

La revolución de los superconductores

LA FISICA TIENE FUTURO Y ES EL FUTURO DE MEXICO :

Rafael Baquero

Mariano Morales

México, preparado para la revolución de los superconductores

En México habrá una gran cantidad de trabajo para los científicos y los tecnólogos en el futuro o no habrá un futuro interesante para nadie. De esto estoy convencido y lo digo aunque parezca advertencia: la crisis que atraviesa México se encuentra en un punto que puede derivar hacia consecuencias trágicas, dramáticas para el pueblo mexicano. Esta fue una de las tantas conclusiones a las que llegó el Dr. Rafael Baquero, investigador del Instituto de Estado Sólido de la Universidad Autónoma de Puebla, en conversación con Jesús Mendoza, Mario Guzmán y quien redacta esto, miembros de la revista *Elementos*, con motivo de las posibilidades que abre al país la aparición de los nuevos superconductores. El doctor Baquero ha dedicado su vida a la física de estado sólido, y dentro de ésta, en particular al estudio teórico de los superconductores, materias en las cuales ha producido más de 25 artículos de investigación publicados en revistas especializadas.

Qué son los superconductores

En la naturaleza existen diversas formas en las cuales se presenta



la materia. La primera gran división que aprendemos en la escuela es la de gases; líquidos y sólidos. Dentro de estos últimos existen también diferencias de comportamiento. Son, por ejemplo, muy útiles los aislantes que utilizamos para que la electricidad no pase de un lado a otro; así nos protegemos: en las casas usamos aislantes para que los cables que llevan la electricidad la transmitan a los aparatos donde se necesita sin que pase por nosotros. Otros materiales que tuvieron mucha importancia a principios de siglo, después del descubrimiento de la mecánica cuántica, hacia 1924, fueron los semiconductores; los semiconductores dieron lugar a cosas tan útiles como el transistor, como la electrónica que conocemos hasta hoy y que prácticamente modela nuestra sociedad actual; el semiconductor es otra de las formas en que se presenta un sólido y se diferencia del aislante en que los electrones, las cargas que fluyen dentro de los cuerpos, se pueden modular por potenciales, pero no fluyen libremente, no se encuentran libres, de manera natural. La tercera fase en que podemos distinguir a la materia sólida podrían ser los metales, es decir los conductores. La característica fundamental de los metales es que las cargas se encuentran dentro, de una manera libre. Un metal puede pensarse como cargas positivas colocadas en posiciones geométricamente regulares fluyendo dentro de ellas —como bolitas— los electrones, que llevan la carga negativa y que son en realidad los que conducen; por ello es que a un metal —por ejemplo, un trozo de alambre de cobre— se le puede hacer que conduzca una corriente con una pila tan pequeña como de un voltio, ya que basta una pequeña diferencia de potencial —digamos una pequeña fuerza— para hacer correr esas bolitas, porque están libres dentro del material.

En lo que interesa a la respuesta de qué es un superconductor, son

los metales los que permiten el marco al fenómeno. Hasta hace unos tres o cuatro meses se podría decir que la superconductividad es efecto de bajas temperaturas. En éstas, un metal comienza a comportarse de una manera diferente: los electrones parecen agruparse de una manera que ignora la interacción con la red... Me explico: supongamos un bosque donde los árboles están situados de manera regular; queremos hacer pasar una pelota a través del bosque; pero no la queremos hacer pasar entre el espacio que los alineamientos permiten, queremos hacerla pasar lanzándola al azar. Al azar es como los electrones se mueven dentro de esa malla de iones o de cargas positivas colocadas en posiciones geométricamente regulares. Al lanzar la pelota, entonces, es casi seguro que chocará contra algún árbol. Esto sucede también con los electrones: al correr por entre esas cargas, cuando tienen una diferencia de potencial o una pila, chocan con las cargas positivas, ellas vibran y eso se manifiesta como alza de temperatura, como calor. Esa es la propiedad que utilizamos para calentar el café, es la propiedad del choque de los electrones con la red, la matriz que se encuentra dentro de ese metal; la energía proviene de la pila, del campo eléctrico que crea esa pila dentro del metal y los electrones la pasan a la red produciendo calor como resultado de los choques.

En el estado superconductor los electrones se apilan de alguna manera, se aparean, se agrupan de forma tal que ignoran la existencia de esa red y, por lo tanto, fluyen a través de ella sin intercambiar energía con ella. Una propiedad fundamental de un superconductor es que al paso de la corriente no crea calor, y por tanto, no pierde energía. Esto es muy importante; demos un ejemplo: cuando se tiene que transportar grandes cantidades de corriente para alimentar de energía a una ciudad, la pérdida por calor es muy gran-

de, llegando incluso a perderse hasta el 40% de ella nada más en el proceso de transporte.

Como una primera aproximación: un superconductor es un sólido que tiene cierto carácter metálico —en tanto hay electrones libres dentro de él— y que sus electrones por efecto del descenso de la temperatura se aparean entre sí y pueden fluir a través de la red cristalina sin causar ninguna disipación o ningún gasto de energía.

La guerra contra el frío

El doctor Baquero se incorporó a la Universidad Autónoma de Puebla en enero de 1973, ingresando a la Escuela de Ciencias Físico-Matemáticas. Cofundador del Departamento de Física del Estado Sólido, fue su primer director de 1974 hasta 1979.

En su cubículo, un cubículo sencillo, más bien pequeño, caluroso y lleno (por un escritorio y una mesa de trabajo, un archivero, un par de estantes llenos de libros y revistas y un pizarrón igualmente lleno, donde alternan símbolos químicos como el Cu y el Ba con desarrollos matemáticos sofisticados y representaciones geométricas de lo que —supongo— debe ser la estructura de algún superconductor), que da la espalda al campus de la universidad, con un lenguaje sencillo y preciso responde a todas nuestras preguntas —incluyendo las que hacemos sin que vengan al caso.

En la naturaleza —continúa— existen los semiconductores como el silicio y el germanio; también existen los superconductores naturales, como el niobio, el plomo, el aluminio. Sólo que a la temperatura ambiente ninguno de ellos se comporta como un superconductor. Hay que bajar la temperatura. El grave problema que ha tenido la tecnología que se deriva de la superconductividad es que se ha visto en la necesidad de utilizar el helio como fuente de descenso de la temperatura. Para bajar la temperatura de un cuer-

po hay que ponerlo en contacto con un cuerpo frío, y el cuerpo frío con el cual se pueden bajar las temperaturas hasta conseguir las del orden de 10° o hasta 4° y un poquito menos es el helio líquido. Sin embargo, el helio tiene varios inconvenientes: su manipulación es un poco engorrosa, su producción es escasa, es necesario cubrir de varias capas aislantes a cualquier elemento superconductor para que éste pueda permanecer a una temperatura suficientemente baja. Los superconductores conocidos hasta noviembre del año pasado, operaban por debajo de los 25°K . El gran cambio que ha habido en los últimos meses es precisamente el hallazgo de superconductores que operan con temperaturas muy por encima de ella, alrededor de los 100°K . Hay que recordar que hablo de temperaturas absolutas: 0° centígrados corresponden aproximadamente a 270°K ; 100°K , entonces, son alrededor de -170° centígrados.

Paso a lo nuevo

La novedad —es una cosa muy interesante— son unos materiales cerámicos que tienen una estructura cristalina que se conoce con el nombre de *peroxquita* (o *perovskita*). Uno puede imaginar su estructura: los átomos dentro de esos cristales forman tetraedros; en cada uno de los vértices de esos tetraedros uno puede imaginar un pequeño octaedro que está formado por óxidos de cobre. Dentro del volumen de esos tetraedros se pueden encontrar átomos de lantano y de bario. La estructura es laminar en el estado superconductor.

Estos materiales han sido presentados sorpresivamente: en abril del año pasado a alguien que estaba estudiando las cerámicas desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas se le ocurrió medir qué pasaba a más bajas temperaturas y se encontró con la sorpresa de que el material empezaba a perder resistencia a temperaturas

Estado Sólido: Ciencia para el futuro*

Lo que se está haciendo aquí va a tener aplicación un día de éstos. No sabemos cuándo, pero tendrá su aplicación directa, inmediata en la resolución de problemas de tipo tecnológico.

¿Ignorancia o mala fe?

Aprovechando la coyuntura el entrevistado agregó: hay gente que por ignorancia o mala fe desprecia a la física básica, a la física teórica. Desean que vayamos directamente a los problemas prácticos. Ignorancia o mala fe, conlleva esta visión que no entiende que lo práctico está basado en lo teórico, como en el ejemplo que acabamos de explicar.

Encuentro: Lo mismo sucede con Einstein y la energía atómica. El llega a su fórmula trabajando teóricamente; así encuentra la relación entre la energía, la masa y la velocidad de la luz; hoy ésta es la base de toda la energía nuclear y atómica. Finalmente si el conocimiento es verdadero tendrá que modificar la realidad.

LRT: Pero incluso en gente de alto nivel del gobierno hay quien dice: "no queremos sólo ciencia aplicada". Lo que no han comprendido es que si queremos tener ciencia aplicada, tecnología, debemos tener auténtica ciencia básica. Lanzarnos hacia la aplicación es nada más estar repitiendo lo que ya ha sido hecho en otros países. ¿En base a qué, con qué lo vamos a hacer? Lo más a lo que se podrá llegar será a la copia de modelos ya elaborados.

Ojalá y quede claro en la conciencia de la gente la importancia que tiene la ciencia básica, como punto de apoyo de las aplicaciones del futuro. Por eso hay que apoyarla y no estarle regateando recursos.

Encuentro: Ahora que han estado los compañeros del SUTIN con nosotros nos hemos enterado de cuál ha sido la



respuesta del Estado ante intentos de desarrollar una ciencia y una tecnología independientes, como el Centro de Ingeniería de Reactores, que fue cerrado o la misma URAMEX, hasta proyectos de menor cuantía como la producción de lentes en el INAOE. Obviamente las razones fundamentales han sido políticas, pero de todos modos muestra la estima en que nuestras autoridades tienen al desarrollo de la ciencia.

Cuenta el Ing. Rivera Terrazas que siendo rector le tocó ir a reuniones de ANUIES en las cuales siempre había algún rector que orgullosamente notificaba: "nosotros estamos investigando en la ciencia de los alimentos". ¿Y qué era lo que hacían? Habían comprado una planta —en Estados Unidos por supuesto—, para enlatar pescados y mariscos, esa era la investigación. Yo no digo que no sea importante enlatar sardinas y camarones, pero ellos exclusivamente estaban copiando métodos ya puestos a prueba.

Algunas enseñanzas para el desarrollo de la Universidad

La formación del Departamento es algo muy interesante —apunta el entrevistado a quien un grupo de universitarios impulsa una campaña para in-

*Fragmento de una entrevista con el Ingeniero Luis Rivera Terrazas, realizada por María Eugenia López y Mariano Morales en 1983 y publicada en *Encuentro*.

cercanas a los 30°K. A esto no se le dio la importancia que merecía, debido a la búsqueda tan intensa de un superconductor de alta temperatura crítica* que se había dado; como resultó infructuosa, arrojó una actitud pesimista con respecto a las posibilidades de encontrar un superconductor a temperaturas tan "altas" como 100° K.

Cuando los resultados fueron vistos por un grupo japonés, dirigido por el profesor Tanaka, se dieron a la tarea de reproducir estas peroxquitas y de estudiarlas con más detalle. Encontraron que eran superconductoras a 30°K. Esto sucedió por noviembre del año pasado. Cuando la noticia se lanzó al mundo en varias cartas que ellos dirigieron a diferentes laboratorios mostrando sus resultados experimentales, mostrando las curvas donde la resistencia del material se perdía hacia los 30°K, se creó una verdadera fiebre de búsqueda de superconductores de alta temperatura crítica que tuvo su punto climático en la reunión de marzo de la Sociedad Americana de Física, el llamado *Woodstock de la Física*. Ahí se presentaron los resultados como el gran show del momento. En los pasillos del hotel había cámaras de televisión porque el salón no podía contener a todos los participantes; en un circuito cerrado de televisión se proyectaban los resultados que querían mostrar. Hubo reuniones que duraban toda la noche; la gente salía a las seis de la mañana para volver a las ocho y continuar con la reunión. Muchas de las personas que asistieron —entre ellos un grupo de 5 personas de la UAP— mencionan que en los últi-

* En general se define en física como temperatura crítica a aquella en la cual se produce un cambio de estado en el sistema estudiado. Por ejemplo, se puede decir que la temperatura crítica del agua es la temperatura a la que hierve, ya que al hervir pasa del estado líquido al gaseoso. En el estado superconductor definimos la temperatura crítica como aquella en que el material pierde completamente la resistencia; es decir, aquella más abajo de la cual se comporta como superconductor.

Ciencia para el futuro . . .

vestirlo con el Doctorado Honoris Causa*: quizá puedan sacarse de aquí algunas enseñanzas. Lo más necesario, primero, era tener la infraestructura humana, antes de pensar en laboratorios, antes de pensar en qué es lo que vamos a investigar. Muchas veces se hacen las cosas al revés: primero se compran los equipos: se revisan los catálogos, se eligen los aparatos y luego se mandan pedir; finalmente nunca los pueden echar a andar.

"Aquí lo hicimos de otra manera. Primero empezamos a captar gente. Llegó el Dr. Cambero, allá por los años '70; vino a formar estudiantes en la Escuela, pero al mismo tiempo a organizar, planear y a captar gente para formar un departamento de física. Todavía no sabíamos para qué rama. Al poco tiempo llegó el Dr. Baquero, después el Dr. Reyes... De manera que para 1974 —todavía no era yo rector— ya había cuatro jóvenes doctorados o en vías de doctorarse. Para '75 todos se habían doctorado. Entonces sí comenzamos la discusión de qué investigaríamos. Ya estaba conformado el grupo básico de físicos. Nos planteamos física de bajas temperaturas, superconductividad, estado sólido, física de partículas, cosmología, física de altas energías... la gama de posibilidades era muy grande. Había que escoger y lo hicimos. Los criterios de elección fueron varios, pero, finalmente, teníamos que escoger un área que pudiese representar una base para producir tecnología a futuro.

"Por ejemplo, la física de altas energías, que es algo fascinante, requiere equipos muy costosos; no alcanzarían 10 años del presupuesto del país dedicado a la ciencia para comprar e instalar un acelerador bevatrón; además no se preven aplicaciones a corto plazo. Así fuimos descartando opciones hasta quedar con dos: bajas temperaturas o estado sólido. Discutimos muchos pros y contras, hasta que llegamos a la conclusión de que lo que más convenía al país y a esta universidad era investigar en el área de la física del estado sólido.

"Después de que tuvimos claridad en esto, pasamos a la siguiente fase. Ahora sí teníamos que ver qué equipo era el necesario. Fue cuando llegó, el

* El doctorado Honoris Causa le ha sido ya otorgado

Dr. Zehe a ayudarnos a preparar las bases de los laboratorios. El es un físico aplicado, pero esto debe entenderse como especialización, sin demeritar su base teórica. El venía como especialista en teoría de superficies dentro de la física de estado sólido. Volvimos a discutir de nuevo con él y comenzamos a planificar la adquisición de equipo. No podíamos comprarlo todo de una vez. ¿Qué equipo necesitábamos, dónde se encontraba, cuál era el de mejor calidad? Estas eran las interrogantes: Sobre todo intentando unir calidad con bajo precio. Todo se estudió minuciosamente, sin precipitaciones, hasta que fuimos adquiriéndolo poco a poco. A la brevedad recibimos apoyo económico de la SEP, mucho después del CONACYT. La siguiente fase fue instalarlo y calibrarlo —para que las mediciones fueran correctas—. Esto se llevó otro año o año y medio."

El secreto del futuro

Por último el Ingeniero nos habló del Departamento de Estado Sólido como opción profesional para los egresados de diversas carreras de la UAP. En la actualidad —asentó— la licenciatura no debe ser considerada como una escuela terminal, así en medicina, química e ingeniería. El egresado de física sólo tiene como alternativa trabajar en la investigación científica. Esta es la opción para participar en el desarrollo del país. México necesita no cientos sino miles de físicos a nivel doctorado. Aquí tenemos ya una maestría y un doctorado; y hemos recibido gente de química y de ingeniería química —después de un curso propedéutico. Además les conseguimos becas para que aseguren su tiempo de estudio sin distracciones. Después de esto la opción de trabajo es mucho más amplia: San Luis Potosí, la UNAM, Sonora, el POLI o aquí mismo. Ya se están abriendo centros de investigación...

Encuentro: del estado sólido...

ERT... de estado sólido y de otras áreas. Yo creo que en este momento, entre el 40-45% de la investigación a nivel mundial se está haciendo sobre estado sólido. Todo mundo se da cuenta de que aquí está el secreto del futuro...

mos años no se había visto algo que causara tanto impacto y tanto entusiasmo entre la comunidad científica como ese congreso. Esto se repitió hace unas semanas en el congreso de Anaheim en California, donde se dieron a conocer nuevos resultados; era increíble ver la cantidad de trabajo que la gente hizo entre marzo y abril. La cantidad de experimentos planteados en marzo y ya resueltos para abril era tremenda. La gente ha estado trabajando de manera febril, día y noche.

La superconductividad se ha convertido en la rama, dentro del estado sólido, de principal aplicación tecnológica —de eso no me cabe duda. La razón es porque ofrece perspectivas que son muy conocidas —desde los años setenta— y que tienen ventajas grandes con respecto a la tecnología vigente basada en los semiconductores.

En computación, por ejemplo, permitirían elaborar máquinas diez veces más rápidas que las más veloces que se conocen en la actualidad.

Otra de las aplicaciones que va a destacar es el transporte ultrarrápido. En la historia del transporte lo que más ha descollado es el transporte japonés, el shenhassen que es un tren manejado por computadora, muy seguro, que se desplaza en promedio a 210 km/h. El problema del rozamiento con los rieles imposibilita el desplazamiento de trenes a mayor velocidad de los 350 km/h. Los franceses fabricaron uno, el llamado TGV (tren de gran velocidad) que se desplaza a 260 km/h. Los japoneses tienen ya un prototipo, basado en los superconductores, que se desplaza a 500 km/h: la distancia México-Monterrey podría hacerse en dos horas! Esto empieza a competir con el desplazamiento en aviones. Y el impacto no se detiene en las posibilidades de transporte; cubre todo el impacto social de la comunicación: y tenemos ya una visión clara en la actualidad de cómo la comunicación puede configurar

una sociedad. El transporte masivo a gran velocidad se va a incrementar, y cosas similares pueden darse en diversos medios de comunicación.

Ya están en curso diversas aplicaciones a la medicina, particularmente en el estudio del cerebro: los superconductores han permitido crear detectores para medir los muy pequeños campos magnéticos del cerebro, que son del orden de una milésima de millonésima de Gauss. Para que uno tenga una apreciación de qué significa esto, hay que decir que el campo magnético de la tierra tiene medio Gauss. Otros órganos corporales que se pueden medir con superconductividad son los músculos, que producen campos del orden de 10^{-7} Gauss (cuando uno mueve un músculo la energía que se pone en acción produce un campo magnético del orden de 10^{-7} Gauss). Otros campos como el del corazón son también del mismo orden (10^{-6}), y en general se sabe hoy en día que un órgano enfermo produce anomalías en el campo magnético creado a su alrededor, permitiendo esto determinar una enfermedad midiendo las variaciones del campo magnético del cuerpo humano.

Quiero insistir en algo: por tener que bajar tanto la temperatura (a menos de 25°K) todas estas aplicaciones se han llevado a cabo a nivel de ensayo nada más. No así las aplicaciones a la medicina que sí han sido practicadas, tanto en la medición de pequeños campos magnéticos como en las radiografías inmediatas que se obtienen al colocar al paciente en presencia de grandes campos magnéticos. Este es otro efecto que tiene la superconductividad: permite producir los más grandes campos magnéticos que se conocen.

Estos son algunos de los impactos inmediatos que se esperan de la utilización de la superconductividad; seguramente a partir del próximo año. Y comenzarán a configurar una nueva sociedad en

cinco o diez años.

Predicciones teóricas y serendipias

Elementos: doctor ¿se puede decir que el hallazgo de materiales superconductores de altas temperaturas críticas fue una predicción teórica de la física de estado sólido?

El hallazgo no ocurrió siguiendo predicciones teóricas; aunque la teoría de la superconductividad tenía los elementos fundamentales para poder indicar el camino por donde se debían buscar los superconductores. Además de estar preparada para no dejar pasar tales descubrimientos. Frenó mucho estas búsquedas el trabajo del profesor Matthias, quien ensayo prácticamente todas las reglas empíricas producidas hasta ese momento. Buscó el elemento de carácter metálico que permitiera la superconductividad de altas temperaturas críticas y presentó un trabajo tan exhaustivo que causó, además de admiración, enorme pesimismo.

En el trabajo que realicé con Jules Carbotte, de la Universidad de McMaster de Canadá, llegamos a la conclusión de que había claras indicaciones de que un aislante que se pudiera dopar adecuadamente con electrones debería producir un superconductor de alta temperatura crítica. Incluso en las publicaciones que he hecho eso está escrito: las leyes empíricas que descubrimos están publicadas. Ahora, aunque llegamos a esas conclusiones no encontramos quien realizara un esfuerzo sistemático para buscar entre los aislantes la manera adecuada de doparlo de tal forma que pudiera producir una transición superconductora. Obviamente se trataba de predicciones de carácter cualitativo, que describían el camino por dónde buscar; pero yo no tenía conocimiento, por ejemplo, de las peroxquitas. Entre otras cosas la peroxquita que se dopa no es aislante sino semiconductor, tiene en el estado semiconductor una banda relativamente pequeña

de 0.1 milielectrón/voltios.

No quisiera dejar la sensación de que este descubrimiento ha sido un gran éxito teórico; pero tampoco quisiera dejar la sensación de que la teoría no tenía los elementos dentro de los cuales se hubiera podido proseguir una investigación que pudiera haber dado lugar al superconductor de alta temperatura crítica. Aunque no haya sido así históricamente.

Entusiasmo y repunte de la ciencia básica

El doctor Rafael Baquero obtuvo la licenciatura en física en la Universidad de Praga y la maestría y el doctorado en física en el CINVESTAV del Instituto Politécnico Nacional. Supervisada por el Dr. M. Alexanian su tesis de doctorado versó sobre el "Ancho de una onda de choque en un gas clásico". Postdoctorado en la Universidad de Mc Master en Ontario, Canadá, ha dirigido seis tesis de maestría y 6 de licenciatura. Con entusiasmo se refiere ahora al repunte de la ciencia básica que los últimos acontecimientos pueden significar.

El entusiasmo que se ha suscitado ahora es mundial; por ejemplo, acabo de tener noticias del congreso que se desarrolló en septiembre en Pissa, Italia, donde miles de físicos volvían a la superconductividad. En los años setenta se dio un gran avance después de que se encontró el superconductor que permaneció muchos años como el superconductor record, el niobio-3-germanio (Nb_3Ge), con $23^\circ K$ de temperatura crítica (nosotros lo hemos estudiado aquí con mucho detalle: hay una tesis de maestría que yo dirigí a Juan Gutiérrez Ibarra sobre ese tema), creó una gran expectación, tomando a una investigación tecnológica que se llevó muy a fondo, y la investigación básica de estado sólido avanzó bastante en superconductividad a raíz de ese descubrimiento. Luego, en la década de los ochenta,

la tendencia era a abandonar la superconductividad; ésta empezó a ser cancelada como prioridad, incluso hubo países que abiertamente cancelaron las investigaciones en esta área. Nadie creía que la superconductividad a alta temperatura crítica llegase a ser una realidad.

A nosotros nos mantenía esperanzados el haber intentado probar que había un límite a la temperatura crítica. Lo intentamos con Carbotte y llegamos a la conclusión de que dependía en mucho de los espectros fonónicos. Que si nosotros no podíamos limitar las frecuencias fonónicas en un número, tampoco podíamos limitar la temperatura crítica. Y efectivamente lo que se encuentra en estos materiales nuevos son fonones a frecuencias muy altas, del orden incluso de 500 milielectrónvoltios —eso está reportado en un trabajo hecho recientemente en México, en el Instituto de Materiales, por Roberto Escudero y en otros trabajos, como uno que me acaba de llegar de Karlsruhe (Alemania Federal) que reporta la existencia de fonones a 90 milielectrónvoltios. Todos esos son fonones realmente altos que nunca se habían visto participar en superconductividad. El no haber podido encontrar una base teórica para poner un límite a la existencia de estos fonones fue lo que nos mostró que no podía existir más límite a la superconductividad que el que dieran los fonones mismos, por lo menos si el mecanismo de la superconductividad continuaba siendo la interacción electrón-fonón.

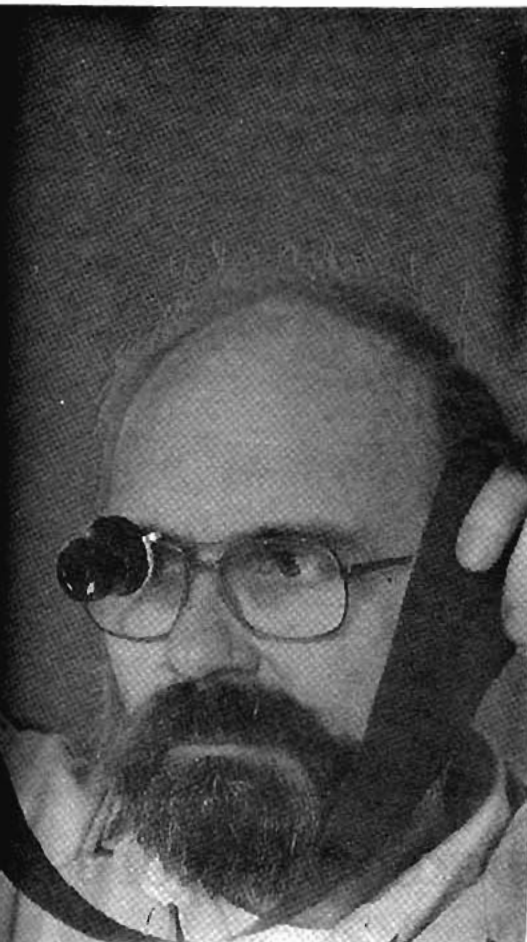
La interacción electrón-fonón

Elementos: De acuerdo a los resultados conocidos recientemente ¿podría pensarse en un límite para esa temperatura crítica o se espera que siga cambiando?

Estamos en la misma situación. Se han descubierto fonones y electrones que participan a energías suficientemente grandes para pro-



Dr. Rafael Baquero a las puertas del Instituto de Física del Estado Sólido.



ducir estas temperaturas críticas de 100°K ; puesto que nadie creía que se podrían encontrar fonones activos en superconductividad a tan alta energía, esto da la esperanza de que todavía se puedan encontrar temperaturas críticas más altas. En este momento en la comunidad científica internacional no hay consenso acerca de cuál sería la explicación al fenómeno que produce la superconductividad. Hay varios mecanismos propuestos.

Yo hablo bajo el convencimiento de que el fenómeno se produce por superconductividad electrón-fonón. Sin embargo, personas muy calificadas, como el profesor Anderson, piensan en un mecanismo diferente: la resonancia de banda de valencia (resonance valence bond). Pero hay otros mecanismos de hibridación de bandas que alguna gente defiende como posible explicación; y también hay quien defiende el mecanismo de polarones.

Tales mecanismos pueden dividirse en dos: unos que requieren de un fuerte ablandamiento de un fonón, es decir, que la red comience a vibrar en energías mucho más suaves, por lo tanto, que comience a vibrar mucho más lentamente a medida que se llega a la temperatura en que se presenta la superconductividad y otros, que requieren, por el contrario, de vibraciones mucho más rápidas de la red para que se permita la superconductividad. Los experimentos de Karlsruhe indican que no existe una variación fundamental en la manera como vibra la red cuando se pasa del estado de la cerámica en que no es superconductora al de superconductora; por tanto, un gran cambio del espectro fonónico no debe ser la base de la explicación.

En esos experimentos me baso para pensar que se trata de una interacción electrón-fonón, y que lo que sucede con la impurificación es la creación de electrones que pueden acoplarse con el fonón ya existente. Creo que ese es el mecanismo que da lugar a los

superconductores de alta temperatura crítica, y existe alguna evidencia experimental de ello. Nosotros encontramos algo similar en los estudios que realizamos, en los últimos dos años, en bisulfuro de tántalo intercalado con glicina. Según parece, tal compuesto produce algo que se asemeja a lo que está sucediendo en estos superconductores de alta temperatura crítica, en tanto es un fenómeno esencialmente bidimensional y en tanto que no hay gran cambio en el espectro fonónico: es la llegada de nuevos electrones a la superficie de Fermi, por diferentes caminos, la que es fundamental a la superconductividad a altas temperaturas críticas.

La necesidad de una ingeniería de la superconducción

Elementos: Esas son las interrogantes teóricas ¿y a nivel práctico?

Los experimentos que se están realizando consisten esencialmente en la producción y el estudio o caracterización de las muestras. A nivel práctico tenemos varios estudios que hacer: hay que empezar por indagar las propiedades mecánicas de las muestras. Se necesita resolver el problema de que las cerámicas tienen propiedades mecánicas que complican su aplicación, son quebradizas, por lo que hay que encontrar las formas de producir distintos materiales con propiedades más fáciles de manejar tecnológicamente. Para hacer circuitos integrados, vamos a tener ese problema; para que resistan las tensiones que provocan los grandes campos magnéticos en el conductor, también. Hay una gran cantidad de problemas de ingeniería que todavía no están resueltos y a los que la gente se avoca incluso en México.

En el Instituto de Física de la UNAM, Lorenzo Martínez está tratando de buscar cómo modificar las propiedades mecánicas de estas cerámicas superconductoras. En el Instituto de Materiales, que

Científico norteamericano examinando una cinta hecha a base de material superconductor.



fue donde se produjo la primera muestra de superconductor de alta temperatura crítica en México, se está tratando de caracterizar las muestras y de producir nuevas muestras haciendo el proceso un poco más sistemático y ensayando nuevos compuestos.

En Puebla tenemos, en primer lugar, el grupo teórico de superconductividad: un grupo que tiene una tradición de doce años de trabajo. Está compuesto por dos investigadores activos en superconductividad y uno más que recién llegó y probablemente se incorpore a la investigación; tenemos tres estudiantes doctorales, hemos realizado 12 tesis de licenciatura y 12 de maestría en el campo de superconductividad, comenzamos la producción de muestras superconductoras, comenzamos a contar con la colaboración de dos expertos en crecimiento de este tipo de muestras y tenemos la ayuda del Departamento de Química del ICUAP donde se han producido ya muestras superconductoras y se seguirán produciendo y caracterizando (ellos tienen aparatos para su caracterización, análisis del espectro infrarrojo, rayos X y para la producción misma de las muestras).

La ciencia mexicana lista para la superconductividad

Una de las principales interrogantes, al dirigirnos hacia el Instituto de Estado Sólido era si en México existía la preparación científica suficiente, como para no ser ésta otra de las revoluciones científicas y tecnológicas, históricas, que nos pasaran de largo, dejando como secuela la incrementación de la dependencia, que funciona, en ocasiones, como freno a la significación social de los avances tecnológico-científicos. De hecho, la conversación se deslizaba ya hacia ahí. Pedimos su puntualización: ¿está la ciencia en México a la altura de los acontecimientos? El doctor Baquero respondió sin



Oxidos Superconductores

El año de 1986 y los primeros meses de 1987 han contemplado el génesis de una revolución tecnológica: el descubrimiento de los óxidos superconductores. Uno de los puntos culminantes en este desarrollo tuvo lugar la noche del 18 de marzo del presente año cuando en una sesión especial sobre superconductividad en el Congreso de la Sociedad Americana de Física realizado en Nueva York, se reportaron los avances más recientes en la búsqueda de superconductores de elevada temperatura crítica. Fue una sesión fuera de serie, con más de 5 horas de duración, a la que el *New York Times* denominó el "Woodstock de la Física".

Para entender el por qué de tanto interés en torno de los superconductores, veamos un poco de la historia de cómo se ha desarrollado la superconductividad. En 1911 el científico holandés Heike Onnes fue el primero a descubrir que algunos metales se volvían superconductores cuando se enfriaban a temperaturas cercanas al cero absoluto 0°K ($\sim -273^{\circ}\text{C}$); esto es, a temperaturas del orden de 4°K ($\sim -269^{\circ}\text{C}$) la conductividad del material se incrementaba súbitamente en varios órdenes de magnitud (a la temperatura que ocurre este cambio se le conoce como temperatura crítica, T_c). Para lograr temperaturas tan bajas era necesario usar helio líquido, de costo muy elevado. A partir de entonces comenzó una búsqueda de materiales que presentaran la fase superconductor a mayores temperaturas críticas; pero fue una búsqueda lenta y difícil. En 1941, se descubrió que ciertas aleaciones de niobio (Nb) se volvían superconductoras a 15°K (-258°C). En 1973, mejoras en las aleaciones de niobio sólo consiguieron elevar la temperatura crítica a 23°K (-250°C); estas temperaturas hicieron posible la aplicación de los superconductores en la fabricación de magnetos usados por ejemplo en aparatos médicos para la formación de imágenes del interior del cuerpo humano.

La revolución se inició en 1986. Durante casi 3 años Alex Muller, físico de IBM Zurich, y su colega Georg Bednorz estuvieron estudiando un grupo de óxidos que contenían cobre y níquel y que presentaban algunas propiedades metálicas intrigantes. En enero de 1986 midieron una temperatura crítica récord de 30°K (-243°C) en un óxido de cobre con lantano (La) y bario (Ba); pero este resultado sólo fue recibido para publicación el 17 de abril de 1986, después



Investigadores participantes en la "Gordon Conference on Crystal Growth" realizada en el mes de febrero de 1987 en Santa Barbara, California. Durante esta reunión el doctor Ching-Wu Chu de la Universidad de Houston reportó un compuesto superconductor estable con una temperatura crítica de 98°K . Al centro de la foto, señalando con una flecha, se localiza el doctor Cristóbal Tabares Muñoz quien junto con la doctora María Eugenia Mendoza Alvarez de la Escuela de Ciencias Químicas de la UAP, obtuvo la primera muestra superconductor en Puebla.

Una revolución tecnológica

Julio Mendoza Alvarez *

de pruebas adicionales para estar seguros del descubrimiento. A partir del reporte de Berdnov y Muller, varios equipos de científicos comenzaron a investigar las propiedades superconductoras de los óxidos de cobre. Para diciembre de 1986, en una reunión de la "Materials Research Society" en Boston, fueron presentados resultados por Shoji Tanaka de la Universidad de Tokyo y Ching-Wu Chu de la Universidad de Houston: la temperatura crítica había sido aumentada a 39°K (-234°C). A finales de 1986 varios grupos más se habían sumado en la carrera de superconductores: los laboratorios de AT&T; el Instituto de Física en Beijing, China; la Universidad de Tokyo y la Universidad de Houston. Después de esto, C-W Chu decidió substituir el lantano por el ytrio (Y) en el óxido de Bardnoz y Muller. Trabajando con investigadores de la Universidad de Alabama registraron signos de superconductividad a 100°K , pero al día siguiente habían desaparecido; después de probar decenas de recetas para tratar de estabilizar las propiedades superconductoras a altas temperaturas, a inicios de febrero de 1987 en seminarios impartidos en la Universidad de California en Santa Bárbara y en la "Gordon Conference on Crystal Growth" que se celebraba también en Santa Bárbara, Chu reportó un compuesto superconductor estable con una temperatura crítica de $T_c = 98^{\circ}\text{K}$ (-175°C). Por primera vez se rompía la barrera de la temperatura del nitrógeno líquido: 77°K (-196°C), un líquido criogénico mucho más barato que el helio líquido. Esto abría las puertas para una aplicación a gran escala de los superconductores.

Después del descubrimiento de Chu, los grupos de investigación en Tokyo, en Beijing, en AT&T, y en IBM siguieron su huella, y substituyendo además con otros elementos tales como el calcio (Ca) y el lutetio (Lt.), lograron varios óxidos que presentan la fase superconductor a temperaturas por arriba de 90°K .

Durante la reunión de primavera de la "Materials Research Society" efectuada el pasado mes de abril en Anaheim, California, los últimos resultados que se han obtenido para los óxidos superconductores indican una T_c para el sistema Y-Ba-Cu-O de 118°K (-155°C); además los investigadores de Sandia Labs. reportaron la fabricación en gran escala de alambres hechos con una matriz orgánica

grandilocuencias ni sofisticaciones lingüísticas, como lo había hecho durante toda la plática.

Esta es una pregunta muy interesante. Es la pregunta que más entusiasmo ha causado en México. Ha sido creado un comité nacional de superconductividad, compuesto por varias personas del Instituto de Física y del Instituto de Materiales, ambos de la UNAM, y algunas personas de fuera de ella, entre quienes está Isaac Hernández, del CINVESTAV y estoy yo, de la UAP. El comité comprende unas diez personas.

En la reunión de conformación del comité hubo una intervención de Jorge Flores, conocido físico que fuera subsecretario para la investigación científica de la Secretaría de Educación Pública y coordinador del Instituto de Física de la UNAM. Dijo que era la primera vez que él veía que la comunidad científica mexicana podía enfrentar con ventaja un descubrimiento que aparejara cosas tan revolucionarias como es éste. También hizo notar que era la primera vez que había hechos importantes en la provincia que pudieran contribuir al desarrollo de esta eventualidad. En realidad fue muy generoso, repitiendo sus palabras, dijo: que era la primera vez que el liderazgo se encontraba en provincia. Es un acto de mucha generosidad de parte de él.

Para contestar directamente a la pregunta: México tiene cómo responder. No creo ni quiero tampoco crear un entusiasmo excesivo. Lo que tenemos es una serie de individualidades bien preparadas que pueden interactuar de manera correcta con la comunidad internacional en este campo, como lo tenemos en algunos otros. En México existe superconductividad; hay gente que ha trabajado durante varios años seguidos la superconductividad. Retrayéndose a diciembre de 1986, podíamos encontrar el grupo de el Instituto de Investigación de Materiales, donde se encontraba Roberto Escudero, y acá en la UAP el grupo que ya

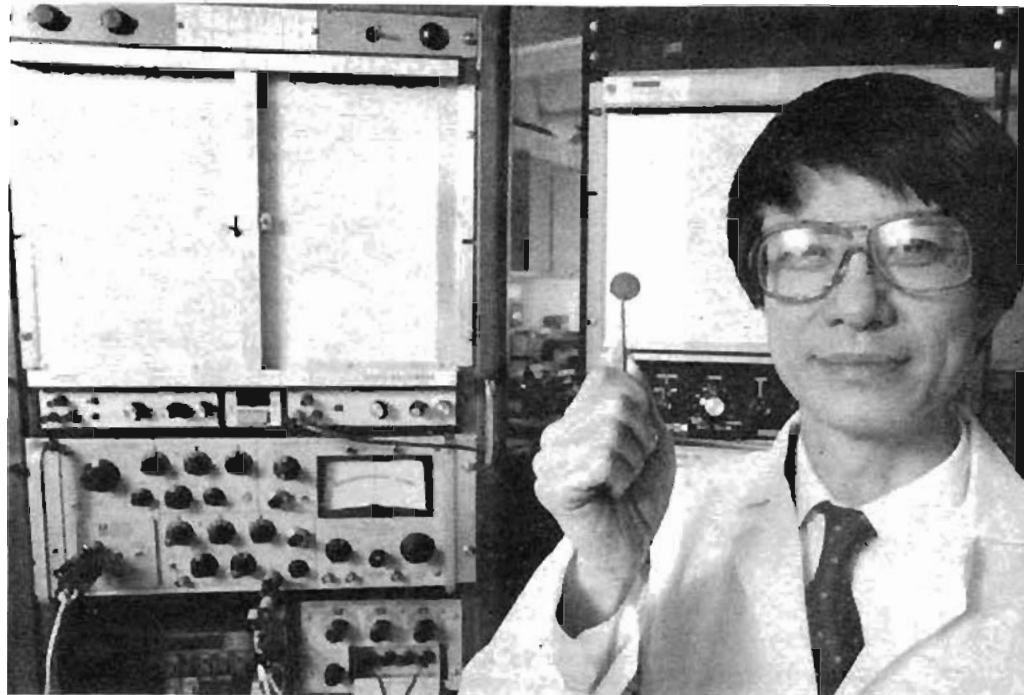
* Universidad de California, Sta Bárbara. Depto. de física, CINVESTAV, IPN.

mencioné y que tiene varios años trabajando en ello. Existió un grupo grande en el Instituto de Materiales que se fue desintegrando por el efecto del pesimismo que se dio a comienzos de la década de los 80 y que fue colocándose en diferentes partes. Algunos de ellos están volviendo; incluso en la lista de las personas que fueron enviadas por la UNAM para participar en el comité nacional de superconductividad podemos encontrar a varios de los que regresan a estas actividades.

México tiene una serie de individualidades que pueden responder a la eventualidad actual, por decirlo así, al tú por tú con la comunidad científica internacional; pero una cosa distinta es tener una especie de ejército científico que pueda encargarse de un impacto tecnológico en el México contemporáneo. Estamos pagando o vamos a pagar errores cometidos en la política de desarrollo científico: poco se cree, en México, en la ciencia. Poco se cree en serio; es decir, poco se invierte tomando los procesos científicos y tecnológicos tal como son.

No podemos improvisar gente. Es un proceso que requiere, mínimo, de diez años. Pero un investigador es una persona que además de doctorarse se ha posdoctorado (dos años más) y que comienza a producir sus propias ideas (cosa que implica, por lo menos, dos años más); así que desde que se entra a la licenciatura hasta que se convierte en investigador son procesos que llevan quince años. Entonces, si tomamos la ciencia en serio, y a México no le queda otro camino que tomar la ciencia en serio y muy en serio, estamos hablando entonces de hacer inversiones que puedan esperar ese tiempo para mostrar su impacto social. Así son las inversiones en cualquier rama que realmente tenga la perspectiva de dar soluciones nuevas.

No creo que con paños de agua tibia se puedan encontrar las bases para que México pueda superar



Ching-Wu Chu de la Universidad de Houston reportó un compuesto superconductor

y $T_c = 79^\circ\text{K}$; Bell Labs. reportó alambres hechos en una matriz con plata y con $T_c = 91^\circ\text{K}$.

Ahora se ha iniciado la carrera por transferir estos óxidos superconductores de materiales de laboratorio al mundo práctico. Para esto, debe ser posible moldear los superconductores en forma de alambres, de núcleos para magnetos, o de recubrimientos delgados para ser usados en circuitos de computadora. Estos óxidos son básicamente cerámicas, y por lo tanto son quebradizos y frágiles, de modo que no será fácil el paso del descubrimiento a la aplicación en dispositivos.

La búsqueda de nuevos óxidos que presenten superconductividad a temperaturas por arriba de los 100°K (-173°C) continúa: sin embargo, el torrente de descubrimientos ha dejado a los físicos con algunos cabos sueltos ya que todavía no se entiende el por qué dichos óxidos son mejores superconductores. Como lo expresa el Prof. Schrieffer de la Universidad de California en Santa Bárbara, que ganó el Premio Nobel junto con Bardeen y Cooper por el desarrollo de la teoría de los superconductores, "puede ser que pasen varios años antes de que sepamos lo que pasa, pero puede ser que no haya límite teórico para qué tan elevada pueda ser la temperatura crítica".

Al haberse roto la barrera de temperaturas críticas de superconductividad mayores a la del N_2 líquido, se abre todo un mundo de posibles aplicaciones, las cuales una vez concretizadas revolucionarán varios campos de la ciencia y la tecnología. La transmisión de energía eléctrica a través de líneas superconductoras evitaría las pérdidas de alrededor del 50% que se tienen en la conducción de electricidad a través de alambres de cobre. La eficiencia de las plantas generadoras de electricidad aumentaría al usar generadores fabricados con electromagnetos superconductores. El uso de potentes magnetos superconductores puede hacer posible la construcción de trenes de alta velocidad que "leviten" sobre los rieles, el problema de refrigerar con N_2 líquido no sería ya crítico; además, la construcción de motores superconductores más potentes y de menor tamaño podría hacer prácticos a los coches eléctricos. Quizás una de las áreas a sentir mayor impacto sea la electrónica: durante varios años se ha trabajado en "microchips" superconductores conocidos como "uniones Josephson", con el inconveniente de que se tenía que usar refrigeración por helio líquido; ahora parece factible el uso de este tipo de dispositivos, que son alrededor de 1000

veces más veloces que los transistores convencionales de silicio, en la construcción de, por ejemplo, sistemas de radar superiores a los actuales, trabajo que pretende desarrollar Westinghouse Electric Corp. La posibilidad de fabricar películas delgadas superconductoras con las mismas características sería el punto de partida para los "superchips" del mañana; IBM está ya trabajando activamente en esa dirección. En el área de la medicina habrá también cambios: los analizadores de resonancia magnética nuclear (NMR) se basan en potentes magnetos superconductores para producir imágenes sin paralelo de los órganos del cuerpo. Con los nuevos materiales se espera poder tener magnetos 10 veces más poderosos que los actuales; aunado a esto, la reducción en el costo y construcción de los analizadores NMR al cambiar de un sistema de enfriamiento por He₂ líquido a uno que use N₂ líquido, hará más accesible el uso de este tipo de instrumentos para el diagnóstico médico. El advenimiento de estos nuevos superconductores pudiera ser la clave para lograr en la práctica la fusión nuclear; en este tipo de reactores se necesita de magnetos muy poderosos que generen campos magnéticos de intensidad suficiente para confinar el plasma que se forma para desencadenar la fusión nuclear.

Aun cuando ya se vislumbran las diferentes aplicaciones que este nuevo tipo de superconductores puede tener, queda mucho camino por recorrer para entender el mecanismo básico que da origen a tan elevada temperatura crítica. Se sabe por ejemplo que pequeños cambios en la composición de la aleación La-Sr-Cu-O pueden causar cambios drásticos en las propiedades superconductoras; se trabaja actualmente para correlacionar el cambio en la estructura cristalina del óxido con el cambio en sus propiedades superconductoras. Para la aleación Y-Ba-Cu-O descubierta por Chu, que es la que hasta la fecha ha dado las mayores temperaturas críticas, se ha determinado que el estado superconductor se produce a mayores temperaturas cuando el óxido se encuentra en la fase cristalina ortorrómbica. La teoría BCS, desarrollada por Bardeen, Cooper y Schrieffer para explicar la superconductividad nos da una relación entre la T_c del material, y las propiedades microscópicas del mismo:

$$T_c \sim \langle W \rangle \exp(-1/N(0)V)$$

donde $\langle W \rangle$ es la frecuencia de los fonones (vibraciones de la red cristalina); N(0) es la densidad electrónica de estados en el nivel de Fermi; y V es la intensidad del acoplamiento electrón fonón. Las investigaciones actuales están dirigidas a encontrar la causa del incremento en T_c: ¿hay un incremento en la interacción del electrón-fonón para una estructura cristalina dada? ¿Existe un aumento en la frecuencia de los fonones causada por algún efecto isotópico, o por la menor masa del átomo de oxígeno? Es claro que si se llega a determinar el mecanismo que permite incrementar T_c, se puede incrementar el mismo y, por qué no, llegar a tener superconductores a temperatura ambiente.

Como hemos visto, la investigación y desarrollo de estos nuevos óxidos superconductores está siendo llevada a cabo en forma multidisciplinaria. La investigación básica se está encargando de dilucidar los mecanismos que permiten tan elevada T_c y la caracterización de los óxidos. La altamente desarrollada tecnología de las cerámicas está haciendo posible el uso práctico de los superconductores; y las diferentes áreas de la ingeniería se avocan hacia los usos factibles de estos nuevos materiales en todas las áreas de la tecnología. Como es usual, el Japón no se ha quedado atrás, y el Ministerio de la Industria y Comercio Internacionales (MITI) ha formado ya un consorcio donde participan investigadores de laboratorios gubernamentales, industriales y universitarios; su meta: "explotar el fantástico mundo de futuras industrias prometidas por los nuevos superconductores".

Es en estos quiebres tecnológicos, como lo es el descubrimiento de los óxidos superconductores, cuando países en desarrollo que aún poseen incipientes tecnologías tienen la oportunidad de sumarse y beneficiarse del desarrollo de tecnologías de frontera. La forma de lograrlo es conocida, no hay nada que inventar: la colaboración estrecha de la investigación básica en las universidades y el desarrollo de la tecnología en las industrias con el total apoyo del sector gubernamental podrá hacer posible que México pueda saltar al "tren" en el que se está gestando el desarrollo de los superconductores, y por poco tiempo ese tren aún se puede alcanzar.

una crisis profunda, a la cual se le han dado toda clase de soluciones políticas —marchando algunas más, otras menos—; México requiere vientos más fundamentales, ideas más de fundamento. Y son posibles, lo está demostrando Brasil, por ejemplo, que está encontrando nuevos caminos y nuevas esperanzas basado precisamente en haber apoyado, por lo menos diez años antes que México, de manera muy seria la ciencia y la tecnología, y de haber tomado las medidas políticas necesarias para que la ciencia pueda salir adelante. En Brasil se han tomado medidas como reservas de mercado, como el uso a fondo de las posibilidades tecnológicas que el país produce... que son medidas que van a la par con el gran apoyo a la investigación.

Resumiendo: depende ahora de muchas cosas, pero fundamentalmente de un apoyo decidido, abundante, suficiente y también prolongado, el que vaya a poder México crear parte de esta nueva tecnología que permite la superconductividad, o el que vaya a presenciar, como ya lo hizo con la tecnología de los semiconductores, la llegada de todos los productos con marcas extranjeras. Esta es una decisión que tiene que tomarse, que tiene que durar (no se trata de dos ni de tres años): incluso hay que estudiar y planificar un poco la formación de recursos humanos altamente calificados.

Prepararse para el futuro (presente)

Es el momento de plantearse la formación de recursos humanos altamente calificados —acababa de decir el doctor Baquero, estableciendo así el vínculo a un nuevo punto que pasa inmediatamente a desarrollar—. De tratar si no de planificarlos, por lo menos sí de crear ambientes dentro de los cuales pueda haber un gran desarrollo. El Departamento de Física del ICUAP ha contribuido con una

idea que a mí me parece trascendental: la creación de la Escuela Nacional Propedéutica y de actualización. Poco a poco se está convirtiendo en el foro dentro del cual se pueden plantear preguntas como de dónde van a salir los próximos cincuenta doctores en física en México, en dónde se van a formar, a dónde van a ir a trabajar, qué planes van a desarrollar, etc. Además el grave problema de homogenizar los niveles de los grados, independientemente de las instituciones que los estén otorgando. Este es un problema grave que implica la constitución de centros de producción de recursos humanos altamente calificados, y ahí el mantener la calidad será crucial.

Volviendo al panorama global, nos falta apoyo. (Aunque, debo reconocer que hemos tenido. Por lo menos el Departamento de Física ha tenido un apoyo bastante importante de diferentes sectores dentro y fuera de la Universidad.) A nivel de colectividad científica de estado sólido en el país, nos falta apoyo: nos falta estabilidad en el apoyo, nos faltan posibilidades de llevar hacia la sociedad nuestras ideas, nos falta un cambio en el ambiente industrial, en general. En México, el industrial, compra una máquina y lo único que le preocupa es cuánto dinero le va a sacar a esa máquina hasta que se le acabe y, obviamente, por obrar con la mayor seguridad, si se le daña manda a Estados Unidos o a Europa o a Japón pedir un técnico que se la arregle. No hay la actitud de jugar en conjunto el momento histórico para tratar de lanzar el país hacia nuevas soluciones.

Nosotros tenemos un aporte a la solución; no tenemos la solución. La solución es muy compleja, requiere de la actividad política, de la actividad industrial, actividad comercial, actividad económica, además de la actividad científica y de la tecnológica. Nosotros podemos ser una base de solución; pero no podremos ser la solución. Nadie puede ser la solución unila-

El nuevo mundo de la Superconductividad*

Productos y tecnologías que alguna vez soñamos

Energía de fusión barata e inagotable, computadoras personales tan poderosas como las mejores, trenes que vuelan sobre rieles a velocidades de avión; se ha dado un gigantesco paso para que todo esto se vuelva realidad. Mientras los científicos desarrollan una nueva generación de superconductores de alta temperatura crítica, plantando la semilla de un mañana casi utópico, corresponderá a los ingenieros recoger la cosecha.

Esto no va a ocurrir de la noche a la mañana. Los nuevos materiales que los investigadores están produciendo en los laboratorios tendrán que ser, todavía, transportados a las fábricas. Deberán superarse barreras significativas antes de que los circuitos experimentales para una computadora superconductora se puedan convertir en circuitos integrados (*chips*) producidos en masa. Una pequeña muestra de alambre está lejos de convertirse en los cables que habrán de atravesar de un lado a otro la nación.

Incluso en la veloz empresa de la electrónica será probablemente hasta 1990 cuando los productos terminados salgan a la luz. En cuanto a los artículos eléctricos, podría tomarse de diez a veinte años para que los nuevos revolucionarios superconductores tengan un impacto significativo en la distribución de la energía. El reto de superar los resultados de laboratorio "podría ser formidable" advierte Paul M. Grant, gerente de investigación en magnetismo de la *International Business Machines Corporation*.

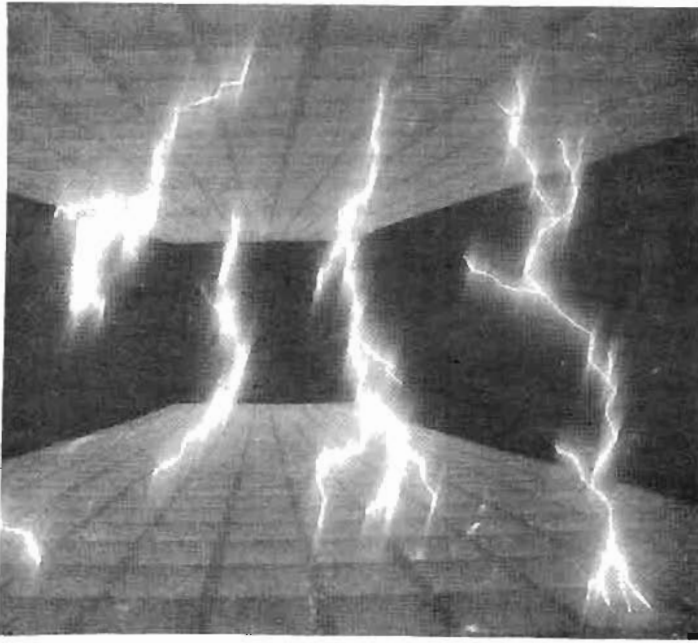
Whisky y Agua

La superconductividad ha estado, has-

ta ahora, limitada a algunas pocas aplicaciones porque los materiales disponibles tenían que ser enfriados a temperaturas extraordinariamente frías, con helio líquido que es muy caro. "El helio líquido cuesta más o menos lo mismo que el Whisky escocés" dice Walter L. Robb, vicepresidente para la investigación y desarrollo en la *General Electric Company*. El nitrógeno líquido cuesta aproximadamente el diez por ciento del agua embotellada. Incluso con sistemas aislantes muy complicados y caros, el helio líquido se escapa mucho más rápido que el nitrógeno líquido, que puede ser protegido con simples aislantes plásticos.

La idea de que pronto será económicamente viable poner la superconductividad en usos innumerables está iniciando proyectos de desarrollo en cientos de compañías de todo el mundo. Las ganancias serán enormes. Y si finalmente se descubren superconductores a temperatura ambiente, el mundo podrá ser transformado por completo. Esos materiales "calientes" podrían suministrar nuevas herramientas, más eficaces, para cualquier tecnología relacionada con la electricidad. Pero es suficiente el proyecto de superconductores a temperaturas de nitrógeno líquido para que se emocionen la mayoría de los ingenieros industriales. Los prácticos superconductores enfriados con nitrógeno podrían ahorrar gastos billonarios y ahorrar la suficiente energía para poner cincuenta plantas generadoras o más dentro de bolas de naftalina. Los alambres de cobre han sido el conductor elegido, pero pierde mucha energía. El cobre absorbe de cinco a quince por ciento de flujo eléctrico en líneas de transmisión de trayectos largos y todavía hay más pérdidas en las líneas locales de distribución. Para la *Pacific Gas and Electric Company*, estas pérdidas suman 200 millo-

* Por John W. Wilson de San Francisco y Otis Port de Nueva York, tomado de reportes de agencias (traducido por María Eugenia López).



nes de dólares al año, "un buen incentivo para usar un nuevo conductor" dice Virgil G. Rose, vicepresidente de operaciones.

Habiendo tanto en juego, ha habido interés en desarrollar líneas de transmisión y generadores de energía incluso con la tecnología superconductor existente. La investigación empezó a fines de los años sesenta pero se interrumpió finalmente cuando la crisis de energía se desvaneció y no se logró abaratar el costo producido por enfriar con helio líquido. De hecho se construyó una línea en los Estados Unidos, una instalación de prueba de 300 pies de largo en el *Brookhaven National Laboratory*; ésta mostró que la tecnología no podía competir con un sistema convencional a menos que todas las necesidades de energía eléctrica de una ciudad fueran suministradas a través de una sola línea para poder minimizar los costos de enfriamiento, dice Carl H. Rosner, presidente de *Intermagetics General Corporation*. Debido a la poca confiabilidad de un sistema así, ninguna ciudad soñaría con poner todos sus watts en un solo cable. Si los nuevos transmisores superconductores pueden ser adaptados a cables que resistan cargas de alto poder y corriente alterna, podrían costarse diez o doce líneas de alimentación.

Por los altos costos ha decaído el interés en usar poderosos imanes superconductores para construir trenes de altas velocidades que se levanten por encima de sus vías. Ese interés

también pudiera estar reviviendo, pero los posibles constructores de los llamados trenes *maglev* (mag por magnética y lev por levitación) más probablemente están en Alemania Occidental o en Japón, países que han seguido invirtiendo seriamente en investigaciones sobre esto; o en Canadá que todavía sostiene un modesto esfuerzo.

William F. Hayes, un oficial de investigación del *Consejo Nacional Canadiense de Investigación* y uno de los creyentes del tren *maglev*, empieza anticipadamente a emocionarse. Los nuevos superconductores tendrán un "impacto tremendo en *maglev*", dice Hayes. "Los mayores problemas estaban en la refrigeración de las unidades y en la seguridad. Todo eso queda ahora eliminado." No son los trenes los únicos vehículos que pudieran beneficiarse. Hayes predice que los motores superconductores, de la mitad o la tercera parte del tamaño de los motores normales, podrán algún día impulsar barcos. Y se eliminará también la contaminación urbana del aire, volviendo prácticos los coches eléctricos.

Probablemente sea en la electrónica donde esté la mejor oportunidad de los EU en la explotación de la nueva tecnología. Ahí, la superconductividad anunciará lo que Sadeg M. Faris llama "la tercera era de la electrónica", después de los tubos de vacío (bulbos) y los transistores. Faris trabajó con *microchips* superconductores conocidos en la IBM como juntas de Josephson. Cuando *Big Blue*, después de

teralmente: ni el gobierno, ni los empresarios. Por eso creo finalmente, que o en México habrá una gran cantidad de trabajo para los científicos y para los tecnólogos, en el futuro inmediato o no habrá un futuro interesante para nadie. Lo digo convencido y aunque suene a advertencia: la crisis que se presenta en México se encuentra en un punto en el cual puede derivar hacia consecuencias muy graves, muy dramáticas para el pueblo mexicano.

El comité nacional de superconductividad

El comité tiene como primer objetivo el tratar de coordinar la actividad científica en torno a la superconductividad. Vamos a hacer una solicitud de recursos a nivel nacional y vamos a tratar de "centralizar" esto en diferentes partes para que, en primer lugar, conozcamos con mucha velocidad los trabajos de unos y de otros. En esto las ideas son muy importantes, los resultados experimentales también, es muy importante que se hagan rápidos nuevos ensayos. Vamos a crear un ambiente de permeabilidad hasta hoy inexistente. Trataremos que si alguien propone un experimento en Puebla, éste se pueda hacer en la UNAM o se pueda hacer en el CINVESTAV, y que realmente se haga con buena voluntad; que si alguien propone, por algún experimento que hizo, que se haga un cálculo, entonces la gente teórica inmediatamente responda a eso, de tal manera que podamos tener una retroalimentación muy rápida. Intentaremos además hacer que todos los resultados circulen, para evitar que los trabajos se dupliquen, o que se estén ignorando trabajos y resultados obtenidos por otros.

El problema de comunicación del trabajo externo también lo queremos resolver: debido a que las cosas están sucediendo tan rápido, uno ya no recibe revistas (la información es ya vieja para

cuando la revista se recibe), las noticias salen en *prepublicados* (*pre-prints*), cosas que la gente escribe y les saca fotocopias; no suele ser una gran cantidad de estos materiales los que a cada uno nos llega, pero sí sumándolos a todos, juntándolos; intentamos hacerlos circular muy rápidamente (yo, por ejemplo, recibí una muy buena cantidad de *preimpresos* de parte de Lorenzo Martínez, en el IFUNAM; alrededor de 50 que hicieron el favor de fotocopiar para mí). Nosotros también estamos intentando hacerles llegar todos los que recibimos, lo más rápido posible.

Otra de las cosas que intentamos es dar una base mínima sobre la cual permitir la entrada de gente nueva, que tiene conocimientos, que son especialistas en alguna rama que puede ser útil a la superconductividad; pero que no conoce la superconductividad. Hay grandes nombres que se pueden mencionar: todo mundo conoce los importantes cálculos de Jaime Keller, premio nacional de ciencias; son cálculos muy interesantes que pueden ser utilizados en superconductividad, pero Jaime no es especialista en superconductividad. Para lograr un esfuerzo unificado, entonces, vamos a hacer unos cursos rápidos: voy a dictar un curso en la UNAM el 28 y el 29 de mayo, un curso muy intenso de 4 sesiones de hora y media el 28 y una sesión de hora y media el 29, y voy a hacer lo mismo el 25 y el 26 en el CINEVESTAV. Esto con la idea de que una vez que la gente conozca la problemática general, tenga el marco general de qué es la superconductividad y de los problemas que plantean estos nuevos elementos superconductores y pueda saber dónde la actividad en la cual es especialista puede ser útil. Con esto intentaremos aunar gente al movimiento de la superconductividad, bien coordinada.

Estas son las primeras finalidades del comité de superconductividad. Probablemente a futuro, hagamos algunas propuestas direc-

catorce años de trabajo, decidió en 1983 que la tecnología era algo inútil, Faris lo dejó y encontró *Hypres Incorporated*. En febrero, menos de cuatro años después, *Hypres* descubrió el primer sistema basado en las junturas de Josephson. Ahora Faris asegura que *Hypres* será el primero en construir *chips* con los nuevos materiales ya que "nadie más en el mundo tiene una línea manufacturera produciendo *chips* JJ".

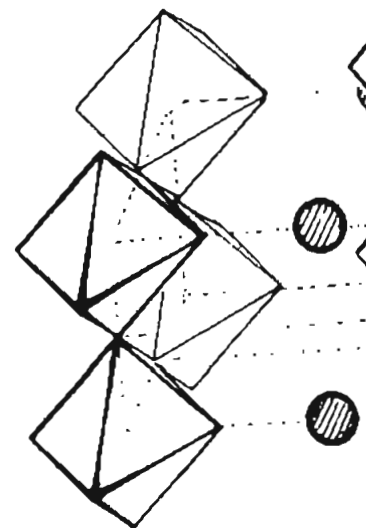
Superchips

Grandes compañías de electrónica, desde la IBM hasta la *Varian Associates* compiten en la investigación de los nuevos superconductores. "Los tipos están trabajando como maniáticos" dice John K. Hulm, director de investigación corporativa de la *Westinghouse Electric Corporation*. "No he visto nada así en muchos años." La *Westinghouse* quiere usar las junturas de Josephson, que son hasta mil veces más rápidas que los transistores convencionales de silicón, para construir sistemas de radar que superarán a cualquiera de los actualmente disponibles. En la *Varian*, un destacado fabricante de equipo para la producción de semiconductores, se hace un esfuerzo intensivo para verificar el trabajo de superconducción en películas delgadas realizado en las cercanías de la Universidad de Stanford. Estas películas podrían ser el punto de partida de los *superchips* del mañana.

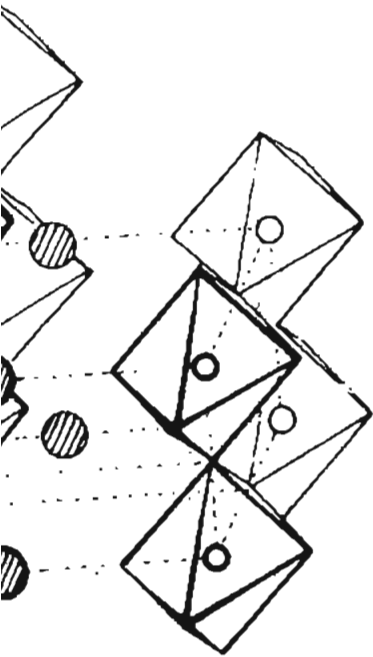
La salud es otra de las áreas en las que los superconductores podrían tener un impacto inmediato. Dispositivos de explotación de resonancia nuclear magnética (RNM) dependen de poderosos imanes superconductores para producir una visión sin precedentes de los órganos del cuerpo humano. Los nuevos materiales prometen imanes diez veces más poderosos que los que ahora se usan; y si las máquinas RNM se deshicieran de los costos y de las dificultades asociadas a sus sistemas actuales de enfriamiento con helio, su mercado podría ser mucho mayor. "Se podrían poner los RNM en los hospitales más pequeños, incluso en clínicas" dice el Dr. Paul Winson, director de desarrollo de negocios en el *Britan's Oxford Instruments Group PLC*, el principal proveedor de imanes RNM. La empresa *Diaconic Incorporated* que ha vendido más de cien ex-

La estructura del K_3NiF_4 es el tipo de estructura presentada por los óxidos superconductores de alta Tc. La sección punteada en la parte inferior del dibujo representa la celda unitaria de la estructura peroxquita cúbica; si tales secciones se desplazan como se muestra en la figura, se forma una estructura tetragonal con c 3a, siendo a la longitud del parámetro de celda de la estructura peroxquita.

La estructura del K_2NiF_4 representada en función de los oxígenos que rodean al catión menor (Ni) en una geometría octaédrica, formando una estructura en capas.



Modelo del prototipo (cúbico) de la peroxquita ABX_3



ploradores RNM, calcula que el enfriamiento con nitrógeno líquido pudiera ahorrar 100 000 dólares al año en costos de operación por cada máquina.

Los nuevos materiales superconductores podrían producir también imanes que darían a los físicos teóricos una mejor visión del interior de las partículas atómicas. Con sólo eliminar el helio que se necesitaba para enfriar los 10 000 imanes gigantes en el supercolisionador superconductor propuesto, se ahorrarían 160 millones de dólares del costo presupuestado de 4.4 billones de dólares del triturador atómico, además de acortar en un 25% el uso de energía. Los investigadores argumentan que el proyecto no debe detenerse en espera de que se elimine al helio porque hay luz verde del presidente desde principios de año, pero que debe mantenerse abierta la posibilidad de sustituir esos imanes. "Podríamos usarlos para multiplicar cuatro o cinco veces la energía del instrumento" dice Stanley G. Wojcicki, director suplente del proyecto. "Eso daría un tremendo impulso al alcance científico."

Ultimamente los físicos esperan que los nuevos superconductores den la clave de la fusión nuclear práctica. Esos reactores necesitan poderosos imanes para contener el calor intenso de la reacción, que será incluso más caliente que el sol. El esfuerzo norteamericano de fusión magnética ha sido recortado en un 20% desde 1985, llegando a 345 millones de dólares este año. El Laboratorio de Física de Plasma de la Universidad de Princeton está siendo rebasado por los proyectos rivales de Europa y Japón. Robert M. Hill, científico del *SRI International*, espera que los nuevos superconductores revivan los proyectos de fusión.

También se podría impulsar la Guerra de las Galaxias. La Organización para la Iniciativa de Defensa Estratégica de la Oficina de Innovación Científica y Tecnológica ha asignado 500 000 dólares este año a la investigación de superconductores y planea elevarlo a 2 millones de dólares el año que entra. No es difícil entender el interés en esto, después de todo los sistemas que se transportan al espacio, contruidos con superconductores, no necesitarían ser enfriados: en el espacio "la temperatura ambiente" es hasta más fría que la del nitrógeno líquido.

tas del comité o de la comunidad científica que trabaja en superconductividad para desarrollar tecnología. Depende mucho de que logremos resolver los problemas que tenemos con los materiales, que son problemas de ingeniería de materiales.

Apenas llevamos un mes de haberlos organizado y los resultados ya son grandes; claro que para tener resultados más trascendentes habrá que esperar por lo menos un año, un año para que la gente haya logrado sintetizar propuestas interesantes.

Propuesta para los investigadores poblanos

Elementos: ¿Y en Puebla...?

En Puebla estamos tratando de organizar un programa universitario de superconductividad. La iniciativa sale de la Secretaría de Investigación y Posgrado. Intentaría hacer lo mismo que se está realizando a nivel nacional; coordinar todos los esfuerzos en diferentes direcciones. La base es lo que pueda contribuir la gente que sabe superconductividad o de producción y caracterización de muestras; pero hay preguntas de todo tipo. Las hay para que ingenieros las respondan, para químicos, y hay otras que van más allá de esos límites, por ejemplo, ¿cuáles son los minerales que existen en Puebla? Esto es importante, porque si sabemos con qué materiales se cuenta, si se pueden construir estos materiales con los que son abundantes en el estado, o en el país, hacia allá vamos a dirigir nuestra investigación, hacia los productos que contengan esos minerales, ya que sabríamos que son fáciles de obtener y de canalizar a la aplicación tecnológica.

Sería también interesante que alguien estudiara toda la problemática política, jurídica, legal, económica de la experiencia brasileña: ¿Cuáles son las medidas que han tomado?, ¿en qué circunstancias?, ¿qué desarrollo tecnológico tenían cuando las tomaron?,

¿qué piensan ellos, ahora, de haberlas tomado?, ¿cuál ha sido el ambiente de esa experiencia?, y ¿cuáles sus logros? Estas serían otras cosas que nos gustaría que se estudiaran.

Otro punto interesante es la posibilidad de planear la formación de recursos humanos. Otro, que debe ser conocido por la colectividad científica, si quiere plantear con cuidado y en términos adecuados, las posibles consecuencias tecnológicas, es conocer cuáles son las leyes y los compromisos vigentes acerca de tecnología y de ciencia? Es importante que se sepa y se conozca el marco real de acción dentro del cual puede crearse un impulso tecnológico fuerte en México. Basados en el conocimiento de ello podríamos tratar de proponer que se lleven a cabo algunas acciones o, eventualmente, reformas que permitan lanzar un proyecto de consecuencias más predecibles y más esenciales.

Elementos: ¿Y se ha recibido apoyo oficial debidamente?

Lo que hizo CONACYT de inmediato fue crear un fondo especial de apoyo —no sé la cantidad, no podría yo mencionar ninguna cifra—, manejado por la división de tecnología de la Dirección adjunta de Desarrollo Tecnológico. Nosotros metimos hace ya algún tiempo un proyecto bastante grande a CONACYT y está en evaluación. Supongo que van a otorgar los recursos para poder empezar un laboratorio de superconductividad. Nosotros hemos tenido superconductividad teórica, pero no experimental, pero sí tenemos ya a las personas que pueden echar a andar este proyecto.

Tenemos también abierta la posibilidad de meter un proyecto a la OEA; pero quisiéramos que toda la universidad lo presentara. Estamos en diálogo con la Secretaría de Investigación y Posgrado para ver si podemos elaborarlo, con una base firme, y llevarlo a la OEA, para desarrollar todas estas ideas alrededor de la superconductividad.



Participantes en la V Escuela Internacional de Crecimiento Cristalino celebrada en septiembre de 1983 en Davos, Suiza. En el extremo izquierdo señalado con una flecha se encuentra el doctor Georg Berndoz, quien junto con su colega el físico Alex Muller, ambos de la IBM Zurich, reportaron en enero de 1986 una temperatura crítica record de 30 K. Caso al centro de la foto señalado con una flecha está el doctor Cristóbal Tabares Muñoz experto en cristalografía e investigador de la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Puebla.

Aparte, a nivel nacional, supongo que el comité culminará con un programa nacional de superconductividad. Curiosamente el programa nacional de superconductividad es un programa que el departamento planteó en 1974; es el primer proyecto escrito —yo lo tengo todavía, en ese entonces el ingeniero Rivera Terrazas era todavía el rector—, lo planteamos en conjunto con Carlos Cambero y otros compañeros. Y decíamos ahí que una de las cosas por las cuales se debería luchar, es la creación de un programa nacional de superconductividad.

Ingeniería o política

Otra de las preocupaciones que habían rondado por nuestras cabezas, en tanto entrevistadores, era: si tenemos en México los

científicos suficientemente preparados, ¿tenemos también a los ingenieros y a los tecnólogos capaces de traducir estos aportes científicos en máquinas, aparatos, implementos que mejoren nuestra vida? Formulamos la pregunta más o menos en los siguientes términos:

Elementos: en México la ingeniería cobró un importante papel, por ahí de los cincuenta en el desarrollo del país. De hecho antes de que habláramos de físicos hablamos de ingenieros —quizá, después, doctorados en física—. Según los rubros en los que se esperan los impactos principales de la nueva tecnología: computación, medicina, transporte... ¿De dónde va a salir la posibilidad de construir nuevos vehículos, pensando además en las pecu-



liaridades del territorio nacional?, ¿o nuevas plantas eléctricas generadoras, tomando en cuenta el posible aprovechamiento de la energía solar y tomando en cuenta las innumerables poblaciones dentro del territorio nacional que aún carecen del servicio eléctrico, quizá nada más debido al costo del cableado? Puede ser que toque esto a los ingenieros, y las ingenierías en México sí son masivas, independientemente de los problemas de educación que cursan...

La respuesta fue pronta, cierta:

El problema principal es de decisiones políticas. Esto no debe ocultarse. Una cosa es la capacidad que tiene un país de hacer algo y otra es la capacidad que tenga de usar esos conocimientos. El desarrollo de México en

los últimos años es grande: el conocimiento, en el país, de ninguna manera es despreciable. Nos coloca ya en el umbral del segundo problema: una cosa es saber hacer las cosas, tener cómo hacer las cosas, y otra es poderlas llevar a cabo, encontrar el marco socioeconómico para llevarlas a cabo. Se conocen muchas historias que yo no quiero comentar; pero, por ejemplo, yo estoy convencido de que ingenieros mexicanos pueden hacer autos, sin embargo, no se hacen, estamos llenos de patentes extranjeras. No sé si eso sea conveniente o no. Pero estoy seguro de que ese, como muchos otros, es un caso en el que existe la capacidad ingenieril para hacer el trabajo, pero no se hace, quizá por razones económicas o políticas, no sé.

Este es un aspecto que tendrá que irse tratando cada vez más abiertamente. ¿Por qué es que existe la capacidad tecnológica y científica de hacer las cosas, pero que no existe el ambiente económico y político dentro del cual se puedan realizar? Eso compete a medidas políticas que salen de la comunidad científica; que interesan a la comunidad científica, pero que salen de su ambiente natural.

Los sueños tienen cabida

Elementos: ¿Cambiará esto el panorama educativo, al menos como lo modificó la introducción de la teoría de conjuntos desde la enseñanza preescolar?

Indudablemente. Esta es una de las grandes ventajas. Debo confesar que yo tengo un gran entusiasmo por ello. Creo que es lo mínimo que puede resultar de este programa nacional. Me entusiasma la posibilidad de que a la luz de este cisma nuevos buenos programas de física se generen, de que se haga mucha divulgación científica. Uno de los aspectos del programa que pusimos a consideración de la Secretaría de Investigación y Posgra-

do es la divulgación: la necesidad de preparar divulgadores profesionales, gente que divulgue cosas que en verdad conozca. Hemos obtenido un gran eco. Ya se ha comenzado a divulgar. Germán Martínez, el director del planetario, ha utilizado su programa de los sábados en un noticiero de radio; y el planetario está llegando a convertirse en un centro de divulgación realmente atractivo. Y el que sea atractivo es fundamental.

Hay que llegar a la persona de quince años. Hay que mostrarle a ellos que la física tiene futuro y que la física es parte del futuro de México —si es que el futuro de México tiene el interés que todos queremos que tenga—. A ellos hay que entusiasmar, hay que hacerles pensar que la vida no nada más consiste en ganar unos pesos para comer, que la vida debe hacerse trascendente. Que el joven tiene que llevar a cabo sus sueños, que eso le permitirá una vida mucho más interesante y que por lo menos en Puebla, es la Universidad Autónoma de Puebla la que ofrece esa opción. Eso es lo que debemos transmitir al muchacho, al que sueña todavía, no al que ya perdió los sueños y está conforme con que las cosas vengán como vienen y sigan como están.

La sociedad debe luchar por que la ciencia no se convierta en un poder enfrentado a ella

Elementos: Por último: hemos hablado de muchas cosas positivas, pero ¿tendrá esto aspectos negativos que puedan repercutir en el hombre?

Hay una situación común que se refiere a toda la historia de la humanidad, no sólo a la de la superconductividad: el conocimiento da poder, siempre se ha visto en la historia. Uno puede darse cuenta del poder que se puede ejercer sobre cualquier país: del poder que se ejerce a través del conocimiento tecnológico. Lo enorme y lo contundente que es ese poder y cómo interfiere en

nuestras vidas diarias. Uno puede entonces pensar que la superconductividad va a acrecentar ese poder: es un conocimiento que puede permitir un mayor dominio de las leyes naturales —sobre todo de una manera masiva— y que va a permitir una comunicación y un manejo de la información extraordinariamente rápida... Vamos a decir para control, por ejemplo: las computadoras permiten un control sobre la gente tremendo, porque permite el manejo de cantidades masivas de información... Nadie está consciente de hasta qué punto la humanidad está controlada por la existencia de estas maquinitas tan interesantes y tan útiles. También la superconductividad va a permitir cosas de ese tipo.

Sin embargo, un destino al cual el hombre no puede escapar, es avanzar cada vez más profundamente en el conocimiento de la naturaleza. Desgraciadamente el conocimiento técnico y científico ha adelantado de una manera gigantesca en este siglo, como antes jamás lo había hecho —el conocimiento científico y tecnológico adquirido por el hombre digamos, hasta el año cincuenta, puede ser un dominio que pudiera parametrizarse a diez veces más para lo que el hombre domina a la naturaleza hoy en día—, pero socialmente nuestra comprensión de la naturaleza, el uso de valores morales, la comprensión filosófica de ello se encuentran mucho más atrás; y eso hace que el poder se emplee a veces de manera negativa, por lo menos de una manera que localmente en el tiempo se manifiesta como muy negativa.

Todo esto puede acarrearlo también la superconductividad. Pero si creemos, en general, que la humanidad evoluciona hacia algún progreso, debemos creer que también el conocimiento nos traerá finalmente una vida mejor: finalmente nos enseñará a poner al hombre como valor supremo. Quizá ayude a que eso pase de ser un sueño a algo real.

