

LA  
MECÁNICA  
CUÁNTICA  
EN MÉXICO

*María de la Paz  
Ramos Lara  
coordinadora*



servatorio de San Pedro Mártir. Este observatorio está localizado en uno de los cuatro mejores lugares del mundo para realizar observaciones ópticas e infrarrojas; los otros tres se encuentran en las islas de Hawái, las islas Canarias y República de Chile.

## BIBLIOGRAFIA

- Bartolucci, Jorge, 2000, *La modernización de la ciencia en México: El caso de los astrónomos*, México, Plaza y Valdés Editores.
- Peimbert, Manuel, 1983, "The Astronomy of Guillermo Haro", *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 7, 15.
- , 1997, "The contributions of Guillermo Haro to the study of faint blue objects", en A. G. D. Philip, J. W. Liebert y R. A. Saffer (eds.), *The Third Conference on Faint Blue Stars*. Shenectday, Nueva York, L. Davis Press, 347.
- , 2000, *Fronteras del Universo*, incluye nueve capítulos escritos por: Julieta Fierro, Miguel Ángel Herrera, Silvia Torres-Peimbert, Miriam Peña, Luis Felipe Rodríguez, Dany Page, J. Jesús González y Manuel Peimbert, México, FCE (La Ciencia para Todos, 176).
- Rodríguez, Luis Felipe, 2000, "La astronomía en México. El pasado reciente y los retos del futuro", en A. Menchaca (coord.), *Las ciencias exactas en México*, México, FCE.

## LA MECÁNICA CUÁNTICA EN MÉXICO DESDE LA CIENCIA DE MATERIALES

RUBÉN G. BARRERA\*

Estamos celebrando el primer centenario de la formulación de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica es la teoría física que describe la dinámica del mundo microscópico y representa uno de los logros más impresionantes del intelecto humano. Las repercusiones que ha tenido la comprensión del mundo microscópico a través de la mecánica cuántica han sido muy significativas, ya que esta nueva comprensión ha transformado por completo diversas áreas de la ciencia, ha creado nuevas disciplinas del saber y ha revolucionado las aplicaciones tecnológicas, a tal grado, que ahora nos sería difícil imaginar a nuestra propia cultura sin la omnipresencia de dicha tecnología.

En este trabajo presentaré, primeramente, mi visión sobre el significado de los materiales en la conformación de nuestra civilización, posteriormente apuntaré algunos de los impactos más significativos de la mecánica cuántica en la ciencia de materiales y, finalmente, haré unas reflexiones sobre el estudio de los materiales en México.

Comenzaremos con el concepto de materia, y digamos que materia es todo lo que nos rodea, es todas las cosas tanto vivas como inanimadas; la totalidad de los seres vivos, la totalidad de las estrellas y nebulosas, del polvo interestelar y de todo lo que compone nuestra tierra y la de todos los demás planetas; la materia es todo. Por otro lado, se encuentran las fuerzas que esta materia produce y que actúan sobre la materia misma produciendo su movimiento. En nuestra visión actual estas fuerzas se propagan a través del espacio con una velocidad dada, y uno de los ejemplos más evidentes de la propagación de estas fuerzas es la luz. Por ejemplo, la luz de una estrella es la sensación que se produce en nuestra retina debida a las fuerzas producidas por las partículas cargadas que componen la estrella.

\* Instituto de Física, UNAM.

Estas fuerzas viajan durante varios años a través del espacio a una velocidad de 300 000 kilómetros por segundo, antes de llegar a la Tierra y excitar nuestra retina. La física es la disciplina del saber humano que se encarga de comprender y formular las leyes fundamentales que rigen la generación y propagación de las fuerzas producidas por la materia y de los movimientos que estas fuerzas producen sobre la materia misma.

#### LOS MATERIALES

Un concepto muy distinto es el de los materiales. Los materiales son un concepto íntimamente ligado a nuestra civilización. Tan ligados están a nuestra civilización que los historiadores dividen las distintas etapas del desarrollo de la raza humana en nuestro planeta de acuerdo a los materiales que utilizaban. Así, se llama Edad de Piedra a ese periodo en el cual el material utilizado por la humanidad para fabricar sus casas y templos, sus utensilios de caza y cocina, sus armas y elementos decorativos, era, esencialmente, la piedra. Este periodo abarca desde los albores de la humanidad, hace unos 2 millones de años, hasta finales del neolítico, hace unos 4 mil años. Como vemos, es la piedra el material que comienza a moldear las características de nuestra civilización, y tenemos como testimonio, por ejemplo, las grandes pirámides construidas por muy diversas culturas. Se concibe además, como un signo de progreso, la habilidad de poder manejar otro tipo de materiales cuyo dominio requiere de técnicas cada vez más sofisticadas; y tenemos así, que a la Edad de Piedra le sigue la Edad de los Metales. Y esta Edad de los Metales se subdivide a su vez en la Edad de Cobre (4000-3000 a.C.), la Edad de Bronce (3000-1200 a.C.) y finalmente la Edad de Hierro (1200 a.C. -1900 d.C.). Como vemos, es primeramente la habilidad de poder sacar el metal de las entrañas de la tierra y después de poder procesarlo para fabricar armas y utensilios. Es un signo de progreso el poder posteriormente hacer aleaciones, como el bronce, que hacen del metal un material más resistente. Finalmente, como un signo de un progreso aún más avanzado está la fabricación de aleaciones cada vez más refinadas, como el hierro y el acero, que hicieron posible la fabricación de espadas, lanzas, vehículos, barcos, cañones y una gran variedad de herramientas y utensilios, que han dado un signo muy

distintivo a nuestra civilización. Siguiendo este concepto mediante el cual se caracteriza a una cultura por el dominio y manejo de un cierto tipo de materiales, podríamos ver el choque entre las culturas americanas y la de los conquistadores europeos, como el choque entre una cultura que iniciaba la Edad de Bronce contra otra que estaba en plena Edad de Hierro. Es interesante percatarse de cómo los símbolos mismos de una cultura pueden estar plasmados en edificios, armas o utensilios construidos con un determinado material. Nadie podría negar que la torre Eiffel y el Empire State no sólo son símbolos de la ciudad de París y de la ciudad de Nueva York, sino también son símbolos de los finales de la Edad de Hierro.

Si bajo esta misma óptica nos preguntáramos ahora a qué Edad pertenece nuestra actual civilización, yo me atrevería a sugerir que estamos ya en plena Edad del Silicio o Edad de los Semiconductores, porque son precisamente el silicio y, en general, los semiconductores, los materiales que están detrás de la revolución informática y los verdaderos representantes de nuestra civilización. A veces resultaría imposible concebir el funcionamiento de las sociedades modernas sin la omnipresencia de los "chips" de silicio o de arseniuro de galio, en las entrañas de las computadoras. Y hasta resulta irónica la existencia de un valle sagrado: el Silicon Valley de California, en donde se produce una gran parte de los misteriosos "chips".

Pasemos ahora a reflexionar sobre los conocimientos que han sido necesarios para poder dominar y manejar un cierto tipo de material. En lenguaje moderno diríamos que las propiedades físicas de la piedra necesarias para su manejo fueron, esencialmente, las mecánicas, y entre éstas, las propiedades de resistencia y deformación, de plasticidad y de ruptura. Para los metales, además de las propiedades mecánicas, fue necesario también tener el conocimiento de las propiedades térmicas, como por ejemplo, las propiedades de conducción de calor, la determinación de los puntos de fusión y sublimación, y la generación de metales con nuevas características a través del proceso de aleación o la formación de soluciones sólidas.

Quiero ahora plantear otro aspecto importante sobre estos conocimientos y que para el objetivo de esta presentación resulta fundamental: el proceso de adquisición del conocimiento. Este proceso ha tenido, indudablemente, un desarrollo que va de la mano con el crecimiento de la humanidad. Podemos pensar que en los albores de la humanidad, la adquisición del conocimiento se hacía de manera totalmente empírica, envuelto, la mayoría de las veces, en los mantos

de la magia o de la religión. Eran los brujos y los sacerdotes los depositarios y los reguladores del conocimiento. Este tipo de proceso y de actitud ante el conocimiento siguió patrones muy similares entre muchas de las culturas anteriores a la nuestra. Baste recordar que en una plaza de la ciudad de Roma se encuentra actualmente una estatua de Giordano Bruno como un recuerdo sofocante de su sacrificio.

Un parte aguas en el proceso de adquisición del conocimiento es, indudablemente, la aparición de la ciencia. Y son los nombres de Galileo Galilei y sir Isaac Newton los que simbolizan una nueva actitud ante el saber. Esta nueva actitud se basa, por un lado, en la idea de diseñar sistemáticamente experimentos y cotejar nuestras intuiciones y deducciones con los resultados experimentales y, por otro lado, en la introducción de las matemáticas como un lenguaje y una herramienta, a la vez, que sirve de guía en el proceso deductivo.

Con la aparición de la ciencia se definen también las nuevas áreas del conocimiento; tenemos así a la física y a la química: la primera encargada del estudio y comprensión de las propiedades de la materia, y la segunda encargada de comprender sus transformaciones. De esta manera, hablamos de áreas de la física concentradas en la comprensión de distintas propiedades de la materia, y hablamos así de áreas encargadas del estudio de las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, reológicas, etcétera.

Es indudable que la aplicación de los conocimientos de la nueva ciencia al dominio y manejo de los materiales dio frutos con sabores muy variados. Por ejemplo, fue posible manejar diestramente el acero para la construcción de grandes edificios y de motores que impulsaran vehículos tanto sobre la tierra como sobre el mar, pero también esto dio lugar a la construcción, con un sabor definitivamente amargo, de bombas y cañones de gran diámetro y gran alcance. Aparecen también otras áreas del conocimiento, como el estudio de las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales. Este nuevo proceso de conocer dio lugar a una gran diversidad de aplicaciones que esculpieron el rostro de nuevas culturas y de una nueva civilización.

#### LA MECÁNICA CUÁNTICA

Pero dentro de todo esto, ¿dónde y cuándo aparece la mecánica cuántica?, y ¿qué repercusiones tuvo y ha tenido con relación al dominio

y manejo de nuevos materiales? Pues bien, la mecánica cuántica aparece hace exactamente cien años, para sacar a la física de una crisis caracterizada por la presencia indudablemente molesta de resultados y fenómenos sin explicación. Hay que recordar solamente los siguientes problemas: la explicación de las líneas de absorción en gases, la comprensión de la diferencia entre un conductor y un aislante, y la radiación del cuerpo negro. Este último problema consistía en poder explicar el espectro del campo electromagnético cuando éste se encuentra en equilibrio termodinámico a una cavidad a temperatura  $T$ . Se sabe que la distribución espectral es independiente de la naturaleza del material en donde se cava la cavidad. Para resolver este problema Planck se ve forzado a introducir la relación  $E=h\nu$ , en donde  $E$  es la energía,  $\nu$  la frecuencia del campo electromagnético, y  $h$  es una constante universal llamada "constante de Planck". Y es con esta relación con la que se inicia una de las aventuras más audaces del intelecto humano: la mecánica cuántica.

Pero, ¿qué es la mecánica cuántica? y ¿por qué es tan importante y tan audaz? Para entender su importancia y su significado tendremos que situarnos a finales del siglo XIX cuando se estaba conformando lo que hoy llamamos "la visión molecular de la materia". Según esta visión toda la materia está compuesta por átomos o moléculas y los átomos o moléculas están compuestos, a su vez, por partículas microscópicas: un núcleo con carga positiva y un conjunto de electrones con carga negativa "girando" a su alrededor. El programa conceptual de la visión molecular consistía en poder explicar todas las propiedades macroscópicas de la materia en términos de las propiedades de los átomos. Por ejemplo, los conceptos de presión, calor, temperatura y corriente eléctrica deberían tener un equivalente en términos de átomos y moléculas en movimiento. Pues bien, la mecánica cuántica se crea con el fin de establecer las leyes que rigen el movimiento de las partículas microscópicas. Se encuentra, que mientras las partículas macroscópicas obedecen las leyes de la mecánica clásica, es decir, las leyes de la mecánica propuestas por Newton para explicar el movimiento de los astros, las partículas microscópicas obedecen unas nuevas leyes; las rige una nueva mecánica. La diferencia esencial entre las dos mecánicas es que mientras en la mecánica clásica el movimiento de una partícula se describe dando su posición  $r(t)$  a cada instante  $t$ , en la mecánica cuántica el concepto de posición se pierde y el movimiento de la partícula se describe sólo en términos probabilísticos a través de la llamada función de onda

$\psi(r,t)$ . La función de onda es una cantidad compleja, es decir, que tiene una parte real y otra imaginaria, y su interpretación física está dada en términos de su cuadrado hermitiano  $|\psi(r,t)|^2$ . El cuadrado hermitiano  $|\psi(r,t)|^2$  significa la densidad de probabilidad de encontrar a la partícula en el punto  $r$  al tiempo  $t$ . Esta necesidad de acudir a la probabilidad para describir el movimiento de las partículas, dio lugar a acaloradas discusiones de carácter filosófico en donde se cuestionaba la necesidad de romper con los principios deterministas y se discutía la interpretación misma de la función de onda.

Por ejemplo, de acuerdo a la mecánica cuántica, los electrones en un átomo se localizan, dependiendo de su energía, en distintas zonas del espacio llamadas "orbitales". Las orbitales describen, cuantitativamente, la probabilidad de encontrar a la partícula en el espacio. Por otro lado, la energía que puede tener un electrón en un átomo está restringida a unos ciertos valores discretos o cuánticos, y es esta restricción a valores discretos o cuánticos de la energía lo que da origen a la denominación de la nueva mecánica como mecánica cuántica.

Ahora, aunque pueda parecer un poco técnico, quisiera que vieran cómo se ve la ecuación que rige el comportamiento de la función de onda; ésta luce así:

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right) \Psi_n(r,t) = E_n \Psi_n(r,t),$$

Esta ecuación fue propuesta por el físico austriaco Erwin Schrödinger en 1927. Aquí  $\nabla^2$  es un operador diferencial llamado laplaciano,  $m$  es la masa de la partícula,  $V(r)$  es el potencial asociado al campo de fuerzas que actúa sobre la partícula,  $E_n$  son los valores permitidos de la energía y  $\psi_n$  son la función de onda del estado cuántico  $n$ , en donde  $n$  representa una colección de números y letras que denotan al estado dinámico de la partícula y que se conocen como números cuánticos. Aparece también la constante, conocida como *hache barra*, y que no es otra cosa que la constante de Planck  $h$ , dividida entre  $2\pi$ .

En la figura 1 aparecen las orbitales correspondientes a los estados de energía más baja de un electrón en el átomo de hidrógeno. Estas orbitales corresponden a los estados que se conocen como el 1s, 2p y 3d. En esta figura, una mayor intensidad en el sombreado

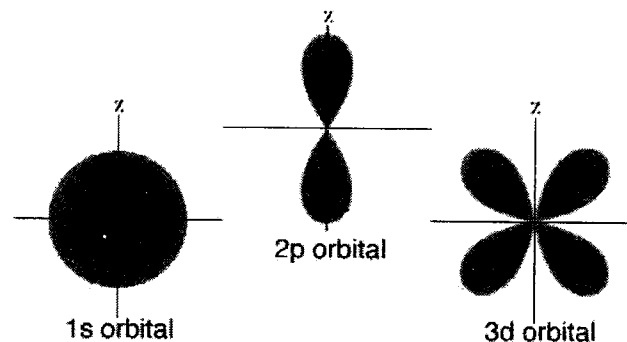


Figura 1. Orbitales 1s, 2p y 3d del electrón en el átomo de hidrógeno

indica una mayor probabilidad de encontrar al electrón. El estado 1s es esféricamente simétrico y es el estado de energía más baja, al que también se llama "estado base".

La ecuación que hemos escrito arriba es la llamada ecuación de Schrödinger independiente del tiempo, y con una gran semejanza con la llamada ecuación de onda. La ecuación de onda describe la propagación de una gran diversidad de ondas, ya sean éstas de origen electromagnético, acústico, o de cualquier otro. Debido a esta semejanza, a la nueva mecánica se le conoce también como mecánica ondulatoria.

Para la mecánica ondulatoria, los electrones en los átomos tienen sólo la posibilidad de ocupar ciertos niveles o estados discretos de energía. Además, existe otro principio cuántico, conocido como el Principio de Pauli, que afirma que en cada nivel de energía sólo pueden acomodarse dos electrones: uno con espín arriba y otro con espín abajo. El electrón, además de tener carga eléctrica negativa, tiene un momento magnético, es decir, además de ser una partícula con carga eléctrica, se comporta, en presencia de campos magnéticos, como un pequeño imán. Este momento magnético está asociado al momento angular intrínseco del electrón, llamado comúnmente espín (del inglés *to spin*, que significa girar). De acuerdo con la mecánica cuántica el espín del electrón también está cuantizado y sólo puede tomar dos valores, que se denominan espín arriba y espín abajo. Por lo cual, si se tiene un átomo con un conjunto de niveles de energía como los que se muestran en la figura 2, y se tienen 14

14 electrones, éstos “llenarán” los primeros siete niveles de energía, con dos electrones en cada nivel. Pero, ¿por qué sólo pueden estar dos electrones en cada nivel? La respuesta a esta pregunta está todavía abierta y lo más interesante de la mecánica cuántica es, precisamente, la descripción que se hace de la dinámica de un conjunto de partículas. Cuando se tiene un sistema con más de una partícula aparece un fenómeno denominado “correlación cuántica” y que divide a las partículas en dos grandes grupos, denominados fermiones y bosones. Por ejemplo, los electrones son fermiones y tienen la característica, por el simple hecho de ser fermiones, de no poder aproximarse los unos a los otros sin que esto sea causado por algún campo de fuerzas con algún tipo de naturaleza física. Es una especie de movimiento correlacionado entre los electrones, que existe desde el Big Bang, y que se describe matemáticamente a través de las propiedades de simetría de la función de onda asociada al conjunto. Es decir, que aun en ausencia de fuerzas existe “algo” que previene a los fermiones de acercarse entre ellos, y no sabemos, a ciencia cierta, cuál es la naturaleza física de ese “algo”. Se puede demostrar también, que esta extraña correlación en la dinámica de los electrones tiene como consecuencia el principio de Pauli, es decir, el hecho de que sólo dos electrones puedan acomodarse en cada nivel atómico. Por otro lado, lo opuesto ocurre para los bosones, y en éstos la correlación cuántica tiende a acercarlos. En mi opinión, éstos son los hechos más fundamentales y distintivos de la mecánica cuántica y los

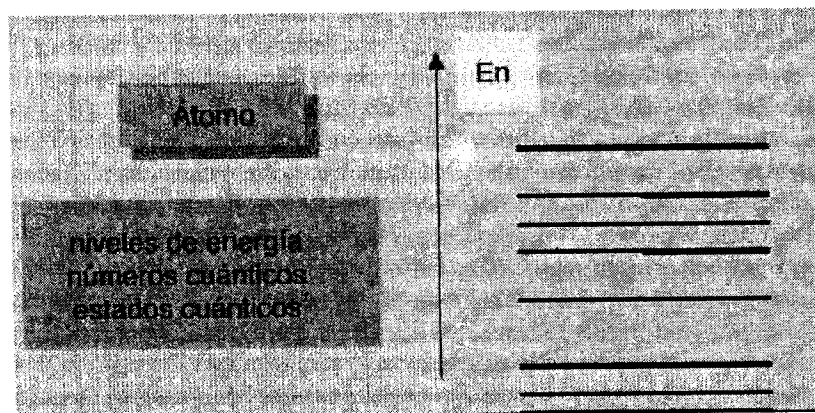


Figura 2. Niveles de energía

que hacen posible la descripción molecular de muchas de las propiedades de la materia.

Como vemos, la descripción cuántica del movimiento de las partículas microscópicas es muy diferente a la descripción que haría la mecánica clásica, y el comportamiento de un conjunto de electrones alrededor de un núcleo cargado está muy lejos de parecerse al de un conjunto de planetas alrededor del Sol. Aunque este modelo planetario aparezca con frecuencia en los logotipos de las instituciones dedicadas a la física atómica y nuclear.

Volviendo a los inicios de la mecánica cuántica, uno de los primeros grandes éxitos de la nueva mecánica fue la explicación de las líneas de absorción en gases. Al pasar la luz a través de un gas sucede que no todas las frecuencias son absorbidas; de todo el continuo de frecuencias del espectro luminoso sólo algunas de esas frecuencias son absorbidas. En los espectros de absorción estas frecuencias aparecen como líneas discretas, y se llamaron líneas de absorción. Por otro lado, cada elemento tenía su propio conjunto de líneas que lo identificaba de manera única, era una especie de credencial de identidad. En la figura 3 mostramos algunos de esos espectros. Era difícil explicar por qué los distintos átomos absorbían de manera tan selectiva y tan propia. Sin embargo, con la nueva mecánica se concebía a los electrones en los átomos ocupando los niveles de energía más baja y dejando libres los de energía más alta. La interacción de la luz con el sistema atómico hacía que los electrones se “excitaran”, es decir, la luz les brindaba la energía suficiente para pasar a un nivel desocupado de energía más alta. Pero estos “brincos” de unos niveles a otros requerían de la energía correspondiente a la diferencia de energía entre niveles, y estas diferencias eran necesariamente discretas y dependían del espectro de niveles de cada átomo. Por consiguiente, sólo la luz con esa diferencia de energía era capaz de ceder esa energía al sistema atómico, y por tanto ser absorbida. Usando ahora la relación de Planck,  $\Delta E = h\Delta\nu$  concluimos que esa diferencia de energía  $\Delta E$  correspondía, no a una determinada intensidad sino a una determinada frecuencia  $\Delta\nu$  del campo electromagnético. Bajo esta nueva visión, los espectros de líneas de absorción identificaban a los distintos átomos a través de la excitación electrónica en sus muy particulares espectros de niveles de energía. Todo empezaba a aclararse.

Volviendo ahora a las propiedades de la materia en estado sólido recordemos, que antes de la mecánica cuántica, había una serie de problemas abiertos extremadamente importantes. Por ejemplo, no



Figura 3. Líneas de absorción

se tenían modelos que explicaran la diferencia entre un aislante, un metal, un semiconductor y un superconductor. En realidad, se sabía poco sobre el transporte de la corriente eléctrica en los distintos tipos de materiales. Tampoco se sabía por qué un material era de un cierto color o por qué un material era transparente y el otro era opaco, lo que hoy llamamos las propiedades ópticas de los materiales. Las propiedades magnéticas de la materia era también un área completamente inexplorada; el saber por qué ciertos materiales eran ferromagnéticos y otros no, o cuál era la diferencia, en el nivel molecular, entre el magnetismo de los metales y el de los aislantes, o si había una relación entre las propiedades magnéticas y las eléctricas. En fin, se tenía una amplia y diversa evidencia experimental sobre las diferentes propiedades físicas de los materiales que requerían de una explicación, y esta explicación debería darse dentro de la nueva visión molecular de la materia. El programa que se iniciaba, y que se llevaría a cabo durante todo el siglo XX, era el de explicar todas, absolutamente todas las propiedades de la materia, en términos de las propiedades de los átomos y las moléculas que la conforman. En este sentido, el tener una descripción precisa de la dinámica de las partículas microscópicas en presencia de fuerzas externas, era indispensable. Y éste era el papel fundamental que jugaría la nueva mecánica cuántica.

Lo que es realmente sorprendente es la rapidez con la que se dio el proceso de aplicación y asimilación de la nueva mecánica al entendimiento y comprensión de la materia. La ecuación de Schrödinger sale a la luz en 1927, y en un periodo de unos cuantos años, aparecen dos libros de texto en donde se exponen, con lujo de detalle, aplicaciones muy diversas de la mecánica cuántica a dos grandes ra-

mas de la física moderna: la física atómica y molecular y la física del estado sólido. Estos libros aparecen en los años 30, uno es *Sobre la naturaleza de la ligadura química* de Linus Pauling y el otro *La teoría moderna de los sólidos* de Frederick Seitz. Ambos autores trabajaban como profesores en universidades norteamericanas. Para esta época, el centro de gravedad de la física internacional comenzaba a trasladarse de Europa a Estados Unidos. En el libro de Seitz aparece el tratamiento cuántico de muchas de las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas, eléctricas y magnéticas de los materiales.

La diferencia esencial entre la física atómica molecular y la física del estado sólido, es que mientras la física atómica es un problema de pocos electrones moviéndose en el campo de fuerzas de los núcleos atómicos, la física del estado sólido es un problema de muchos electrones moviéndose en el campo de fuerzas producido por los iones de la red cristalina. Ahora bien, cuando digo muchos, quiero decir varios miles de trillones. Siendo la física el arte de las aproximaciones, el arte de saber lo que es grande y lo que es chico, el problema técnico que enfrenta la física del estado sólido es el de diseñar las aproximaciones adecuadas para poder resolver la ecuación de Schrödinger para un número tan grande de partículas. Desde un punto de vista más técnico, diríamos que la comprensión de las propiedades físicas de los materiales está ligada a lo que se conoce como la mecánica cuántica de muchos cuerpos. En la mecánica cuántica de muchos cuerpos, la función de onda no sólo depende de la posición  $r(1)$  de la partícula 1, sino que depende de la posición de todas las partículas  $r(1)$ ,  $r(2)$  hasta  $r(n)$ , en donde  $n$  puede ser del orden de trillones. Es esta dependencia de la función de onda en las coordenadas de un conjunto de muchas partículas lo que da origen a lo que llamamos anteriormente, la correlación cuántica, que es uno de los aspectos más interesantes y fascinantes de la mecánica cuántica. Son las propiedades de simetría de la función de onda de muchas partículas, ante el intercambio de dos de ellas, lo que diferencia a los fermiones de los bosones. Y el hecho de que los electrones sean fermiones será lo que nos va a brindar una bella explicación de la diferencia que existe entre el comportamiento de un aislante y un conductor.

Durante la primera parte del estudio cuántico de los sólidos se estudiaron las propiedades del cristal infinito, posteriormente se trataron los problemas relacionados con la existencia de superficies, interfaces y defectos, después se trataron los efectos del desorden en

sólidos no-cristalinos y actualmente se analizan las propiedades de sistemas de baja dimensionalidad, como alambres y puntos cuánticos.

Los cristales son conjuntos de átomos o moléculas acomodados con un cierto arreglo periódico tridimensional; es decir, un cierto conjunto de átomos, al que se llama celda unitaria, se repite indefinidamente en las tres direcciones espaciales, formando lo que se llama una red periódica tridimensional. Esta periodicidad en el arreglo atómico, dota a los cristales de propiedades de simetría que se reflejan, por ejemplo, en su aspecto macroscópico, caracterizado por la existencia de facetas muy bien definidas como las que aparecen en los diamantes o en los cristallitos de sal.

Los sistemas cristalinos ofrecen una ventaja matemática asombrosa. La condición de cristalinidad es una condición sobre la periodicidad de las fuerzas a las cuales están sujetos los electrones. Esta condición impuesta sobre la ecuación de Schrödinger implica que para resolver la ecuación de un electrón moviéndose en la red cristalina nos baste resolverla únicamente en la región ocupada por la celda unitaria. Lo cual es indudablemente una gran ventaja. Por otro lado, las interacciones entre los electrones se aproximan, en primera instancia, como la interacción entre un electrón y el campo de fuerzas promedio producido por el resto. A esta aproximación suele llamársele aproximación de campo medio, y resulta ser bastante precisa.

El tratamiento de los sistemas cristalinos aportó conceptos fundamentales para la comprensión del comportamiento eléctrico y óptico de los materiales. Así, como en los átomos los niveles de energía de los electrones son niveles discretos, en los cristales los niveles de energía están muy cercanos unos a otros, formando, lo que ha dado en llamarse un cuasicontinuo. Sin embargo, persiste la existencia de brechas de energía prohibida y en el espectro de niveles se tiene una estructura de bandas de niveles cuasicontinuos separadas por brechas de energía prohibida. Por esta razón, a los resultados de estos cálculos se les denomina teoría de bandas, debido a la existencia de bandas de energía permitida y bandas o brechas de energía prohibida. Una ilustración de este fenómeno lo vemos en la figura 4.

Si aplicamos ahora el principio de Pauli a la estructura de bandas de un cristal, vamos a ir acomodando dos electrones por nivel, y así tendremos bandas llenas, bandas vacías y bandas semillenas (o semivacías). Si, por ejemplo, los electrones ocupan todos los niveles de energía de una banda, se dice que la banda está llena y se encuentra entonces separada de los niveles vacíos de la siguiente banda por una

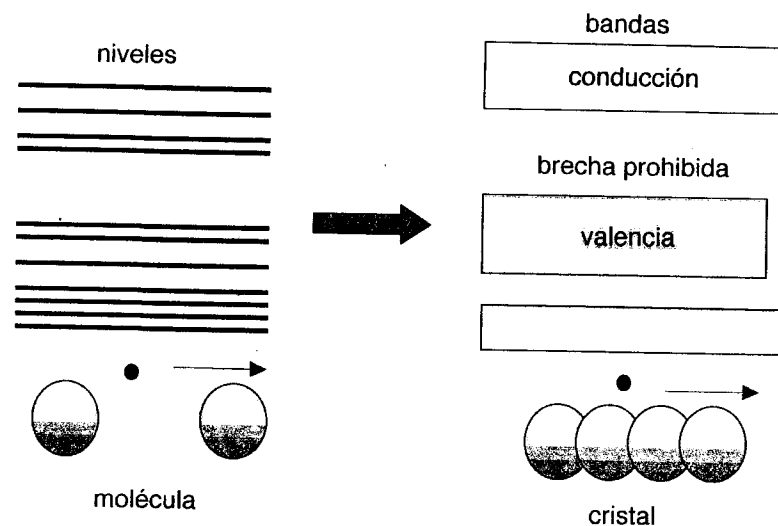


Figura 4. Paso de los niveles discretos de energía en un átomo a las bandas y brechas de energía en un cristal

brecha prohibida en donde no existen niveles accesibles a los electrones. A la última banda llena se le denomina banda de valencia, porque proviene de los electrones de valencia de los átomos que conforman el cristal y éstos son los electrones responsables de la valencia química. En este caso, si se aplica al sistema un campo eléctrico, no va a ser posible generar una corriente eléctrica, porque no existen niveles cercanos a los que los electrones puedan acceder. Los estados de corriente son estados con una energía un poquito mayor a la energía de los estados que se encuentran en el borde de la banda, pero esos niveles simplemente no existen debido a la existencia de la brecha prohibida. En este caso tenemos un aislante.

Por otro lado, si tenemos una banda semillena, definimos entonces la llamada energía de Fermi, como la energía de los electrones que se encuentran en el último nivel, es decir, con la mayor energía. En este caso, existen niveles de energía vacíos accesible a los estados de corriente y, entonces, en presencia de un campo eléctrico el sistema es capaz de conducir corriente eléctrica y tenemos un conductor. Por esta razón a las bandas semillenas se les denomina también bandas de conducción. En la figura 5 ilustramos estos hechos.



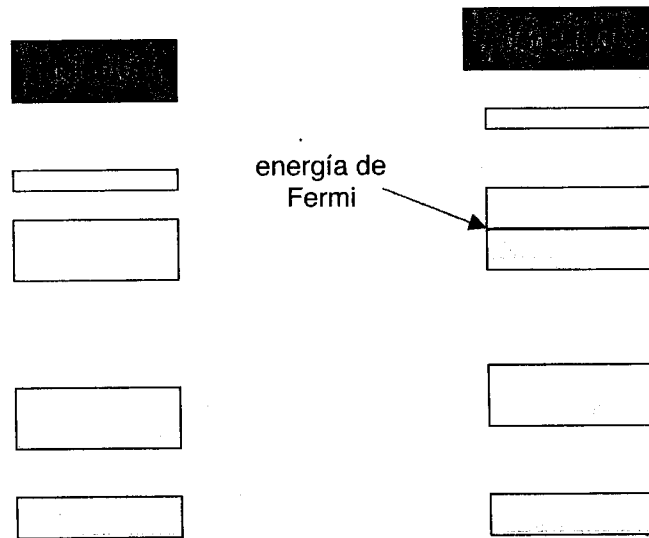


Figura 5. Estructura de bandas de un aislante y un conductor. El sombreado en las bandas corresponde a la ocupación de los electrones

Pero además de los aislantes y los conductores existen otros materiales que tienen propiedades de transporte que se encuentran entre las del aislante y las del conductor y que por esta razón se denominan semiconductores. Por ejemplo, el silicio puro tiene propiedades semejantes a las de un aislante, aunque con una brecha prohibida de energía no tan grande como la del diamante o la de un silicato. Ahora bien, si al silicio lo contamina con pequeñas cantidades de fósforo (P) o de aluminio (Al), que son elementos con una valencia distinta a la del silicio, habrá un electrón de más (P) o de menos (Al) en la red cristalina, que no podrá ser compartido en las ligaduras que unen a los átomos del silicio. Estos electrones que no pueden ser compartidos en esas ligaduras del silicio se localizan en regiones del espacio cristalino con energías que se encuentran, precisamente, en la brecha prohibida. A estos niveles de energía se le denomina niveles de impureza.

En el caso de fósforo en silicio tenemos un electrón de más y los niveles de impureza son niveles llenos, próximos a la banda de conducción. El silicio con este tipo de "dopaje" (del inglés to dope que

significa contaminar) se conoce como silicio tipo *n*; la *n* viene de la palabra "negativo" porque se tiene un exceso de electrones, o sea, de carga negativa. Ahora bien, dado que los niveles de impureza están llenos y su energía está próxima al fondo de la banda de conducción, se requiere entonces relativamente poca energía para que estos electrones sean excitados a la banda de conducción, y esta energía es suministrada por la energía térmica de la red cristalina a temperatura ambiente. Por consiguiente, a temperatura ambiente se tendrá una cierta población de electrones en la banda de conducción, y en presencia de un campo eléctrico aplicado, el material será capaz de conducir corriente eléctrica.

En el caso de aluminio en silicio, las cosas son diferentes. Tenemos un electrón de menos y los niveles de impureza son niveles vacíos próximos a la banda de valencia. Entonces, a temperatura ambiente los electrones de la banda de valencia son excitados a los niveles de impureza, dejando "huecos" en la banda de valencia. Los electrones excitados caen en niveles de impureza localizados en el espacio, mientras que los "huecos" se pueden mover libremente en la banda de valencia. Estos "huecos", como representan la ausencia de un electrón en la banda, se comportan ante la presencia de un campo eléctrico como portadores de carga *positiva*. ¿Curioso, no? Al silicio, con este tipo de "dopaje" se le llama silicio tipo *p*, donde la *p* proviene de la palabra "positivo", debido al comportamiento eléctrico de los "huecos". Por consiguiente, a temperatura ambiente se tendrá una cierta población de huecos en la banda de valencia, y en presencia de un campo eléctrico externo el material será capaz de transportar corriente eléctrica, pero con portadores de carga positiva. Algo, realmente curioso. En la figura 6 mostramos un esquema para ilustrar gráficamente el comportamiento de los semiconductores tipo *n* y tipo *p*.

Ahora quisiera mostrar cómo es que los semiconductores cambian completamente nuestra civilización y cultura. Así como en las épocas prehistóricas fue la aparición de aleaciones tales como el bronce y el hierro las que cambiaron la faz de una civilización, son ahora los semiconductores los materiales responsables de los grandes cambios de nuestra actual civilización. Para dar cuenta de esto tenemos que remontarnos a las primeras décadas del siglo XX y recordar qué es lo que sucedía en el mundo de la industria y la tecnología en los años en que, precisamente, se estaba gestando la mecánica cuántica. Uno de los grandes avances tecnológicos de aquella

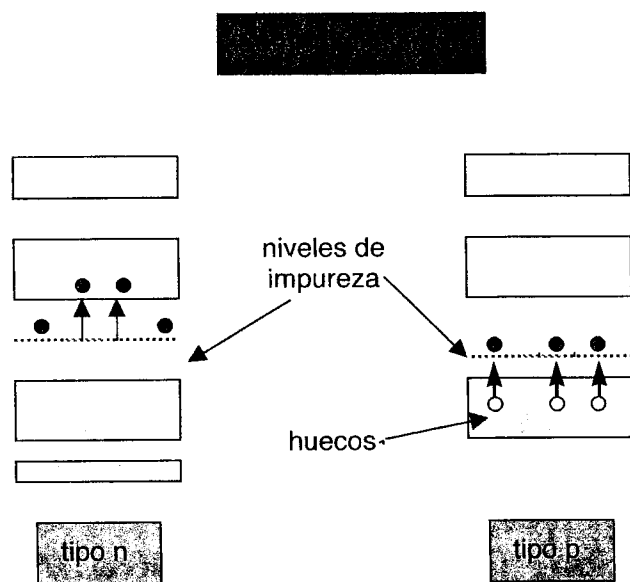


Figura 6. Estructura de bandas en los semiconductores tipo n y tipo p. El sombreado en las bandas corresponde a la ocupación de los electrones y las rayas punteadas corresponden a los niveles de impureza

época fue la creación de la electrónica. ¿Qué diferencia había entre la electrónica y la electricidad?, pues tal vez la misma diferencia que había entre un ingeniero electrónico y un ingeniero eléctrico. Mientras que el ingeniero eléctrico trataba con circuitos eléctricos, el ingeniero electrónico trataba con circuitos electrónicos. Mientras que en todos los circuitos encontramos cables, resistencias, condensadores, etc., la gran diferencia que había entre un circuito eléctrico y un circuito electrónico era que en el circuito electrónico había una cierta clase de dispositivos en los cuales los electrones viajaban a través del vacío. Estos dispositivos se llamaban "bulbos" y consistían en unas ampollas de vidrio en donde se había hecho vacío para permitir que los electrones pudieran viajar dentro de ellas sin colidir con las moléculas del aire. Tal vez algunos de los lectores recuerden todavía que en los circuitos de las radios, los aparatos de sonido y los primeros televisores había una buena cantidad de estos "bulbos", con una gran diversidad en tamaños y formas. Por ejemplo, el ci-

niscopio de las teles podría ser considerado un gran bulbo, pero existían también los diodos, los triodos, los pentodos, etcétera.

Para entender el movimiento de los electrones en los bulbos no era necesaria la mecánica cuántica. Bastaba con imaginarse que el electrón era una pequeña bolita cargada que respondía a la acción de los campos eléctricos y magnéticos como una partícula "clásica", es decir, que su movimiento seguía las leyes de la mecánica clásica. Por ejemplo, en un diodo los electrones salen de un filamento caliente y son atraídos hacia el cátodo, que es una placa colectora, separada físicamente del filamento y mantenida a una cierta diferencia de potencial con respecto a éste. Y bueno, ¿qué utilidad tiene el diodo? Uno de los usos más comunes de un diodo es como rectificador de corriente. En este caso, ante la presencia de una corriente alterna, la diferencia de potencial entre el cátodo y el filamento cambia alternadamente en cada ciclo, de positiva a negativa. Cuando la diferencia de potencial es positiva los electrones son atraídos hacia el cátodo, mientras que cuando ésta es negativa, los electrones son repelidos por el cátodo y no llegan a él. Como consecuencia, la corriente de electrones fluye en el circuito sólo durante los periodos en los que la diferencia de potencial es positiva. Esto se parece más a una corriente directa que a una corriente alterna, y a esto se le llama *rectificar* la corriente.

Otro de los usos novedosos de los circuitos electrónicos era el del triodo amplificador. En este caso tenemos, además de los dos elementos del diodo: el emisor y el cátodo, un tercer elemento (de ahí el nombre triodo) consistente en una rejilla colocada entre el emisor y el cátodo y que va a servir para modular el paso de los electrones hacia el cátodo. La rejilla se coloca físicamente más cercana al emisor con el fin de que, con una pequeña diferencia de potencial entre la rejilla y el emisor, sea posible controlar el paso de los electrones hacia el cátodo. Pero cambios en la densidad de corriente entre el emisor y el cátodo producen cambios en la diferencia de potencial entre esos dos elementos del circuito. De esta manera, si con una fuente se mantiene una diferencia de potencial entre filamento y cátodo de, digamos, unos 220 volts, entonces con una fuente alterna con amplitud de, digamos, 5 volts, se producirán en el circuito cambios en la diferencia de potencial entre emisor y cátodo de más de un centenar de volts. Éste es el efecto amplificador que le da nombre a este elemento electrónico como triodo amplificador. ¿Cuántas veces no hemos oído en el *argot* de los aparatos de sonido, hablar del

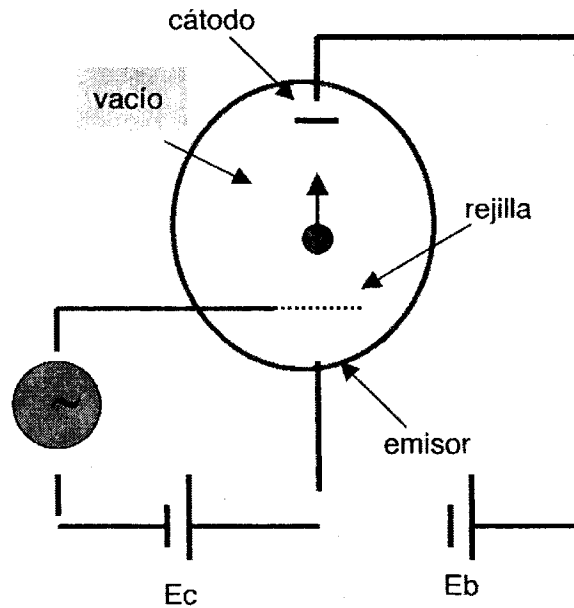


Figura 7. Diagrama de un triodo amplificador

amplificador? En la figura 7 ilustramos en un diagrama las componentes de un triodo amplificador.

Quisiera hacer notar que los bulbos fueron el elemento novedoso y esencial de la naciente industria electrónica. En esos tiempos solía creerse que lo avanzado y complejo de un aparato era proporcional a la cantidad de bulbos que tenía. Yo recuerdo haber estado, en la Universidad de Illinois estudiando mi doctorado, allá por los años sesenta, cuando visité el museo del Departamento de Computación, en donde se encontraban las primeras computadoras fabricadas en el seno del Proyecto Manhattan (el de la bomba atómica), allá por los años cuarenta. Eran una serie de cacharros con cables oxidados, pero eso sí, con bulbos y más bulbos.

Pues bien, quienes vienen a remplazar a los bulbos en la industria electrónica son, precisamente, los materiales semiconductores, creando una profunda revolución tecnológica que cambia la faz misma de nuestra civilización. Si evaporamos sobre un semiconductor tipo  $p$  un semiconductor tipo  $n$ , se crea lo que se llama una junta  $pn$ . Al juntar un semiconductor tipo  $p$  con uno tipo  $n$ , se provoca un intercambio de carga entre los dos materiales, cuyo efecto se interpre-

como un “doblamiento” de las bandas de energía cerca de la interfaz. Este efecto produce una asimetría en el transporte de corriente eléctrica a través de la junta. Por lo tanto, en presencia de un campo eléctrico externo, cuando la polaridad del campo aplicado es de un determinado signo, se genera una corriente eléctrica a través de la junta, en una determinada dirección. Pero esta corriente desaparece cuando la polaridad del campo cambia de signo. En otras palabras, estas juntas  $pn$  funcionan como un bulbo diodo y, por consiguiente, si las colocamos en un circuito son capaces de rectificar corriente. Utilizando los mismos principios cuánticos y los resultados derivados del estudio de la estructura de bandas en semiconductores cerca de las interfaces, se construyó con una junta  $npn$  el primer triodo amplificador. Ésta se fabricaba evaporando sobre un semiconductor tipo  $n$ , otro tipo  $p$  y después otro tipo  $n$ . En este diseño, el semiconductor tipo  $p$  jugaba el papel de la rejilla en el triodo convencional, mientras que los dos semiconductores tipo  $n$ , en los extremos de la junta, jugaban el papel del emisor y del cátodo colector.

La diferencia esencial entre los bulbos y estos nuevos dispositivos electrónicos, a los que se les dio el nombre genérico de *transistores*, es que mientras en los bulbos los electrones viajan en el vacío, en los transistores los electrones viajan en el seno del material semiconductor, o sea, viajan dentro del sólido. Por esta razón, cuando aparecieron en el mercado los primeros aparatos de sonido que utilizaban los nuevos transistores, estos aparatos tenían una leyenda que decía *Solid State* (del inglés, que significa, estado sólido). Con esto se quería hacer énfasis en el hecho de que en los nuevos circuitos electrónicos, los electrones no viajaban más a través del vacío creado en los bulbos, sino que ahora viajaban dentro del estado sólido.

El descubrimiento del transistor se realiza en los laboratorios de la Bell Telephone Company, mejor conocidos como los *Bell Labs*, allá por 1947. El descubrimiento fue realizado por tres brillantes investigadores: Bill Shockley, John Bardeen y Walter Brattain. Este descubrimiento es, sin duda, una de las aplicaciones más exitosas de la mecánica cuántica a la ciencia de materiales. Por otro lado, es interesante hacer notar que el descubrimiento se realiza en los laboratorios de investigación de una industria del sector privado. Este hecho muestra la tendencia que existía en Estados Unidos y en otros países europeos de concebir la investigación básica como una plataforma del desarrollo tecnológico y, en última instancia, como una fuente de negocio.

Hablar de las aplicaciones del transistor podría llevarnos muchas, muchas páginas, por lo que aquí quisiera únicamente resumir diciendo que el transistor es el componente *esencial* de la moderna industria electrónica y que los dispositivos electrónicos son el alma de casi todos los aparatos construidos actualmente en las áreas de la informática, telecomunicaciones y control. No cabe duda, que la fuerza avasalladora de todo este enjambre tecnológico está cambiando, a un ritmo cada vez más acelerado, las raíces mismas de nuestra actual civilización. Por consiguiente, siguiendo la tradición de nombrar a las diversas etapas de la historia por el dominio, uso e impacto de un determinado material, nuestra actual civilización, bien podría ser llamada la Edad de los Semiconductores.

#### LA CIENCIA DE MATERIALES EN MÉXICO

Y mientras Schrödinger proponía a la comunidad de físicos su famosa ecuación, y mientras Seitz publicaba *The modern theory of solids*, y mientras los Laboratorios Bell comenzaban a diseñar y probar los primeros transistores, ¿qué pasaba en México?

Si nos remontamos al decenio de los cincuenta, vemos en la Presidencia de la República al primer presidente civil salido del partido revolucionario. Vemos un partido que comienza a ejercer su hegemonía en la vida política del país y un país que comienza a disfrutar, con todas las salvedades del caso, de un poco de paz social. En la primera parte del siglo XX se logró abrir un espacio, dentro de las tensiones provocadas en la lucha por el poder político, para iniciar el proyecto cultural más importante del país: La Universidad Nacional. Sotero Prieto comienza a hablar de matemáticas y José Vasconcelos edita, desde la rectoría de la Universidad, traducciones de los clásicos grecolatinos. En la década de los treinta, se funda, en la Universidad Nacional, la Facultad de Ciencias y el Instituto de Física, y en la década de los cincuenta la incipiente comunidad de físicos funda la Sociedad Mexicana de Física y la *Revista Mexicana de Física*. En los inicios de la física en México, no fue la física del estado sólido, ni los avances en la física de semiconductores, ni los impactos del transistor, lo que atrajo la atención de la comunidad de físicos en México. En la Universidad Nacional la temática central fue alrededor de física de rayos cósmicos, la teoría de la gravitación, la física nuclear y la

física de aceleradores. En las recién estrenadas instalaciones de Ciudad Universitaria, allá por 1952, se instala un acelerador de partículas en el denominado laboratorio Van de Graaff y una cámara de niebla para la detección de rayos cósmicos. En esta misma década, en el recién fundado Instituto de Física de la Universidad de San Luis Potosí, se construyó también una cámara de niebla para estudios en física de rayos cósmicos. En esos tiempos me encontraba estudiando la secundaria, y todavía recuerdo que mi tío, el ingeniero Eugenio Pérez Molphe, que radicaba en San Luis, me llevó a visitar la famosa cámara de niebla que se encontraba en uno de los salones del viejo edificio que actualmente ocupa la rectoría. Recuerdo también no haber salido muy impresionado, ya que el modesto laboratorio no concordaba con mi imagen de lo que debía ser un moderno laboratorio de investigación en altas energías. Es también interesante hacer notar, que en estos mismos años, se funda una escuela de física en la Universidad Autónoma de Puebla, alrededor de la cual se congrega un grupo de profesores jóvenes, que inician, con muchas dificultades, labores serias de investigación en física.

Pero no fue sino hasta la siguiente década, la década de los sesenta, cuando comienza a sentirse ya el paso de lo que podríamos llamar una "física bohemia", a una física cada vez más profesional. A principios de esta década se funda el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) con un Departamento de Física dedicado a la investigación básica. Con la idea de crear un centro de excelencia científica en el ámbito internacional, la dirección del Departamento de Física fue ofrecida a distinguidos investigadores de la comunidad internacional y se contrataron a más de una decena de profesores extranjeros con amplia experiencia en labores de investigación básica. Se creó también un posgrado con la misión de formar a los futuros profesores e investigadores. En esta misma década, los estudiantes de distintas instituciones que salieron al extranjero a estudiar su doctorado, regresaban ya como profesores y en este periodo comienzan a formarse los primeros grupos de investigación y a conformarse ya líneas y problemas específicos de trabajo.

Desde un punto de vista retrospectivo, la física en México se inicia, en mi opinión, con un componente demasiado fuerte en la física-matemática y con un gran debilidad en la experimentación y en la fenomenología. La física experimental concentra sus esfuerzos iniciales en la física de aceleradores, que aunque con las pretensiones

de hacer física de vanguardia, era un área en donde fue siempre muy difícil competir con grupos más experimentados y con más recursos. Por otro lado, los grandes avances de la física del estado sólido no eran del todo conocidos, y esta disciplina no había siquiera comenzado a cultivarse. Baste decir, que cuando era yo estudiante del cuarto año de la carrera de física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), allá por 1963, nunca oí hablar ni del transistor, ni de los semiconductores, ni del gas de electrones, ni de la estructura electrónica de los sólidos. El grupo de estado sólido que comenzaba a formarse en nuestro instituto de física, estaba dedicado al crecimiento de cristales y a problemas relacionados con la ruptura dieléctrica. Recuerdo todavía mi sorpresa y mi emoción cuando me enteré de que en la física de sólidos se utilizaba también la mecánica cuántica. Esta información resulta interesante en la medida en que indica el nivel de información que tenía un estudiante del último año de la carrera, en relación con la física de sólidos. Resultó también sorprendente para mí el descubrir, durante la elaboración de mi tesis de licenciatura, el libro *Elementary excitation in solids* de David Pines, que fue el que finalmente disparó los resortes para que me decidiera a ir a estudiar mi doctorado en física del estado sólido a la Universidad de Illinois, que era la universidad donde se encontraba el mentado profesor Pines. Durante mi estancia en el extranjero se formó en el Instituto de Física de la UNAM un grupo en microscopía electrónica que tuvo, al correr de los años, una influencia importante en el desarrollo de la física de materiales en el país. Como colofón a todo este anecdotario podríamos decir, simplemente, que la física de sólidos entró tarde en nuestro país.

No fue sino hasta el decenio de los setenta, cuando comenzaron a regresar del extranjero los primeros doctores en esta disciplina, que empezaron a establecerse los primeros grupos de investigación en estado sólido, tanto teóricos como experimentales. Estos grupos se iniciaron aplicando la moderna teoría de sólidos a materiales semiconductores, metales y materiales magnéticos, atacando problemas en boga de estructura electrónica o de física de superficies, y con el manejo diversas técnicas espectroscópicas tanto ópticas como electrónicas. Esto sucede simultáneamente en la UNAM, en el Cinvestav y en los institutos de física y escuelas de las universidades de Puebla y de San Luis Potosí. En el Instituto Mexicano del Petróleo, Pemex, el grupo en investigación básica de procesos realiza estudios de física de materiales, química cuántica y fisicoquímica y en este mismo de-

cenio se crea también la Universidad Autónoma Metropolitana que congrega a grupos de investigación en física tanto en el campus de Iztapalapa como en el de Azcapotzalco. Aunque es este decenio el que podríamos llamar el decenio del "despegue" de la física de sólidos, la mayor inversión que se realiza en este periodo no es en esta disciplina, sino que se le sigue apostando a la física nuclear. A fines de los años setenta se inaugura el Centro Nuclear de Salazar, que representa una de las mayores inversiones que se han hecho en ciencia en los últimos decenios. El Centro Nuclear contaba con un reactor nuclear y se realizaron esfuerzos para preparar jóvenes, a nivel de posgrado, en esta disciplina. Se hablaba de que el gobierno del país iba a instalar 15 reactores nucleares para la generación de energía eléctrica, lo cual iba a requerir de personal altamente capacitado. Finalmente, la Comisión Federal de Electricidad instaló, después de muchos años, muchas vicisitudes y ante la oposición de los grupos ecológicos y parte de la sociedad civil, los dos únicos reactores de Laguna Verde.

Mirando hacia atrás, vemos que de los setenta para acá la investigación en física de sólidos se ha diseminado por el país. Por un lado, ya ostenta otra denominación, se le llama "física de la materia condensada", en donde se incluye también la física de líquidos. Por otro lado, la física de la materia condensada amplía la variedad de sistemas a tratar. Además de cristales, aleaciones, superficies y sólidos desordenados, se tratan ahora sistemas de baja dimensionalidad, nanoestructuras, cúmulos, superredes, sistemas de electrones fuertemente correlacionados, polímeros, compositos, sistemas fractales y jerárquicos, grandes moléculas y sistemas biológicos tales como membranas y canales iónicos. Se comienzan a crear ya departamentos con el pomposo nombre de física de sistemas complejos, y se venera y fomenta lo interdisciplinario. A las técnicas matemáticas más tradicionales, como la teoría de muchos cuerpos, se le añaden nuevas técnicas nacidas de la mecánica estadística, como son el grupo de renormalización, la teoría de percolación y las leyes de escalamiento y de exponentes críticos. En el ámbito de las aplicaciones surge una nueva disciplina: la ciencia e ingeniería de materiales, cuyo nombre indica la pretensión de crear y diseñar nuevos materiales para satisfacer requerimientos específicos.

Echando una ojeada al mapa de la república vemos que las políticas oficiales de descentralización han tenido un cierto efecto, y que actualmente existen grupos de investigación en física de materiales

y de la materia condensada en distintas ciudades fuera de la ciudad de México, tales como Cuernavaca, Culiacán, Chihuahua, Ensenada, Hermosillo, León, Mérida, Morelia, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas. Estos grupos, con diversos grados de desarrollo, se encuentran congregados ya sea en las universidades estatales o en los centros SEP-Conacyt.

La diversidad temática en esta disciplina, de los distintos grupos de investigación en México, es suficientemente variada, y algunos de ellos se encuentran bien conectados con la comunidad internacional y tratando problemas importantes, y con un cierto impacto. Información más detallada sobre temas específicos de investigación, así como títulos de las publicaciones más recientes de los investigadores en este campo, puede verse en el *Catálogo de programas y recursos humanos en física* publicado anualmente por la Sociedad Mexicana de Física. Por otro lado, ha sido notoria también la contratación de científicos de la antigua Unión Soviética, y en general del bloque socialista, que han venido a reforzar, con diversos grados de éxito, a los grupos nacionales. El equipamiento experimental ha llegado en dosis diversas, y aunque existen laboratorios razonablemente equipados, todavía falta mucho por hacer. Aunque la física de materiales no es una física de grandes máquinas, como los grandes aceleradores o los grandes telescopios, las técnicas espectroscópicas modernas requieren de equipos estándar de alto vacío y diversos sistemas de monitoreo, cuya ausencia puede dejar a un laboratorio fuera de operación. Los "grandes" aparatos en esta área pueden estar representados por un microscopio electrónico o por un sistema de crecimiento de multicapas; sin embargo, uno de los problemas más graves es el relacionado con la preparación de muestras y el diseño de verdaderos experimentos. Esto ha llevado a que algunos laboratorios concentren su actividad alrededor de uno o varios aparatos, y más que física de materiales lo que hacen es caracterización de muestras.

En relación con el muy controversial tema de las aplicaciones y la vinculación con el sector público y privado, se puede decir que la inserción de egresados de la carrera y el posgrado en física y en ciencia de materiales, en el sector no-académico es muy exigua, por no decir casi inexistente. En mi opinión, el peso mayor de las aplicaciones de la ciencia debería recaer en el sector de los ingenieros, y el sector científico debería servir, más que nada, para preparar, apoyar y reforzar las labores de los ingenieros. Por otro lado, el industrial

mexicano no siente la necesidad de contratar personal altamente calificado que conozca a fondo la química y la física de los procesos que maneja, con la simple finalidad de que este personal podría "ahorrarle" dinero. Esto influye también en el diseño de los planes de estudio que responden a las aspiraciones de formar un ingeniero-administrador más que un ingeniero capaz de crear nuevos procesos y nuevas tecnologías. Esta compleja situación puede llevar a la generación de situaciones un tanto absurdas, en donde los centros de investigación científica, respondiendo a la presión de las políticas oficiales de vinculación, realizan proyectos de diseño de "nuevas" tecnologías con la esperanza de que en un futuro "alguien" se las vaya a comprar. No es claro tampoco cuáles son las políticas adecuadas para ir resolviendo tan compleja situación y poder hacer que el conocimiento científico se incorpore al desarrollo tecnológico y económico del país.

En fin, lo que me es claro es que el país va a necesitar de jóvenes altamente capacitados con una fuerte preparación básica en matemáticas, física y química y con experiencia en investigación y en la solución de problemas nuevos, y que estos jóvenes tendrán que ir madurando y escalando a los puestos de decisión en los sectores público y privado, y que ellos serán los mejores interlocutores entre estos sectores y el sector dedicado a la investigación básica y aplicada. Falta mucho por hacer y el futuro nos está proponiendo nuevos retos y nuevos cuestionamientos. Quisiera finalizar diciendo que, en mi experiencia muy personal, la vida académica me ha brindado grandes satisfacciones; que el simple hecho de comprender a fondo el funcionamiento cuántico de la materia es uno de los placeres reservados a muy pocos. Creo también que en las condiciones actuales existe un espacio suficientemente amplio para el desarrollo profesional y académico de jóvenes con aspiraciones de entrega a una vida dedicada a la investigación, tanto básica como aplicada, en uno de los campos más fascinantes del saber humano: la ciencia de materiales.