

BREVE HISTORIA DE LA FISICA DEL ESTADO SOLIDO

Por JOHN BARDEEN

Departamento de Física
Universidad de Illinois en Urbana-Champaign
Urbana, IL 61801 U.S.A.

1. *Introducción*

Con motivo de cumplirse cien años del nacimiento de Einstein el 14 de marzo de 1879, puede ser hora de reflexionar sobre los tremendos cambios producidos por las dos teorías revolucionarias del siglo xx, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Einstein logró contribuciones monumentales para el desarrollo de ambas teorías. Ellas han cambiado nuestro modo de ver el universo, con gran impacto en la filosofía, la ciencia y la tecnología. Daré una breve revisión de un aspecto de la revolución, el desarrollo de la física del estado sólido desde los comienzos de la era atómica a la vuelta del siglo.

A la física del estado sólido concierne la aplicación de la mecánica cuántica para comprender las propiedades de los materiales sólidos en términos de la disposición y movimiento de los átomos y electrones asociados que constituyen el sólido. Muchos sólidos comunes, tales como los metales, los minerales y las sales, están formados por agregados de microcristales en cada uno de los cuales los átomos van dispuestos en un orden periódico regular. Algunos, como los diamantes, son cristales únicos en los cuales reina el mismo orden periódico a través de todo el cristal. En los polímeros y en los vidrios no hay estructuras periódicas sino grados variables de orden local. A los fines de incluir tanto los líquidos como los sólidos, el campo es llamado frecuentemente física de la materia condensada.

El campo ha crecido muy rápidamente desde el fin de la II Guerra Mundial y es ahora la rama más extensa de la física. Durante la mayor parte de este período, el número de trabajadores se duplicaba más o menos cada cinco años. La investigación se efectúa en las universidades, institutos de investigación y laboratorios industriales a través del mundo, incluyendo firmas pro-

gramas en Venezuela. Han habido avances espectaculares tanto en comprensión científica como en las aplicaciones. Los conceptos desarrollados para entender las propiedades de los sólidos se han extendido y se han aplicado a otras áreas de la física, tales como la física de las partículas de alta energía, la física nuclear, la astrofísica y la biofísica.

La mayor parte de los materiales de uso común en la vida diaria, tales como metales, cerámica, plásticos y fibras, se ha desarrollado lentamente a través de los años, en su mayoría por métodos empíricos independientes de cualquier conocimiento de la constitución atómica. El progreso logrado en la comprensión de los sólidos a nivel atómico, ha hecho posible el diseño y fabricación de muchos novedosos materiales y dispositivos con propiedades nada comunes.

Las aplicaciones cubren un amplio espectro: la microelectrónica en la cual miles de componentes se hallan incorporados en un simple y pequeño cristal de silicio, materiales magnéticos para transformadores, cintas magnéticas y burbujas memorizadoras para computadoras, materiales luminiscentes para fuentes luminosas y exhibiciones, fotoconductores en máquinas copiadoras y cámaras, menudas fibras de vidrio que pueden transmitir miles de mensajes telefónicos en un rayo de luz, superconductores en electromagnetos, dispositivos muy sensitivos para detección y muchas cosas más. Los productos debidos a los avances en la física del estado sólido alcanzan a decenas de miles de millones de dólares por año.

En un campo cualquiera hay edades doradas durante las cuales los adelantos se hacen a paso rápido. En la física del estado sólido se destacan tres. Uno, los años iniciales del siglo presente, seguidos del descubrimiento del electrón, los rayos X, la energía cuántica de Planck y el átomo nuclear —los descubrimientos que anunciaron la era atómica. Los fundamentos del campo fueron firmemente establecidos durante un segundo período muy activo, aproximadamente desde 1928 hasta la mitad de los años treinta, que siguieron al descubrimiento de la mecánica cuántica. Esta da las leyes matemáticas que rigen el comportamiento de la materia fuera del núcleo del átomo, y de este modo describe en principio todo lo de la química y todo lo de la física del estado sólido. En la práctica no son posibles las soluciones exactas, excepto para los casos más simples y, para lograr progreso, debe uno estar capacitado para seleccionar las variables adecuadas y hacer las aproximaciones convenientes para describir las propiedades de los sólidos. La tercera edad dorada es la que sigue a la II Guerra Mundial en la cual ha habido progreso paralelo en el diseño y la preparación de materiales, en instrumentación y en la comprensión teórica. Daré unas pocas y breves ilustraciones de los primeros períodos y expondré luego el tercero con mayor detalle.

2. *Primeros años del siglo*

Con el descubrimiento del electrón se reconoció que los átomos están en parte constituidos por electrones. Drude y Lorentz surgieron que los átomos que forman un metal se ionizan y que los electrones liberados quedan libres para moverse y conducir electricidad y calor. Para la relación de la conductividad eléctrica a la termal se derivó una expresión que todavía es válida. Pero no se comprendió por qué esto no ocurre con todos los materiales, por qué en los semiconductores se ionizan solamente una pequeña fracción de los átomos y en los aisladores ninguno en absoluto.

La hipótesis del cuanto de Planck resolvió algunos puntos de controversia, pero para ese tiempo no existía teoría firme y sí muchas contradicciones internas. Fue Einstein quien ocupó el primer lugar al aplicar a los sólidos las ideas del cuanto. Para conmemorar el aniversario de su nacimiento, en todo el mundo se han celebrado muchas conferencias para honrar sus contribuciones. Recientemente asistí a una en el Instituto para Estudios Superiores en Princeton, donde él pasó los últimos veinticinco años de su vida.

Fue en una de sus famosas publicaciones en 1905 donde Einstein introdujo la idea de los cuantos de luz con energía proporcional a la frecuencia para explicar el efecto fotoeléctrico en los metales. Aunque para ese tiempo se disponía de pocos datos experimentales, Einstein predijo que la energía de los electrones emitidos cuando la luz cae sobre un metal, debía correr muy longitudinalmente con la frecuencia, no con la intensidad de la luz. Esta predicción fue posteriormente verificada en detalle por Millikan en la Universidad de Chicago. Según el trabajo de Planck, no resultaba claro si la hipótesis del cuanto era aplicable sólo a los fenómenos de emisión y absorción o, en cambio, como sugería Einstein, una onda de luz tiene por sí aspectos de partícula y permitía pensar que ella consiste en fotones con energía y momento. Por este trabajo, Einstein fue propuesto para el Premio Nobel.

Aunque los rayos X fueron ampliamente estudiados y usados en los años subsiguientes a su descubrimiento por Röntgen en 1896, no se sabía si eran partículas u ondas. En 1912, von Laue sugirió que si los rayos eran ondas de corta longitud, para la radiación podían usarse los cristales como rejillas de difracción. Pronto se observaron muestras de difracción de rayos X las cuales mostraban que esos rayos eran indudablemente una forma de luz con muy cortas longitudes de onda. Los Braggs, padre e hijo, convirtieron la difracción de los rayos X en un poderoso método para determinar el modo de disposición de los átomos en los cristales. Este método se ha desarrollado a través de los años de manera que ahora, con la ayuda de potentes computa-

doras, se puede determinar la estructura de cristales formados por moléculas tan complejas como las proteínas con centenares y aun millares de átomos.

Otro descubrimiento importante en los primeros años del siglo es el de la superconductividad de los metales, observada en 1911 por Kamerlingh Onnes en Leiden. En los superconductores los electrones fluyen sin rozamiento, de modo que al arrancar una vez una corriente en una bobina, fluirá indefinidamente sin batería u otra fuente cualquiera de energía (Fig. 1). Muchos metales y aleaciones muestran superconductividad cuando se enfrían a temperaturas muy bajas, incluso dentro de pocos grados del cero absoluto (-273°C o 0°K).

Onnes pensó en la posibilidad de construir un electromagneto con un bobinado superconductor y menciona esto en su conferencia Nobel en 1913. Pero en una nota al pie dijo que el ensayo fracasó porque en los materiales de que entonces disponía, se observó que la superconductividad era anulada por campos magnéticos de pocos centenares de gauss. Y fue sólo medio siglo más tarde, en 1961, cuando se encontraron materiales que soportan campos magnéticos muy grandes. Fue éste el descubrimiento que hizo posible los actuales magnetos superconductores, los cuales producen campos mucho más vastos que los producidos por magnetos con núcleo de hierro.

La superconductibilidad era uno de los misterios sobresalientes de la ciencia por casi medio siglo; ahora se la considera como uno de los fenómenos mejor conocidos del estado sólido.

3. *Aplicaciones de la teoría cuántica a los sólidos (1928-1935)*

No fue posible dar explicación racional de las propiedades de los sólidos hasta el descubrimiento de la mecánica cuántica por Heisenberg, Schrödinger y otros en 1926. De acuerdo con esta teoría, toda materia, electrones, protones, radiación, tiene a la par aspectos de partícula y de onda. La teoría fue pronto expuesta por dos de los principales teóricos, Pauli y Sommerfeld, para aclarar algunas de las discrepancias de la teoría anterior de Drude-Lorentz. Heisenberg desarrolló una teoría de ferromagnetismo basada en el espín electrónico. Pero la mayor parte de la teoría moderna de los sólidos fue establecida por estudiantes de veinte o pocos años más, en sus tesis de investigación sobre problemas planteados por profesores dirigentes. Muchos de estos estudiantes sobresalieron en sus estudios de física teórica y algunos han recibido Premios Nobel.

Gran parte de esta investigación aplicó la teoría de Bloch sobre bandas de energía en los cristales, fundamentada en las ondas electrónicas que se

mueven a través de una periódica rejilla del cristal. Desde este punto de vista se podían entender las diferencias de estructura electrónica entre metales, semiconductores y aisladores. En esos días hubo una gran actividad de los físicos en Europa. La gente joven tuvo la ventaja de trabajar con físicos teóricos eminentes en diversas universidades.

Fue hacia fines de esta segunda edad dorada, en 1933, cuando comencé a sentirme interesado en los problemas del estado sólido. Después de graduarme en ingeniería eléctrica y de trabajar varios años en geofísica, decidí emprender estudios graduados de física matemática en la Universidad de Princeton. Por ese tiempo, el Profesor Eugenio Wigner y un estudiante graduado, Frederick Seitz, aplicaban la teoría cuántica para calcular desde los primeros principios la estructura electrónica de los metales simples y la energía requerida para dividir un metal en sus átomos constituyentes. Dio esto la inicial comprensión de la trabazón metálica, diferenciable de la ligazón por la valencia par-electrónica de la química. Requería ello la solución del problema de muchos aspectos de grandes números de electrones de acción recíproca. Para el problema de mi tesis, proyecté los métodos en una superficie metálica y calculé la energía requerida para remover un electrón de un metal.

Con el descubrimiento del neutrón en 1932, hubo interés creciente por la física nuclear, la estructura del núcleo de un átomo. Muchos de los que habían estado laborando en los problemas del estado sólido, viraron hacia este nuevo campo. Echados los fundamentos, el período de rápida expansión de la teoría del estado sólido llegó a su final. La labor se prosiguió principalmente por los de la nueva generación, yo entre ellos.

Los logros de los años 1930 han sido resumidos por Seitz en un libro publicado en 1940. Este libro fue una biblia para muchas generaciones de físicos del floreciente estado sólido. Aunque el progreso en la comprensión fundamental fue considerable, generalmente hubo tan sólo un limitado acuerdo cualitativo entre la teoría y el experimento. Se debió esto no tanto a limitaciones de la teoría como a la falta de experimentos fundamentados en sistemas bien definidos. Muchas de las más importantes propiedades de los sólidos son lo que se ha denominado estructura sensitiva, o sea, que esas propiedades dependen principalmente de la presencia de pequeñas concentraciones de impurezas u otros defectos en la rejilla del cristal. Las propiedades de la estructura sensitiva incluyen resistencia mecánica, conducción eléctrica en los semiconductores, fotoconductividad, luminiscencia y otras muchas. Por ejemplo: el hierro puro es muy blando, pero la adición de pequeñas cantidades de carbono le dan la resistencia del acero. Estas propiedades sensitivas de la

estructura no fueron bien comprendidas desde el punto de vista teórico ni desde el experimental.

Aunque las oportunidades para la investigación estuvieron limitadas durante la guerra, hubo progreso importante en unas pocas direcciones. Una de ellas fue el desarrollo del silicio y del germanio. Para su uso con “bigotes-de-gato” metálicos (hilos del detector de cristales) como detectores para el radar. Estos elementos son semiconductores cuya aptitud para conducir electricidad depende sensitivamente de la impureza de los elementos presentes. Se logró una iniciación en el conocimiento de la naturaleza de estas impurezas y el modo de controlarlas. Hubo también progreso importante durante los años de la guerra sobre materiales magnéticos y resistencia mecánica.

4. *Período de post-guerra, el transistor*

Después de la guerra, el campo de la física del estado sólido estaba maduro para la explotación. Estaban echadas las bases para la comprensión teórica y había un punto de partida para el entendimiento y el control de las propiedades de la estructura sensitiva. Entre otros lugares esto fue reconocido en los laboratorios de los Teléfonos Bell donde se organizó un grupo de investigadores integrado por físicos y químicos e incluso por teóricos con una comprensión de la teoría cuántica de los sólidos. Me uní entonces a ese grupo a fines de 1945. Por medio de interacciones con Walter Brattain y William Shockley llegué a interesarme en los semiconductores, una de las diversas áreas en que el grupo estaba comprometido.

Una meta de largo alcance del grupo era hacer componentes electrónicos nuevos o perfeccionados, con la aspiración lejana de construir un dispositivo amplificador para reemplazar el tubo de vacío. Shockley había señalado que en principio era posible hacer un amplificador usando flujo electrónico en un semiconductor más bien que en un vacío, pero los intentos prácticos para realizarlo habían fracasado. En parte para tratar de entender las razones del fracaso, decidimos iniciar un programa básico en semiconductores con labores tanto en volumen como en propiedades de superficie. Nos concentramos en el germanio y el silicio, porque siendo elementos más bien que compuestos, sus propiedades eran más accesibles a la comprensión y al control.

Esencialmente un dispositivo amplificador es una válvula eléctrica para regular el flujo de corriente entre dos contactos por voltaje aplicado a un tercer contacto. La insinuación de Shockley acerca de un amplificador semiconductor se fundaba en un campo eléctrico aplicado en sentido transversal a un semiconductor, en forma de película delgada cuya base lleva ahora el nombre de transistor de efecto del campo.

En el curso del programa de investigación básica, Brattain y yo descubrimos un segundo modo de hacer un amplificador. Descubrimos que por el flujo de corriente de un contacto adecuado, la concentración de electrones para conducción puede ser alterada. Este es el principio del transistor bipolar. Aplicado primero al transistor punta-contacto (Figs. 2 y 3), se usa ahora en la configuración de la conexión de transistor sugerida por Shockley.

Hacer con éxito transistores de efecto de campo y conexión requería proezas de los materiales de ingeniería. Tenía uno que aprender a hacer cristales simples de silicio y germanio esencialmente libres de defecto y con las impurezas reducidas al promedio de una parte por billón y aun menos (Fig. 4). Había luego que introducir elementos extraños (adulterantes) en cantidades reguladas en regiones cuyo tamaño está limitado sólo por la longitud de onda de luz \sim unos pocos micrómetros. El progreso fue rápido; cada año o dos parecía traer un súbito descubrimiento en creciente ejecución. A través del trabajo de gran número de personas, surgió gradualmente la microelectrónica moderna en la cual miles de transistores con montaje asociado están colocados en una pequeña astilla de un simple cristal de silicio. El estado del arte ha sobrepasado cuanto hubiéramos creído posible para el tiempo del descubrimiento inicial. Produjo una revolución en electrónica.

Algunos de los pasos importantes en el crecimiento de la tecnología del semiconductor son:

a) Transistor de punta de contacto (o puntal)	1948
b) Desarrollo de cristales únicos, refinamiento de zona	1949
c) Transistor de uniones (o conexiones)	1951
d) Auxiliares auditivos, radios	1952
e) Transistor de silicio	1954
f) Tecnología planar	1960
g) Circuitos integrados (IC)	1962
h) Semiconductor metal-óxido (MOS) transistor de efecto de campo	1965
i) Integración en gran escala (LSI)	1968
j) Microprocesador ("computadora en una astilla")	1971
k) Integración en muy grande escala (VLSI)	1978

El número de componentes que pueden ponerse en una astilla ha venido duplicándose cada uno o dos años durante más de una década y este crecimiento parece continuará bien entrada la próxima década. Las Figs. 4 a 7 ilustran algunos de los pasos y progresos hechos.

Han surgido muchas otras aplicaciones de los semiconductores, las que incluyen rectificaciones de energía, dispositivos luminiscentes (incluso lasers), células solares y detectores para varios tipos de radiación. Estas aplicaciones también requirieron poner bajo control las propiedades elusivas de la estructura sensitiva.

El trabajo en monocristales preparados cuidadosamente ha caracterizado también la investigación de post-guerra en otras áreas de la física del estado sólido, con interacción íntima entre la teoría y el experimento. Hay ahora un detallado acuerdo cuantitativo para muchos fenómenos. Han surgido métodos experimentales nuevos y adelantos en la instrumentación, muchos de ellos dependientes de un progreso avanzado sobre el estado sólido. Como ejemplo está el microscopio electrónico del profesor Fernández Morán el cual permite ver estructuras hasta un nivel molecular. El microscopio utiliza magnetos superconductores para enfocar el rayo de electrones.

5. Cambios de fase. Superconductividad

Otra tendencia de los años de post-guerra ha sido la comprensión creciente de los aspectos colectivos de grandes números de partículas de acción recíproca en un sólido o en un líquido. La materia condensada experimenta diversos cambios de fase de líquido a sólido, de magnético a no magnético, de metálico a semiconductor o aislante, de conducción normal a superconducción, etc. Estos campos están caracterizados por un creciente grado de orden en temperatura decreciente. Se ha observado que los cambios de fase tienen muchos aspectos comunes los cuales dependen principalmente de la dimensionalidad del sistema: cadenas unidimensionales, capas bidimensionales, líquidos o sólidos tridimensionales.

Uno de los problemas más enigmáticos ha sido la naturaleza de la regla que da origen a las notables propiedades de un superconductor. L. N. Cooper, J. R. Schrieffer y yo señalamos que la superconductividad es esencialmente un fenómeno cuántico y que los electrones de los superconductores manifiestan fenómenos cuánticos en una escala macroscópica más bien que en la escala de los átomos o moléculas. Los electrones en un metal superconductor se comportan como si estuvieran en un solo amplio sistema cuántico. Las corrientes a las cuales se permite fluir en un anillo superconductor (Fig. 1) se cuantizan de un modo tal que el flujo magnético total que enhebra el anillo, es un múltiplo integral de una pequeña unidad de flujo. La dificultad para cambiar este estado colectivo explica el hecho de que la dispersión de electrones no causa resistencia como lo hace en metales normales.

Los aspectos cuánticos se utilizan para hacer los dispositivos de detección más sensitivos para voltajes, corriente y campos magnéticos. Se están

realizando investigaciones sobre componentes de una computadora superconductor que son mucho más veloces y requieren mucho menos energía que las basadas en semiconductores. Aparte de los magnetos superconductores, las posibles aplicaciones en gran escala incluyen generadores superconductores y líneas subterráneas de transmisión.

Otro ejemplo interesante es un cambio relacionado de fase en helio líquido de masa isotópica tres. El helio es el más liviano de los gases raros y el que posee el punto más bajo de ebullición: cerca de cuatro grados sobre el cero absoluto, o 4 °K. En el átomo de helio hay solamente dos electrones fuera del núcleo los cuales forman una concha cerrada. El helio es químicamente inerte con una simple fuerza radial entre átomos de helio, de atracción en distancias grandes y de repulsión en las pequeñas. Por esto pudiera esperarse que el helio líquido tuviera propiedades simples, pero este no es el caso. El isótopo común del helio de masa cuatro obedece a las estadísticas de Bose y se torna superfluido cuando se le enfría a unos 2,2 °K. El isótopo de masa tres obedece a las estadísticas Fermi como los e'ectrones en los metales, y se convierte en un superfluido con estructura muy compleja cuando se le enfría a unos 10^{-3} °K. La superfluidez y la estructura compleja pueden explicarse por una extensión de la teoría de la superconductibilidad en los metales. Esto brinda la esperanza de que el mundo muy complejo en que vivimos tiene una simple estructura subyacente. Se han hecho progresos en la identificación de la subestructura de neutrones y protones y otras partículas de la física de alta energía, con ayuda de conceptos derivados de la superconductividad.

7. *Observaciones finales*

He presentado unos pocos relieves del notable desarrollo de la física del estado sólido. Podemos comparar su crecimiento con el de un árbol frutal. La semilla fue sembrada en los primeros años del siglo. Germinó y la planta empezó a crecer vigorosamente en los años que siguieron al descubrimiento de la mecánica cuántica en 1926. Tardó, sin embargo, algunos años antes de madurar lo suficiente para dar frutos. La primera cosecha real no ocurrió hasta los años que siguieron a la II Guerra Mundial. El árbol siguió creciendo rápidamente y proyectando muchas ramas nuevas y cada año trajo una cosecha creciente. Ya el árbol está sazonado y no crece tanto como en su juventud pero todavía está vigoroso y sano. Cada año brinda nueva cosecha de descubrimientos y adelantos en las aplicaciones. Algunas ramas pueden estar muriendo, pero otras están creciendo y proyectando vástagos nuevos en diversas direcciones. Podemos esperar que produzca frutos en muchos años venideros.

