico.

El estudio de sistemas malformados abarca un área grande de la ciencia de materiales. Desde el estudio clásico del vidrio, pasando por los semiconductores amorfos, y cubriendo los geles y polímeros hasta llegar a los sistemas de esponjas, burbujas y espumas, este capítulo de la ciencia de materiales incluye los procesos dinámicos que conducen a la formación y crecimiento de esas estructuras.

Esta área, sin embargo, ha alcanzado sus mayores éxitos teóricos en el estudio de los llamados vidrios de espín, sistemas ideales cuyo comportamiento y propiedades se pueden aplicar a áreas tan diversas como la biología molecular, la anatomía del cerebro, y la teoría de la información. Este campo ha introducido en la ciencia una serie de conceptos e ideas que han abierto nuevos panoramas y cuyos horizontes no se han vislumbrado aun.

VII. SISTEMAS ANISOTROPICOS

En las últimas dos décadas los físicos de la materia condensada han aprendido a

manejar sin temores no sólo las sustancias desordenadas, sino también aquellas que son intrínsecamente asimétricas direccionalmente, es decir anisotrópicas. En especial mucho se ha intensificado el estudio de sistemas tridimensionales que son, en efecto, o un agregado de cadenas lineares (sistemas *cuasi-unidimensionales*, o un agregado de "hojas" o capas apiladas (sistemas *cuasi-bidimensionales*). El interés científico de estos sistemas reside fundamentalmente en cinco propiedades: (1) se los puede modificar (químicamente y morfológicamente) de manera muy fácil y "diseñarlos" para que satisfagan propiedades muy específicas; (2) se los puede intercalar con otros compuestos con relativa facilidad química; (3) presentan propiedades electrónicas muy peculiares, en especial las llamadas ondas de densidad de carga y ondas de densidad de espín; (4) presentan propiedades magnéticas y eléctricas muy complejas, incluyendo superconductividad; (5) son sistemas no lineales en lo que se refiere a las propiedades eléctricas, dado que la aplicación de campos eléctricos relativamente pequeños produce una violación notable y compleja de la ley de Ohm. Este último fenómeno está directamente relacionado al estudio intensivo de la dinámica no lineal y de los sistemas dinámicos caóticos, de gran popularidad en otras ramas de la física.

VIII. SISTEMAS COMPLEJOS

Existen en la actualidad una gran cantidad de sistemas muy complejos que presentan propiedades o bien no completamente entendidas, o bien propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas de características únicas. Dos ejemplos se mencionan a continuación:

1. Los llamados *fermiones pesados* son compuestos metálicos que contienen tierras raras o elementos de la serie del actinio, y que presentan características únicas. En particular las propiedades termodinámicas y electromagnéticas son diferentes a la de cualquier otro sólido. Algunos de ellos, el $CeCu_2Si_2$ y el UPt_3 , por ejemplo, son además superconductores, pero muy distintos a todos los otros superconductores.

2. La química orgánica del estado sólido ha producido en los últimos años un conjun-

to muy notable de *conductores orgánicos*; éstos incluyen superconductores así también como sustancias con propiedades ópticas y magnéticas de gran interés.

IX. PREDICCIÓN "AB INITIO" DE NUEVOS MATERIALES

Uno de los problemas fundamentales de los físicos teóricos de la materia condensada es el poder predecir, dada la composición química de un sólido, cuál es, a una determinada presión, su estado más estable a una determinada temperatura, en especial a temperaturas muy bajas (cerca del cero absoluto). Este estable estado fundamental es, en general y con muy pocas excepciones, cristalino. El problema está en determinar la estructura, los parámetros y las propiedades físicas de ese cristal estable. La solución general del problema escapa aún a las posibilidades de la computación actual. Hay, sin embargo, solución para ciertos casos especiales y muy sencillos: nuevos estados del silicio a altas presiones (predichos teóricamente y posteriormente encontrados experimentalmente) y, a muy altas presiones, un estado aislante, aún no descubierto, del níquel, que a presiones normales es metálico. Para estos dos casos las ecuaciones de estado de los elementos *Si* y *Ni* a temperatura $T = 0$ han sido determinadas, y están de acuerdo con los datos experimentales en aquellos rangos accesibles de presión.

Esta área de investigación es extremadamente activa, con enormes progresos registrados en períodos relativamente cortos. Esta explosión de actividad teórica se debe a tres causas fundamentales: (1) un mejor entendimiento logrado en las últimas dos décadas del comportamiento cuántico de los electrones en potenciales periódicos; (2) una base teórica muy firme y un método excelente para poder reemplazar el comportamiento de muchos cuerpos de los electrones en los sólidos por un tratamiento de un electrón por vez, el potencial efectivo de una partícula denominado "Aproximación de Densidad Local" (LDA); (3) el desarrollo espectacular y explosivo de las computadoras de gran capacidad, que han hecho los cálculos numéricos complejos y en gran escala no sólo accesibles a muchos científicos, sino

también relativamente económicos y extremadamente rápidos.

X. CONCLUSION

Concluyo esta conferencia con una nota de optimismo. La ciencia de los materiales, al final del siglo XX, constituye un campo de investigación pleno de ideas nuevas, de resultados importantes y de posibles aplicaciones industriales, previsibles e imprevisibles. En todo el mundo, y dentro de las posibilidades de cada grupo y sociedad, la importancia de los nuevos materiales se manifiesta en nuevo apoyo a la investigación, nuevas plantas de producción de nuevos materiales, nuevos usos y objetivos para los materiales tradicionales, y nuevas necesidades de materiales que satisfagan propiedades bien definidas. La investigación en este campo conduce a un modo de operación en el cual la interacción es crucial: interacción entre lo puramente académico y lo fuertemente aplicado; interacción entre gobiernos, universidades e industria; interacción entre la teoría y el experimento; interacción entre los que producen las muestras y los que fabrican los instrumentos para caracterizarlas; interacción entre físicos, químicos, cristalógrafos, biólogos, ingenieros, metalurgistas y programadores; interacción entre empiristas y modelistas. Los problemas candentes cambian rápidamente, no sólo con los nuevos descubrimientos, sino también con las nuevas necesidades técnicas, industriales y sociales. Y no es difícil predecir que el mundo de los materiales en el siglo XXI será considerablemente más rico y variado que el ya caleidoscópico panorama que observamos hoy.

XI. BIBLIOGRAFIA

General:

- "March 1986: Open Problems in Condensed Matter Physics", L. M. Falicov, en *Physica Scripta*, volumen T13, página 17, 1986.
- "Advanced Materials and the Economy", J. P. Clark y M. C. Flemings, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 42, 1986.
- "Materials for Information and Communication", J. S. Mayo, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 50, 1986.
- "The Science of Materials", G. L. Liedl, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 104, 1986.

- "Electronic and Magnetic Materials", P. Chaudhari, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 114, 1986.
- "Photonic Materials", J. Rowell, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 124, 1986.
- "Materials for Medicine", R. A. Fuller y J. J. Rosen, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 96, 1986.
- "National Facilities for Research in Physics of Condensed Matter", G. H. Vineyard y L. M. Falicov, en *Review of Scientific Instruments*, volumen 55, página 620, 1984.

Superconductividad:

- "Nobel Lecture in Physics 1987", J. Bednorz y K. A. Müller, en *Review of Modern Physics*, volumen 60, número 3, página 585, 1988.
- "Superconductivity: A Brief Introduction to its Phenomenology and Theories", L. M. Falicov, en *IEEE Journal of Quantum Electronics*, volumen 25, número 5, página 2358, 1989.
- "Physical Properties of High T_c Superconductors", editado por D. M. Ginsberg (World Scientific, Singapur, 1989).
- "Solid State Physics", volumen 42, editado por H. Ehrenreich y D. Tunubull (Academic Press, San Diego, 1989).

Estructuras Metaestables:

- "Phase Transitions under Shock Wave Loading", G. E. Duvall y R. A. Graham, en *Review of Modern Physics*, volumen 49, número 3, página 523, 1977.
- "Diamond Anvil Cell and High-Pressure Investigations", A. Jayaraman, en *Review of Modern Physics*, volumen 55, número 1, página 65, 1983.
- " C_{60} : Buckminsterfullerene", H. W. Kroto, J. R. O'Brien, R. F. Curl, y R. E. Smalley, en *Nature*, volumen 318, número 2, página 162, 1985.

Cuasi-cristales:

- "Quasicrystals", D. R. Nelson, en *Scientific American*, volumen 255, número 2, página 32, 1986.
- "The Physics of Quasicrystals", editado por P. J. Steinhardt y S. Ostlund (World Scientific, Singapur, 1987).

Estructuras artificiales:

- "Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures", editado por L. L. Chang and K. Ploog (Martinus Nijhoff, La Haya, 1985).
- "Nobel Lecture in Physics 1985", K. von Klitzing, en *Review of Modern Physics*, volumen 58, número 3, página 519, 1986.
- "The Quantized Hall Effect", B.I. Halperin, en *Scientific American*, volumen 254, número 4, página 40, 1986.
- "Integral Quantum Hall Effect for Nonspecialists", D. R. Yennie, en *Review of Modern Physics*, volumen 59, número 3, página 781, 1987.
- "Interfaces, quantum Wells, and Superlattices", editado por C. R. Leavens y R. Taylor (Plenum, Nueva York, 1988).
- "The quantum Hall Effect", 2a. edición, editado por R. E. Prange y S. M. Girvin (Springer-Verlag, Nueva York, 1990).

- "Theory of Semiconductor Superlattice Electronic Structure", D. L. Smith y C. Maihiot, *Review of Modern Physics*, volumen 62, número 4, página 173, 1990.
- "Surface, Interface and Thin-Film Magnetism", L. M. Falicov, D. T. Pierce, S. D. Bader, R. Gronsky, K. B. Hathaway, H. J. Hopster, D. N. Lambeth, S. S. P. Parkin, G. A. Prinz, M. Salamon, I. K. Schuller, y R. H. Victora, en *Jornal of Materials Research*, volumen 5, número 6, página 1299, 1990.

Sistemas Malformados:

- "Fractals: Form, Chance and Dimension", B. B. Mandelbrodt (Freeman, San Francisco, 1977).
- "Electronic Processes in Non-Crystalline Materials", N. F. Mott y E. A. Davis (Clarendon, Oxford, 1979).
- "Instabilities and Pattern Formation in Crystal Growth", J. S. Langer, en *Review of Modern Physics*, volumen 52, número 1, página 1, 1980.
- "The Fractal Geometry of Nature", B. B. Mandelbrodt (Freeman, San Francisco, 1983).
- "Ill-Condensed Matter", editado por R. Balian, R. Maynard, y G. Toulouse (North Holland, Amsterdam, 1984).
- "Disordered Electronic Systems", P. Lee y T.V. Ramakrishnan, en *Review of Modern Physics*, volumen 57, número 2, página 287, 1985.
- "Spin Glasses: Experimental Facts, Theoretical Concepts and Open Questions", K. Binder y A. P. Young, en *Review of Modern Physics*, volumen 58, número 4, página 801, 1986.
- "Fractal Growth", L. M. Sander, en *Scientific American*, volumen 256, número 1, página 82, 1987.
- "Neural Networks and Physical Systems with Emerging Collective Computational Abilities", J. J. Hopfield, en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, volumen 79, número 8, página 2554, 1982.

Sistemas anisotrópicos

- "Electronic Properties of Inorganic Quasi-One-Dimensional Compounds", editado por P. Monceau (Kluwer, Dordrecht, 1985).

- "Ordering in Two Dimensions", editado por S. K. Sinha, (North Holland, Amsterdam, 1980).
- "Physics in One Dimension", editado por J. Bernasconi y T. Schneider (Springer-Verlag, Berlin, 1981).
- "Electronic Properties of Two-Dimensional Systems", T. Ando, A. Fowler y F. Stern, en *Review of Modern Physics*, volumen 54, número 2, página 437, 1982.

Sistemas complejos:

- "Valence Fluctuation in Solids", editado por L. M. Falicov, W. Hanke y M. B. Maple (North Holland, Amsterdam, 1981).
- "Heavy Fermion Systems", G. R. Stewart, en *Review of Modern Physics*, volumen 56, número 4, página 755, 1984.
- "Organic Conductors and Semiconductors", editado por J. Ehlers, K. Hepp, R. Kippenhahn, H. A. Weidenmüller y J. Zittartz (Springer-Verlag, Berlin, 1977).
- "Advanced Polymers", E. Baer, en *Scientific American*, volumen 255, número 4, página 156, 1986.
- "Plastics that Conduct Electricity", R. B. Kaner y A. G. MacDiarmid, en *Scientific American*, volumen 258, número 2, página 60, 1988.
- "Solid State Physics", volumen 45, editado por H. Ehrenreich y D. Tunubull (Academic Press, San Diego, 1991).

Predicción "AB INITIO" de nuevos materiales:

- "Computers in Physics: An Overview", D. R. Hamann, en *Physics Today*, volumen 36, número 5, página 25, 1983.
- "Doing Physics with Computers: Condensed-Matter Physics", J. E. Hirsch y D. J. Scalapino, en *Physics Today*, volumen 36, número 5, página 44, 1983.
- "Monte Carlo Methods in Quantum Problems", editado por M. H. Kalos (Reidel, Dordrecht, 1984).