



© Fondo de Cultura Económica

EL ENCANTO DE LAS SUPERFICIES

Autor: FRANCISCO MEJÍA LIRA / JOSÉ MÓRAN LÓPEZ

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [NOTICIA PARA EL LECTOR](#)
- [I. INTRODUCCIÓN](#)
- [II. LA SUPERFICIE: ESE SER IMAGINARIO](#)
- [III. ¿UNA PINTURA DE DIAMANTE?](#)
- [IV. LAS TELAS, EL VESTIDO, LA MODA, LA LAVADA Y TODO ESO](#)
- [V. LA RESBALADA MÁS RÁPIDA DEL MUNDO](#)
- [VI. LA PIEL](#)
- [VII. ¿FUSIÓN SUPERFICIAL?](#)
- [VIII. UNA ALFOMBRA VOLADORA](#)
- [IX. LAS PRINCIPALES TÉCNICAS](#)
- [X. LA IMPORTANCIA DEL ULTRA-ALTO-VACÍO](#)
- [XI. RADIACIÓN DE SINCROTRÓN](#)
- [XII. ESPECTROSCOPIA DE ELECTRONES AUGER](#)
- [XIII. DIFRACCIÓN DE LOS ELECTRONES DE BAJA ENERGÍA](#)
- [XIV. CONCLUSIÓN](#)
- [BIBLIOGRAFÍA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



Primera edición. 1992

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

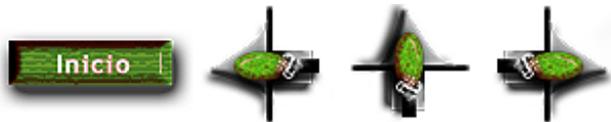
D. R. © 1992, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3947-2

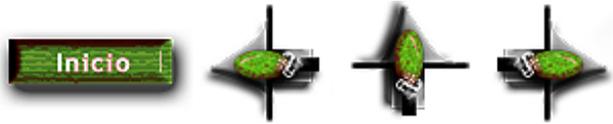
Impreso en México



DEDICATORIA

FRANCISCO: El espacio que dejas es infinito y multidimensional.

PARA: Angélica, José Manuel, Cristina y Luis Fernando. J. L. M. L.



NOTICIA PARA EL LECTOR

Poco se parece la forma final de este libro al proyecto inicial. La forma imaginada estaba cargada de ambiciones, muchas de las cuales fueron abandonadas en el camino. Apenas dados los primeros pasos nos dimos cuenta de que ese camino se quedaría completamente corto antes de siquiera acercarse a un punto desde donde se divisara, en el horizonte, alguno de los destinos. Algo así como lo que dice García Lorca acerca de otro camino:

No conseguirá nunca, tu lanza herir el horizonte.

La montaña es un escudo que lo guarda.

En el caso de este volumen, la montaña representó muchas cosas. Así, tuvimos que curarnos del deseo (enfermizo) de incluir una descripción completa de los procesos para conocer la estructura de un sólido. Tarea que pensábamos que debíamos cumplir antes de hablar de las superficies. La cura fue fácil. Encontramos en esta colección de La Ciencia desde México el excelente volumen 26, *Arquitectura de sólidos y líquidos* de Eliezer Braun. Varias partes que ya se incluían en nuestro libro de superficies desaparecieron: el libro de Eliezer Braun las contiene. Esperamos que la salida haga más liviano el volumen y también su lectura.

Muchos otros temas han sufrido parecida suerte. Referiremos al lector a los títulos de La Ciencia desde México en su momento. Al final de este volumen se encuentra una lista de los libros que nos han sido útiles. No vaya a pensarse que con este procedimiento de hacer que otros libros nos hicieran parte de la tarea nuestro horizonte se aclaró. Fue más bien al contrario: pareció que sacábamos agua de un océano inmutable. Hubimos de optar por la selección de algunos temas, lo que nos llevó al libro que entregamos ahora, y un volumen en el que tratamos de ejemplificar la variedad de aplicaciones que nacen de los estudios recientes del comportamiento de superficies para luego presentar algunas de las técnicas más importantes. Consideraríamos cumplido nuestro objetivo si habiendo llevado al lector hasta las últimas páginas le hubiéramos ayudado a comprender la forma en que se extrae información de los experimentos. O sea, lo hubiéramos interesado en lo que con bastante frecuencia se denomina *picología*. Este término se debe al hecho de que los datos experimentales se presentan en gráficas que por lo general contienen curvas con máximos (*picos*) cuya interpretación nos revela las propiedades del sistema bajo estudio.

Aparte de las entidades de la ciencia de superficies desfilan por las páginas del libro algunos otros personajes que, aunque venidos de las páginas de la literatura, no son menos reales. Por ejemplo, aparecerán el buen amigo coronel Aureliano Buendía y Melquiades, sabio gitano, portador de novedades en cada visita a Macondo, ambos provenientes del universo de García Márquez. Otros miembros de la familia Buendía se asomarán también de cuando en cuando. Compartimos la opinión de Freeman Dyson (*Perturbando el universo*) de que el arte y, en particular la literatura, ha ayudado tanto o más que la ciencia para producir la imagen que nuestra época tiene del Universo. Esperamos que los epígrafes nos ayuden a presentar, al lector, la imagen que tenemos de nuestro campo de investigación y que complementen lo que se dice en cada parte. O al revés, que nosotros complementemos la visión de la literatura.

Una buena parte del trabajo necesario para escribir la forma final del libro se realizó durante la estancia de uno de nosotros (FML) en el International Centre for Theoretical Physics. En particular, uno de nosotros (FML) agradece la hospitalidad del doctor Abdus Salam, fundador y director del Centro y las discusiones que tuvo acerca del problema de fusión superficial con el doctor C.-Kim Ong de Singapur durante esa estancia. Ya puestos a agradecer, la lista crecería hasta desbordar los límites que se considerarían razonables si mencionásemos a todos los que de una forma u otra han contribuido a este pequeño volumen. Esperamos la comprensión de todos ellos. Sin embargo, debemos agradecer de manera especial a los doctores: M. A. van Hove de la Universidad de California en Berkeley; Richard Williams de RCA (Princeton); y Luis Vicente de la Facultad de Química de la UNAM, cuyas contribuciones de diversa naturaleza repercutieron mucho en el libro.

Inicio



I. INTRODUCCIÓN

... frente al pelotón de fusilamiento, [...] había de recordar aquella tarde remota en que su padre lo llevó a conocer el hielo. G. GARCÍA MARQUEZ

PODEMOS imaginar la sorpresa de Aureliano Buendía, el de García Márquez, el de *Cien años de soledad*, cuando su padre lo llevó a conocer el hielo: sentir el aliento glacial, ver la claridad del crepúsculo despedazada en estrellas de colores por las infinitas agujas del hielo, pagar para tocarlo, oír a su padre afirmar que se trata del invento más grande del mundo, para luego retirarse con un recuerdo atesorado para siempre en la memoria. Con la mente encantada por la fuerza de la magia de un bloque de hielo que aparece por primera vez en tórridas latitudes, camina Aureliano mientras la mano que vivió la tersura y el frío del raro objeto es acunada en su otra mano. Tiene que ser un recuerdo único para aflorar frente al pelotón de fusilamiento.

Preguntémonos por la última vez en que nuestra mente fue hechizada de manera siquiera comparable a como lo fueron las de Aureliano y su padre José Arcadio. Si bien es cierto que en algún momento apareció en nuestras vidas la sorpresa que produce ver por primera vez un bloque de hielo, también lo es que éste no es tan insólito en nuestra actualidad y que pronto dejamos de verlo con la necesaria curiosidad. O al menos, dejamos de hacerlo hasta que García Márquez nos revive el hechizo de esa primera y lejana ocasión cuya historia duerme en alguna parte con otros recuerdos. Entonces podemos pensar en la superficie del hielo, en el intercambio de calor entre ella y la mano de Aureliano, en la magnífica sensación de tersura, en los efectos de la luz al cambiar los dominios de la atmósfera por los del hielo y los que se producen cuando vuelve del gélido sólido al aire, y en la continua fusión del bloque en un clima tropical. Decir que es un recuerdo que engloba experiencias que no son sino fenómenos de superficie pudiera parecer como saltar de los jardines de Semíramis a un albañal. Pero, ¿cuántas de nuestras experiencias dejan de incluir algo que pudiera llamarse fenómeno de superficie? Localicemos en el cajón de los recuerdos aquéllos que obviamente fueron un fenómeno de superficie: una caricia; la aspereza de una prenda; los brillos de una gema; la pesada gota de lluvia que rueda lentamente por la mejilla de Jaromir Hladik...

No tardaremos en darnos cuenta de que casi todo conlleva un fenómeno de superficie. Por lo menos nuestro contacto con el mundo, sobre todo si es amable, empieza siempre en alguna superficie.

Aun en el interior de nuestro cuerpo tales fenómenos superficiales resultan muy importantes. Nos dicen los fisiólogos que nuestra sangre y el aire que respiramos se encuentran con una tenuísima membrana de por medio, en unos pulmones que tratan de aumentar lo más posible el área en que ese encuentro suele suceder. Nuestra imagen del cerebro trae consigo las circunvoluciones que tratan de aumentar la región donde realmente ocurre nuestra vida y nos hace ser lo que somos.

En el exterior, fuera de nuestros cuerpos, los fenómenos de superficie se multiplican: la fotografía que congela nuestros recuerdos; el recubrimiento de cromo de los filos de una navaja; el plateado círculo donde brilla un arcoiris y donde se esconden, codificados, los ordenados sonidos de la música que arrancamos a destellos de un disco compacto; la imagen en los espejos, esencial para quienes los frecuentan; la luz robándose los colores del rostro de una *Madonna* de Rafael, proceso terrible que acarrea la prohibición, difícil de entender por los turistas, de no utilizar flash; estas letras sobre esta página; el suave contacto de la piel sobre la piel; etc., etcétera.

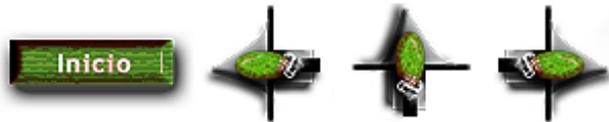
Nuestro primer problema es, ya que no queremos producir una enciclopedia necesariamente incompleta sino tan sólo un libro introductorio (incompleto aun como introducción), delimitar el tipo de superficies sobre las que discurrirán nuestros comentarios y el sentido en que nos referiremos a ellas.

La palabra superficie está preñada de significado y no siempre quiere decir lo mismo. Antes que nada debemos acordar lo que entenderemos por ella en este libro. El capítulo II tiene la misión de concretar el significado de la palabra superficie y la clase de problemas que queremos tratar. Nuestro interés se centrará principalmente en los materiales sólidos. Esta restricción la hacemos con gran pesar, ya que nos quita muchos de los fenómenos de superficies que hemos mencionado; comentamos sólo casos muy particulares de superficies líquidas. Mas los que quedan en nuestro corral no son menos interesantes.

Un problema que se inferirá a estas páginas será tratar de comunicar al lector qué tanto se puede decir de la forma en que se acomodan los átomos en la superficie de los materiales sólidos. Porque, si bien las superficies aparecen

por doquier, su estructura no es fácil de conocer. Y no es sólo la curiosidad lo que nos impele a estudiar la estructura de una superficie. Hay muchísimas razones prácticas y económicas detrás. Para ilustrar la importancia que tiene el conocer bien las superficies y los fenómenos sobre los que influye la exactitud de ese conocimiento, los capítulos III al VIII presentan una discusión somera de algunos problemas de interés tecnológico.

Uno podría pensar que el estudio sistemático de los materiales sólidos se inició en sus superficies. Pero no. A pesar de que muchos de los fenómenos que percibimos de manera inmediata se dan donde termina el sólido, primero se estudiaron las propiedades del interior o bulto. Resulta que estudiar la superficie es más difícil en general. Sólo hasta que ciertas técnicas evolucionaron en los últimos años se empezaron a develar las propiedades y a aparecer una enorme riqueza de fenómenos interesantes propios de las superficies. La descripción de algunas de las técnicas para estudiar esos fenómenos de superficies es la principal finalidad de este libro. Sin pretender ser exhaustivos, los capítulos IX al XIII presentan las técnicas más usuales para estudiar las superficies de los materiales sólidos. Presentamos, en el capítulo XIV, una mirada retrospectiva, y colectamos una serie de afirmaciones acerca de la fisicoquímica de superficies a manera de conclusiones.



II. LA SUPERFICIE: ESE SER IMAGINARIO

Unos dicen que, puesto que el mundo exterior existe, hay que negarlo;

otros que, puesto que no existe, hay que inventarlo;

otros que sólo existe el mundo interior.

OCTAVIO PAZ

EN EL prólogo a un bestiario, necesariamente incompleto, denominado *El libro de los seres imaginarios*, Jorge Luis Borges y Margarita Guerrero se disculpan por no incluir al príncipe Hamlet, ni al punto, la superficie y el hipercubo. Todo esto nos lo dicen como parte del discurso en que anuncian que no todos los resultados de la imaginación de la Humanidad se incluyen en su libro.

En un esbozo de doctrina del conocimiento, señalan Borges y Margarita Guerrero que casi todo el Universo debería aparecer en una obra completa que llevase el nombre de su libro. La inclusión de cada uno de nosotros estaría, tal vez, justificada. Lo intrigante: ¿qué quedaría fuera?

Preferimos imaginar que Borges se refiere a la superficie de los matemáticos: ese ente que ellos representan en nuestro espacio de tres dimensiones con algo que muchas veces parece una sábana. Pero no tiene espesor, nos advierten de inmediato los señores matemáticos. De la misma manera, nos dicen, el punto no tiene extensión: *no hay puntos "gordos"*. Agreguemos la recta *que se extiende desde el infinito y va hasta el infinito* y casi es para sentirse frustrados por no tener un comentario borgiano de los imaginarios seres que son el punto, la recta y el hipercubo. Tendremos que vivir con la pregunta de cómo habría descrito Borges estos términos matemáticos tan serios. Las respuestas a estas inquietudes serían sólo el comienzo de la aclaración que pretendemos en este capítulo. Como se verá más adelante, las superficies varían dependiendo de lo que se quiera estudiar.

El concepto intuitivo de que precisamente donde termina un cuerpo hay una superficie, es también una idealización que resulta bastante cómoda en muchas circunstancias. No deja de estar emparentada con la superficie matemática pero, cuando los detalles microscópicos son visibles y se le ve el *grano* a la materia deja de ser práctica y la comodidad desaparece. Lo que hay más allá de esa superficie puede ser otro cuerpo, o un líquido, o la atmósfera, o... el vacío.

Alguien, tratando de allanar el camino, nos dirá que la superficie es el *lugar de los puntos que delimitan un cuerpo*. Sí, pero al mirar microscópicamente esas delimitaciones encontramos que la forma de la superficie es muy complicada o el concepto muy difícil —incluso imposible— de aplicar. Por ejemplo, al considerar la región donde termina un líquido y empieza la atmósfera vemos que las moléculas del líquido saltan continuamente. Algunas se van para siempre, otras regresan, algunas que inicialmente estaban en la atmósfera, fuera del líquido, caen a él. Cuando el sistema (líquido y atmósfera) está en equilibrio encontramos que, en promedio, las moléculas que abandonan el líquido en un segundo son iguales en número a las que caen a él durante el mismo intervalo de tiempo.

La superficie de un diamante se nos antoja como la respuesta de la naturaleza al concepto de una frontera uniforme y lisa que separa la región donde la luz es aprisionada hasta que encuentra su salida para producirnos esa sensación *diamantina*, similar a la de Arcadio Buendía al ver el hielo y sentirse obligado a afirmar que se trataba del diamante más grande del mundo. Pero ni en el diamante ni en el hielo subsiste la imagen de tersura al pasar al examen microscópico: muchos átomos se encuentran fuera de lugar, se forman terrazas, y veremos un sinfín de huecos y discontinuidades en lo que pensábamos como una superficie uniforme. La figura 1 nos da una idea del aspecto microscópico de una superficie recién formada en un cristal de sulfuro de cadmio. La fotografía se obtuvo con un microscopio óptico de poco aumento. Con 200 aumentos se obtiene una imagen como la de la figura 2. Se pueden observar múltiples terrazas por todos lados. La situación dista mucho de ser ordenada.

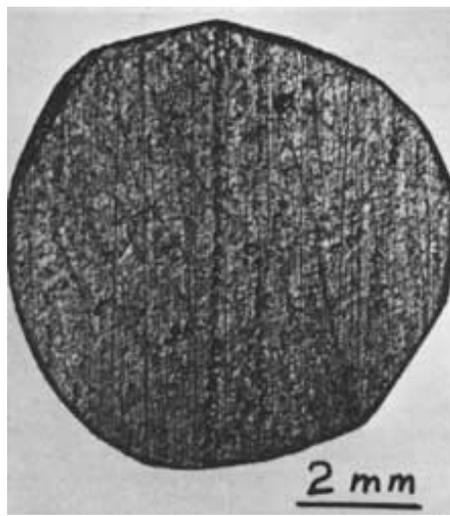


Figura 1. Aspecto de una superficie recién formada al observarla con poca resolución en un microscopio óptico. La línea de bolitas que se observa en el centro mide unos 0.15 mm, más o menos la distancia de surco a surco de un disco *long play*. (Cortesía de G. Somorjai y M. Van Hove).

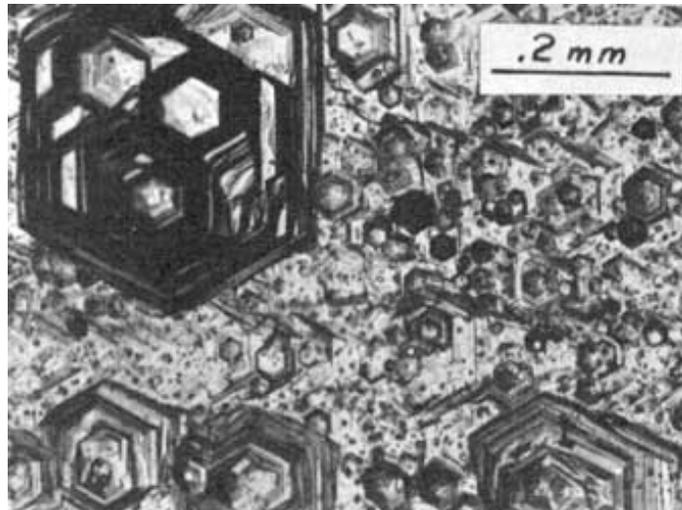


Figura 2. Fotografía de una superficie de un cristal de sulfuro de cadmio. El hexágono de la esquina superior izquierda mide aproximadamente 0.4 mm, la dimensión de un granito de sal de mesa. Se usó un microscopio óptico de 200 aumentos para obtener esta fotografía. (cortesía de G. Somorjai y M. Van hove).

Los metales ofrecen una historia más accidentada aún. En el caso de una superficie metálica convertida en espejo a fuerza de pulir, encontraremos terrazas, escalones, agujeros y átomos de sustancias ajenas al metal que se "amarran" a la superficie. Observando por suficiente tiempo una superficie en contacto con gases, la atmósfera por ejemplo, veremos que todo cambia: más y más átomos extraños se pegarán a los de la superficie; ahí mismo se formarán moléculas de sustancias nuevas; algunas se irán llevándose átomos del metal; tal vez algunos átomos extraños no se conformarán con estar en la superficie sino que penetrarán el metal poco a poco; se producirán resquebrajamientos; el aspecto cambiará, aun macroscópicamente; en algunos casos aparecerán pequeños poros producidos por el ataque químico de las sustancias extrañas al metal; etc. La única manera de reducir todo esto es aislando la pieza metálica de los gases de la atmósfera: producirla al vacío, mantenerla al vacío, blindarla para que ni la radiación la toque. Aún entonces la superficie estará poblada de imperfecciones: el lugar de todos los puntos que separan al cuerpo del resto del Universo tiene una forma complicada. No, no sólo complicada, sino muy, muy complicada. Llamemos *interfaz* a ese lugar.

Esta interfaz es la cara del cuerpo (que de aquí en adelante consideraremos sólido) que da al exterior. Sin embargo, es necesario penetrar mucho en el sólido antes de que pueda observarse el paisaje que se ve en el bulto. Una característica de este último es que de cualquier punto se ve el mismo entorno (esta región de características uniformes es lo que llamamos una fase). Obviamente, en la vecindad de la superficie tenemos una dirección que rompe completamente el esquema, ya que ahí, muy cerca, se encuentra el "mundo exterior". Tenemos que viajar

hacia adentro y cruzar una región más o menos amplia, dependiendo del sistema de que se trate, antes de llegar a observar un entorno de "bulto". Podemos llamar *interfase* a esta región que, a diferencia de la interfaz, tiene un espesor dado por la distancia que penetramos en el sólido hasta obtener un entorno de bulto. Algo así como cuando penetramos en un bosque: hay que caminar cierta distancia antes de sentir, al observar en todas direcciones, que todo es bosque.

La interfase comprende toda la región de cambio paulatino desde el medio exterior al sólido hasta llegar al bulto, ya que antes de cruzar la interfaz en dirección al bulto también hemos encontrado cambios: el medio exterior siente la presencia del sólido y las moléculas de aquél se sienten atraídas o repelidas por éste.

Hemos tratado de precisar algunos de los términos a los que nos referiremos en las próximas páginas. Sin embargo, cabe una aclaración. Pudiera pensarse que entre los científicos que estudian las superficies hay una gran precisión en los términos; que cuando dicen las palabras *superficie*, *interfaz*, *interfase*..., brotan en todas las mentes los mismos conceptos. Pero no, lo que cada uno de ellos denota con esos términos depende en gran parte del tipo de técnica que utilice para estudiar la región de interés. Para sortear el problema de las definiciones se tienen las tautologías. En una excelente revisión de los problemas de superficies puede uno encontrar el siguiente enunciado: *Superficie es lo que se estudia con técnicas de superficies*. Como las técnicas de superficie varían notablemente —desde el microscopio de tunelamiento hasta técnicas experimentales (SIMS) que analizan la superficie al ir quitando las capas atómicas una a una—, tendremos también una gran cantidad de *superficies*.

Sin entrar demasiado en detalles, los sólidos pueden dividirse principalmente en materiales amorfos y cristalinos. Estos últimos tienen como característica distintiva que se pueden describir por la repetición de una figura. Los cristales ideales tienen solamente bulto y, si se piensa un poco, se llega a la conclusión de que deben ser infinitos. Por ejemplo, un cubo con un átomo en cada uno de sus ocho vértices nos producirá, al repetirlo en todas direcciones (sin rotarlo) un cristal del que se dice que tiene simetría cúbica. El número de esas figuras que por repetición generarán cristales ideales es finito: hay catorce tipos de mallas en tres dimensiones. En los nodos de esos andamiajes infinitos construidos por repetición de una de esas figuras se acomodan los átomos de diversas especies químicas. Dependiendo de la figura básica, del número de especies químicas y sus concentraciones, pueden tenerse varios estados ordenados. Entonces aparece la superficie: variadas técnicas han mostrado que el orden del material puede verse seriamente perturbado por esa presencia ¿O acaso sería mejor decir: por el comienzo de una ausencia?

En una ocasión escuchamos una vívida descripción de las emociones que encendieron el entusiasmo de un amigo, del altiplano potosino como nosotros, en su primer acercamiento al mar. Imposible describir sin traicionar —por infidelidad— las emociones que poblaban el relato.

En el recuerdo queda la expectativa que despertó el paulatino cambio de clima, de vegetación, de sensaciones: la humedad, los olores, la transpiración en ese medio húmedo; hasta que, de pronto, tras una curva: el mar, ocupando las lejanías, rascando el espacio con su peculiar sonido... Cambios paulatinos que se producen desde nuestro semidesierto, pasando por una verde Huasteca, hasta llegar a la arena compactada por el azote continuo del oleaje y, después continuar, más allá de donde empieza el mar pero ocultos bajo las aguas. Un electrón que viaja en un cristal, dirigiéndose a la superficie, empezará a percibir cambios paulatinos desde puntos bastante alejados de ella. Sucede que los átomos de la superficie se reacomodan, la distancia entre capas de átomos cambia: a veces aumenta, a veces disminuye. Si el material consta de varias especies químicas, algunas de ellas son arrastradas a la superficie de tal modo que el electrón verá cambios en las concentraciones de las diversas sustancias químicas. Y los cambios seguirán hasta que termina el sólido. Otros cambios pueden continuar pero ya en otra región: un vapor, un líquido, otro sólido, o mezclas de ellos.

Pero, ¿desde dónde empezó a sentir el electrón que las cosas ya no eran las mismas que allá en lo profundo del material, en lo que llamamos bulto? Como dependiendo de la propiedad que se quiere estudiar, las técnicas empleadas varían, se tiene que las respuestas son múltiples. Algunas técnicas ven casi exclusivamente la primera capa, otras menos de diez capas y algunas varias decenas de planos atómicos. Así, la técnica escogida para estudiar una propiedad característica de la superficie debe tomar en cuenta en cuántas capas la propiedad toma los valores del bulto.

Inicio



III. ¿UNA PINTURA DE DIAMANTE?

Los diamantes no son eternos.

EN EL mismo universo donde se mueven los Buendía puede uno encontrar a ese amigo con el nombre del viajero por excelencia, Ulises. Enamorado, loco por Eréndira, nos devela el secreto de las naranjas del huerto de su padre: partidas por la mitad, entre jugosos gajos, muestran enormes diamantes, ni siquiera en bruto, sino joyas, montañas de luz. Comparables, en buena cosecha naranjera, a algunos de los diamantes más famosos de la historia, por ejemplo, a una de las fracciones que resultaron del famoso *Cullinan* del que se dice pesaba 3 106 quilates (un quilate es igual a 0.2 gramos) y fue partido en 9 grandes piedras y 96 pequeñas.

Ulises y su padre holandés acumulan diamantes cosechando naranjas que han de guardar en caja de caudales. Procedimientos fantásticos que nada tienen que ver con las historias de los viejos buscadores que murieron junto con sus sueños en los exóticos escenarios de África.

Después de haber sido durante una larga época la fuente de un porcentaje muy alto de los diamantes que se descubrían en el mundo, el África austral ha pasado a ocupar un lugar más bien modesto entre los productores de los valiosos cristales. Quedan las minas abandonadas que muestran las entrañas reventadas del planeta. Como testigo del saqueo se halla un cráter de 1 097 metros de profundidad, el más profundo que haya excavado el hombre. De ese enorme cráter, monumento a la codicia que despierta una de las formas en que se presenta el carbono, salió el famoso diamante la *Estrella de África*, adorno magnífico del cetro británico.

Sólo en 1986 se arrancaron a la Tierra 88 millones de quilates. Ni se piense que las técnicas del viejo gambusino entran en acción en las operaciones a gran escala implicadas por tal cantidad de quilates. Ahora son los bulldozers y otras máquinas las que remueven toneladas de material por cada quilate. Una fracción importante de esos quilates se convierte en joyas, mientras otra parte se usa para fines industriales. Un quilate en bruto es pagado en unos ocho dólares por las filiales de De Beers, la gran compañía que controla el mercado de los diamantes. Una vez trabajado, cada quilate de un buen diamante puede llegar a costarle a un particular entre 12 500 y 15 000 dólares. Por otra parte, aunque no tanto, los diamantes utilizados en la industria resultan también bastante costosos.

La aplicabilidad industrial del diamante —lo mismo que su belleza como joya— proviene del arreglo de sus átomos, de esa otra belleza que el ojo humano no puede percibir: a nivel microscópico se muestra como un empacamiento de átomos de carbono en un orden que la figura 3 pretende describir. Este arreglo atómico confiere a los tales cristalitos una cantidad enorme de propiedades que a su vez los hace codiciables para aplicaciones variadísimas. Alrededor del 60 % de los diamantes que se extraen en el mundo se dedican a usos industriales.

La dureza del diamante es una propiedad proverbial que le viene directamente de la forma en que se enlazan sus átomos: enlaces fuertes, rígidos, tetraedrales, los describen los químicos. Además, un diamante puro tiene una conductividad eléctrica extremadamente baja y la conductividad térmica más alta conocida. Esto es, al mismo tiempo es un excelente aislante eléctrico y el mejor conductor del calor que se conoce. Si agregamos otras características como las propiedades piezoeléctricas, las propiedades ópticas y las propiedades químicas (tiene una gran resistencia ante los ataques químicos), encontraremos una gama amplísima de posibles aplicaciones. Algunas de ellas, desafortunada pero previsiblemente, de carácter militar.

Debe mencionarse que los diamantes *no son eternos*. No sólo se queman con relativa facilidad en presencia de oxígeno (quienes primeramente mostraron que el diamante es carbono puro, lo hicieron quemándolo) sino que son frágiles. Los golpes aplicados en direcciones muy particulares los hacen añicos.

Puede entenderse, pues, que no sólo se busca al diamante por cuestiones suntuarias y que muchos investigadores se hayan lanzado tras la idea de producir diamantes artificialmente. Esta idea, que pudiera parecer un sueño engendrado en la mente de Melquiades, taumaturgo allá cada cuando en Macondo y maestro de José Arcadio Buendía, es perfectamente realizable. Tan realizable y con tan fuertes consecuencias que se afirma que el mundo sólo conoce una pequeñísima parte de los resultados que se obtienen en la investigación de las propiedades del diamante: secretos industriales y secretos militares se atesoran aún con más celo que las naranjas de Ulises.

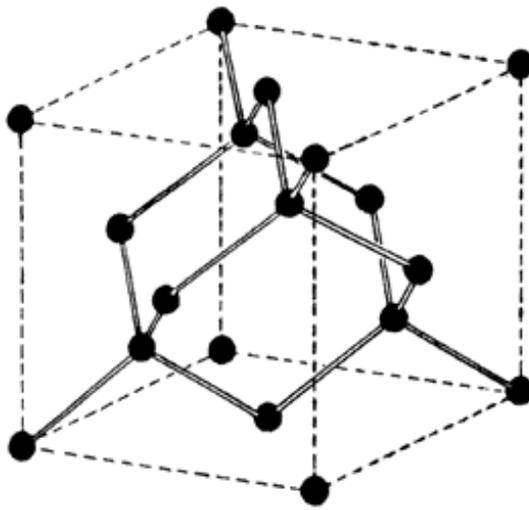


Figura 3. Representación de la estructura del diamante. Se resalta el hecho de que los enlaces entre átomos de carbono tienen direcciones muy precisas. Los puntos representan los átomos y las líneas entre ellos los enlaces electrónicos.

Aunque la preocupación del industrial que quiere invertir radica principalmente en los costos, aquí no hay lugar para analizarlos. Tan sólo consideraremos las dificultades que los causan.

La figura 4 muestra la estructura de la fase del carbono que es estable en las condiciones que prevalecen en el cascarón de nuestro planeta: el grafito. La otra fase, el diamante, es metaestable en esas condiciones. Que un sistema se halla en estado metaestable quiere decir que no ha alcanzado el estado de equilibrio sino que se quedó atrapado en un punto intermedio del que una excitación adecuada lo sacaría para precipitarlo hasta el equilibrio estable. Si la presión en la superficie de la Tierra fuera de unos miles de atmósferas, el diamante sería la fase estable y el grafito la metaestable. Podría pensarse que la forma de vida racional que existiese en esas condiciones, demasiado comprimida, vería al diamante como algo común y corriente y se pelearía por un trozo de grafito puro. Podemos apuntar que si eso sucediera no sería con fines suntuarios: el diamante siempre será más bello que el grafito. Desde luego que todas estas apreciaciones estéticas son subjetivas y a lo mejor los comprimidos seres de los que hablamos piensan y sienten completamente distinto. Pero esto es harina de otro costal. A quinientas mil atmósferas el carbón existiría sólo en la fase de diamante.

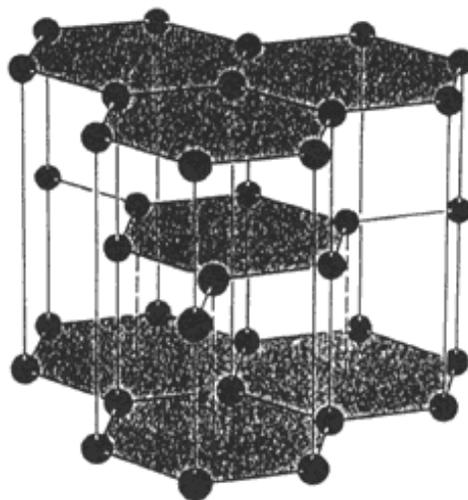


Figura 4. Representación de la estructura cristalográfica de grafito. Los puntos representan los átomos y las líneas entre ellos los enlaces electrónicos.

Al mercado de diamantes lo tienen sin cuidado todas estas discusiones acerca de las metaestabilidades, ya que los fuertes enlaces atómicos que construyen los electrones lo mantienen a salvo. Sí; los enlaces químicos del carbono le dan seguridad al mercado. Por una parte es muy difícil, sin aumentar la temperatura fuertemente, precipitar al carbono en su forma de diamante a su fase de grafito. Por otra, se necesita una cantidad enorme de energía para

convertir grafito en diamante. Esta energía es necesaria para desbaratar los enlaces de la estructura de la figura 4 y reconstruirlos de tal manera que se produzca la estructura de la figura 3.

La posibilidad de sacarle la vuelta a todas las dificultades y, en vez de diamantes en bulto, crear recubrimientos de diamante, así, como si estuviéramos pintando, se vislumbra a través de una publicación firmada por J. W. Rabalais y S. Kasi (*Science*, Vol. 239, p. 623, febrero de 1988).

La receta se dice fácil: *Tómese una superficie de níquel perfectamente limpia y aplíquesele, en ultra-alto vacío, un haz de iones de carbono con energía de 75 electronvoltios hasta que la dosis sea superior a 2×10^{16} iones por centímetro cuadrado.*

Pasemos por alto las dificultades, nada triviales, de conseguir una superficie perfectamente limpia, de crear el ultra-alto vacío, y de producir el haz de iones de carbono, y planteemos un par de preguntas: ¿cómo saben los investigadores que lo que quedó depositado sobre la superficie del níquel es diamante y no grafito o alguna otra cosa?, ¿de dónde salió la energía para producir la fase metaestable del carbono, es decir, el diamante? La razón para hacer la primera pregunta nos parece clara. Aun tomando en cuenta las dificultades involucradas, este procedimiento nos parece tan fascinante como fantástico es cosechar naranjas que envuelven diamantes pulidos. Los señores investigadores nos tienen que asegurar que la receta nos va a funcionar siempre. Esto es algo que en la ciencia desempeña un papel esencial: todo experimento reportado debe ser reproducible. La segunda pregunta es de rigor: si tanto nos ha dicho la experiencia acerca de las dificultades para "hacer" diamantes, ¿cómo es que de repente, así sin más, al bombardear una superficie, obtenemos un recubrimiento de diamante?

La respuesta a la primera pregunta es la figura 5. A primera vista, sobre todo a quien no tiene mucha familiaridad con la *picología*, esto puede parecer un desatino. Antes que nada (y, sobre todo, antes de perder la paciencia) observe el lector que las cuatro curvas (a), (b), (c) y (d), tienen estructuras distintas: fueron producidas con una técnica de estudio de superficies que se denomina *Espectroscopía electrónica Auger* o simplemente *Auger*, cuyos detalles fatigaremos en un capítulo posterior.

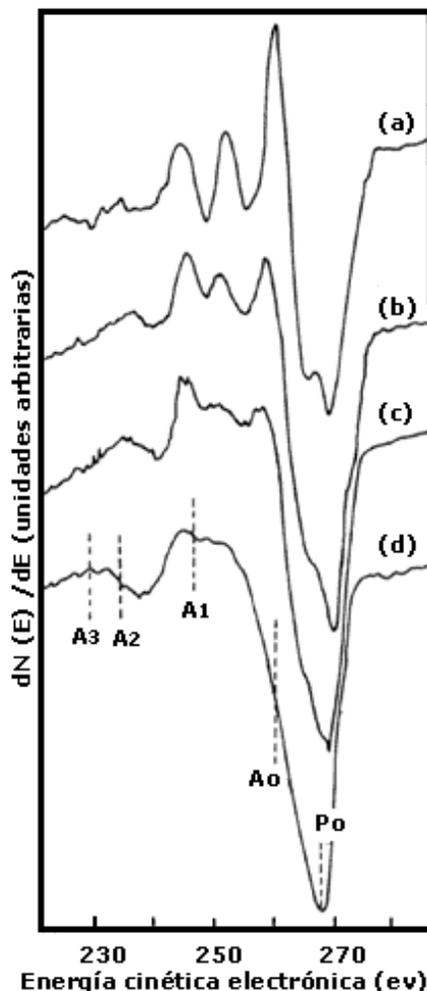


Figura 5. Evolución de la forma de la línea Auger al cambiar la dosis de iones de carbono sobre el níquel. (a) Curva característica de carburos de níquel producida con una dosis de 2.0×10^{15} iones / cm^2 , el espesor es de una monocapa; (b) Una dosis entre 6.0×10^{15} y 8.0×10^{15} iones/ cm^2 produce varias capas en las que todavía hay compuestos metal-carbón aunque empiezan a aparecer características del carbón; (c) Curva característica del grafito que se produce con dosis de 9.0×10^{15} iones/ cm^2 ; (d) Con dosis superiores a 2.0×10^{16} iones/ cm^2 aparece la línea característica del diamante.

Los gráficos de Auger deben considerarse como las huellas digitales de los materiales. A un experto le basta ver uno de esos gráficos para decir si ha producido una película de diamante o de grafito. Imaginemos que tenemos un catálogo de huellas. La curva (a) nos informaría que si la dosis de iones de carbono es baja, de unos 2×10^{15} iones por centímetro cuadrado, apenas para cubrir la superficie con una monocapa, se forman compuestos de níquel y carbono: carburos de níquel. Al aumentar la dosis se produce la curva (b), correspondiente a capas de compuestos metal-carbón y al inicio de combinaciones entre los átomos de carbono. Cuando el espesor ha crecido suficientemente, de tal manera que el espesor de la película de carbono no permite "ver" los enlaces níquel-carbono, la espectroscopía Auger produce la curva del grafito que aparece en la figura 5 como (c). Mediante otros métodos los investigadores pudieron comprobar que el paso del níquel puro al carbono puro se da rápidamente, o sea, que la región donde aparecen los enlaces níquel-carbono es muy reducida. La curva (d) es la "huella" del diamante producida a dosis superiores a 2×10^{16} iones por centímetro cuadrado.

En la figura 6 se comparan, en un rango más amplio de energía de los electrones sonda, las curvas del grafito y de la película de diamante. Ahí se ven algunas diferencias entre ambas curvas, diferencias que no se muestran en la figura 5.

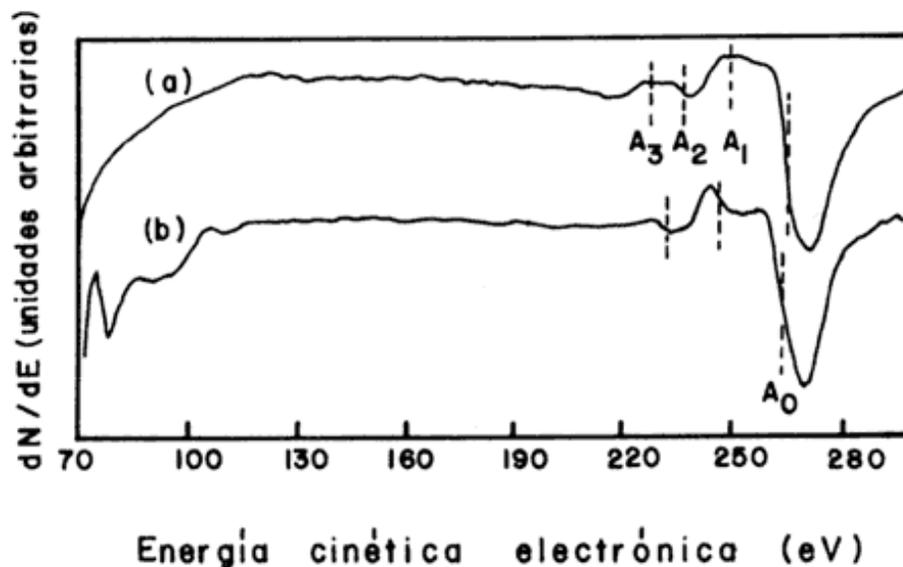


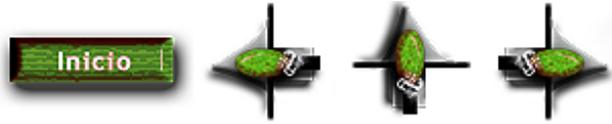
Figura 6. Comparación de las curvas Auger obtenidas de una película de diamante (a) y una de grafito (b).

Prolijos y meticulosos, Rabalais y Kasi usaron al menos otras cuatro técnicas de superficie para cerciorarse de que habían producido una película de diamante.

Ahora, dediquemos unas cuantas líneas al problema de la energía de activación necesaria para producir la fase metaestable. Sucede que cuando un ion choca sobre la capa de carbono previamente depositada se producen temperaturas que van de mil a diez mil grados Kelvin. Estos fuertes incrementos de temperatura duran una fracción pequeñísima de segundo (10^{11} segundos) y se extienden a un círculo que incluye unos cuantos átomos. Al menos esto es lo que dicen los modelos que permiten explicar la aparición de la tan mentada película. No se tiene otra explicación.

El caso es que ahora "podemos" forrar una pieza con una película de unas micras de espesor que cambia completamente la forma en la que el material favorecido encara al hostile mundo exterior. Una aplicación trivial sería una hoja de afeitar que durara más que el usuario. "... y a mi hijo, ya no tan imberbe, le lego mi hoja de afeitar que perteneció a mi padre y antes a mi abuelo." Los experimentos de Rabalais han tenido éxito sobre otros

materiales aparte de níquel, materiales tales como oro, silicio, y algunos más. Falta ver cuántos substratos responderán de igual manera. Podríamos ahora olvidarnos, si quisiéramos vivir sin fantasía, de las naranjas del holandés, pero, por otro lado, podemos enriquecer nuestras risas porque ya no tenemos que ir a morir a las inhóspitas tierras de las minas de diamante si nuestro interés no es una enorme piedra sino que nos basta tan sólo con los resultados de esta *pintura de diamante*.



IV. LAS TELAS, EL VESTIDO, LA MODA, LA LAVADA Y TODO ESO

TODOS conocemos al menos una persona, entre nuestros amigos (o conocidos) que vive fuera de los convencionalismos y se muestra en vestiduras tales que casi desempeñan el papel de un uniforme. Pero la uniformidad no es completa, ya que el paso del tiempo y otros agentes se manifiestan en aquellos ropajes y ocasionan sospechosos cambios de color, agregan brillos aquí y allá, imponen texturas que varían de parte a parte y las amoldan a la posición que más frecuentemente toma el cuerpo del poseedor. No se necesita ser Sherlock Holmes para deducir de las ropas de algunos viandantes que su estado de movimiento es más bien accidental y que su vida transcurre en posición sedentaria.

Para esa clase de personas una tela de gran durabilidad y resistencia que además repela la mugre puede ser una gran noticia. Lo que no sabemos es si lo será para todo mundo. Por ejemplo, sabemos que Rosita Junior se niega a vestir el precioso traje cortado por una modista en el baile de esta noche, por más bien que se le vea, como le asegura Rosa Mayor:

—Pero, hijita, te queda divino.

—¡Ay, mamá! Si ya lo llevé a dos bailes. Van a decir que ando de uniforme.

La telenovela puede seguir y seguir y nadie hará cambiar de forma de pensar a Rosita que buscará y rebuscará en su nutrido guardarropa un vestido que haya lucido a lo más una vez. En su mente no hay más solución que atacar el presupuesto familiar para conseguir uno que no se haya puesto jamás. Miles de empresarios de la moda, diseñadores, modistos, comerciantes, etc., le darán la razón a Rosita: "¿Qué haríamos sin las Rositas del mundo?" Cierto. Las durables y siempre limpias telas antes mencionadas no son para Rosita, o, mejor dicho, sería un desperdicio emplearlas en envolver el cuerpo de Rosita. La ciencia ficción ha especulado acerca de los efectos que sobre la industria textil tendría el avance tecnológico de telas imposibles de ensuciar y de gran durabilidad: los imperios de la industria textil se desplomarían como consecuencia. Pero, por el contrario, podemos predecir con un gran margen de seguridad que el mundo de la moda no se desplomará. Las Rositas del mundo, unidas, lo sostendrán.

La industria textil no busca ya tanto modificar los internos hilos que constituyen las telas sino tan sólo establecer una ligera modificación en las superficies. Se trata de revestirlas con una delgada capa que las aisle y proteja de suciedad y desgaste. La investigación aplicada a este problema ha avanzado lo suficiente como para producir en el laboratorio telas recubiertas con capas de un espesor equivalente a la milésima parte de un glóbulo rojo, recubrimiento que produce la buscada protección.

Como sucede frecuentemente en el campo de la ciencia aplicada, la solución de los problemas involucrados en la consecución del recubrimiento ha llamado a especialistas de múltiples áreas, ha requerido las más refinadas técnicas de medición, ha planteado nuevos problemas y ha ayudado, de paso, al avance de la ciencia de superficies.

Mencionemos algunos de los problemas que esto incluye: medición de espesores pequeñísimos, comprensión de los mecanismos de impermeabilización, química de detergentes, fisicoquímica de coloides, tensión superficial, organización de los elementos microscópicos del recubrimiento, adherencia ...

Vemos que, aunque sea cierto que un depósito muy delgado hace olvidar las propiedades del sustrato —la tela en este caso— es necesario asegurarse de que el depósito se mantendrá ahí y no se irá a la primera lavada (o sentada). Se hace, pues, necesario entender las fuerzas de interacción entre los elementos del depósito y los de la superficie. También comprender la interacción entre los posibles agentes que vienen a ensuciar y el sustrato; o entre los agentes y el recubrimiento. Todo esto tiene que ver con un fenómeno que muchos investigadores de superficies encuentran apasionante: el *fenómeno de mojado*.

Éste ha sido ampliamente estudiado. En nuestro país hay grupos de investigadores que han contribuido a su comprensión. El problema tiene que ver con el hecho de que una vela de parafina sumergida en agua sale prácticamente seca. Si acaso algunas gotas aisladas aparecen en su superficie para caer al menor sacudimiento. Decimos que el agua no moja (o humedece) a la parafina. Del mismo modo podemos comprobar que el mercurio no moja una gran cantidad de objetos.

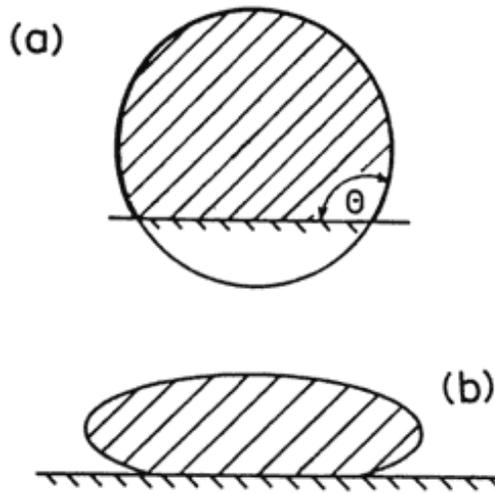


Figura 7. (a) Representación de una gota de líquido sobre una superficie sólida y de la definición del ángulo de contacto, θ . (b) Efecto de la atracción gravitacional sobre una gota que no moja la superficie. (S. Dietrech, "Wetting Phenomena", en *Phase Transitions and critical Phenomena*, vol. 12).

Si depositamos sendas gotitas de agua en un vidrio limpio y en una placa de parafina encontraremos que, mientras en el vidrio las gotas se desparraman formando pequeños charcos, en la parafina mantienen su identidad. Observaciones detalladas nos muestran que las gotas sobre la parafina son casi esféricas con un achatamiento que fácilmente podemos atribuir a la atracción gravitacional. Entre los dos extremos de la gota perfectamente esférica y el charco —gota desparramada— se da un número infinito de situaciones: líquidos que mojan "a medias" un sustrato. El ángulo de contacto entre las dos superficies, la de la gota y la del sustrato (figura 7), varía en medida de la aptitud de una superficie a ser mojada. Este ángulo depende de la tensión superficial del líquido y de la energía de superficie del sustrato. Por otra parte, el ángulo de contacto permite extrapolar para encontrar la tensión superficial de un líquido que moje completamente, con ángulo de contacto cero (figura 8). El fenómeno de mojado involucra variadísimos tipos de interfaces y situaciones complejas. La figura 9 presenta el caso en el que se ha formado una gota (fase líquida l_1) en la interfaz líquido-gas. Todos estos problemas, además de ser apasionantes por sí mismos, están relacionados con aplicaciones tecnológicas. Entre otras, con el esfuerzo de mantener limpia una pieza de tela.

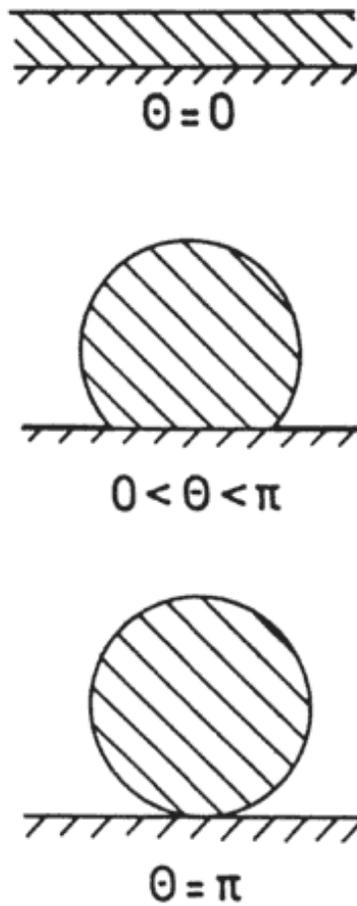


Figura 8. Sustratos: mojado ($Q = 0$), no mojado ($0 < Q < p$) y seco ($Q = p$). En el caso del sustrato no mojado, una capa microcópica de líquido cubre la parte del sustrato que no está bajo la gota. Esta capa no existe en el caso del sustrato seco. Obsérvese también que no se incluyen efectos de atracción gravitacional. (S. Dietrich, *ibid*).

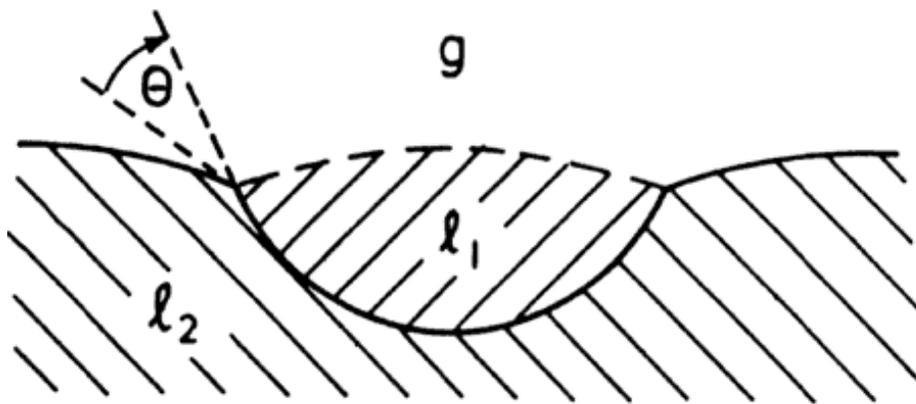


Figura 9. Mezcla de dos fases líquidas l_1 y l_2 en contacto con un gas g . Aparece una gota en la interfaz líquido-gas. (S. Dietrich, *ibid*.)

Pero no todo lo que cae sobre una tela es líquido. Hay otro tipo de agentes que también ensucian. Basta pasar un tiempo razonablemente largo en algunas regiones de nuestras contaminadas ciudades grandes para que nuestras ropas registren el paso del tiempo mediante notorios cambios de color. Se les han adherido pequeñas partículas. Las fuerzas que permiten esta adherencia son de la misma naturaleza que las fuerzas que dan origen a la tensión superficial.

Las superficies de baja tensión crítica o baja energía de superficie se mojan más difícilmente y también es más difícil que se les adhieran partículas sólidas. Se ha encontrado que superficies recubiertas con compuestos de flúor,

que forman cadenas moleculares con carbono, presentan energías superficiales muy bajas. Es precisamente con este tipo de compuestos que se pretende recubrir las telas. El resultado será una tela resistente al uso y a la mugre. La película de recubrimiento es tan delgada que no cambiará las propiedades mecánicas de la tela. No hay que preocuparse porque se vaya a estropear la "caída" que le confiere a nuestros trajes el corte de nuestro célebre sastre.

No vaya a creerse que el recubrimiento se pone así, nomás, como una pintura. Los buenos efectos dependen del perfecto ordenamiento de las unidades microscópicas. Sucede que a bajas temperaturas las unidades microscópicas alcanzan su estado de equilibrio en un estado de gran orden que va desapareciendo al subir la temperatura, hasta que se tiene un recubrimiento con cadenas moleculares en completo desorden. Es necesario tomar en cuenta esta transición de orden-desorden para aplicar el recubrimiento.

Mencionemos otro tipo de avances en lo que a recubrimientos de telas se refiere. Se trata del BION-II, un recubrimiento que no permite el paso del agua en una dirección mientras que permite el paso del vapor de agua en la otra. Inicialmente pensado para el cuidado de heridas pues permite su respiración pero impide el paso de gérmenes, humedad y contaminantes, pasó al campo de los deportes. Atletas de pista y campo, corredores de largas distancias, ciclistas y esquiadores se benefician de este avance tecnológico.

Nos preocupa dejar en el lector la idea desafortunadamente equivocada de que esta convergencia de conocimientos, investigación y necesidades industriales se produce en nuestro país. Desgraciadamente no. Una articulación como la que se requiere para la producción de artículos como los mencionados arriba, exige la participación de muchos especialistas, todos ellos motivados por un mismo problema que haya sido planteado desde la industria. En muchos casos (en otros países, entiéndase) los grupos de investigación se encuentran en la propia industria. Desde ahí contribuyen tanto a la solución de problemas básicos como al avance tecnológico. Muchos pasos se deben dar para llegar a esa situación. La pregunta que queda flotando es ¿se llegarán a producir en nuestro país?



V. LA RESBALADA MÁS RÁPIDA DEL MUNDO

SON sorprendentes los derroteros que puede tomar la investigación aplicada. Un ejemplo notable es la búsqueda de los mejores esquís. La justificación se puede dar: en el deporte de los deslizamientos sobre nieve los competidores se juegan el cuello. Pero no se busca sólo aumentar la seguridad de los aparatos, a simple vista tan simples, sino se quiere aumentar esa velocidad de deslizamiento. El ejemplo es por demás interesante ya que muestra la forma en que la economía influye en la investigación. En los países europeos y en algunos de nuestro continente localizados en latitudes donde la formación de nieve en el invierno es algo normal, los esquís son un artículo muy solicitado. En este negocio, como en los motores, cada fabricante pretende mostrar que produce el mejor.

Hay una empresa francesa, fabricante de artículos deportivos, que se ha empeñado en la consecución de los esquís más rápidos del mundo. Más rápidos en los pies de algún temerario esquiador, un James Bond, se entiende.

En pos de esa meta ha puesto a trabajar a especialistas en materiales y en recubrimientos. Las características pretendidas en un esquí son varias. En primer lugar se desea que su cuerpo sea ligero y tenga resistencia y elasticidad. Que la superficie de contacto con la nieve, la suela, se deslice fácilmente. Además, deben eliminarse, en la medida de lo posible, las vibraciones que se producen a altas velocidades.

Realmente, sólo el problema del deslizamiento es un problema de superficies, aunque no faltaría quien dijera que, dado que el espesor es tan reducido, todo el esquí es un problema de superficies. Nos quedamos con el punto de vista de que es sólo la suela el problema que le atañería a la ciencia de superficies, pero hablamos de los detalles completos para mostrar este excelente ejemplo de cooperación entre firmas industriales (pagando, desde luego) dedicadas a diferentes objetivos.

Parecería fácil escoger el material para fabricar los esquís; los actuales se fabrican usando combinaciones de diferentes polímeros. Sin embargo, como es sabido, inicialmente el material era simplemente madera. Esta fue luego sustituida por el aluminio del cual se pasó a los materiales modernos. Los esquís que en breve pondrá *Salomon* a la disposición de los amantes de la velocidad sobre nieve son de fibra de vidrio. Para reducir las vibraciones se han insertado pequeños bloques de material de mayor densidad en diferentes partes del esquí. Para ello se ha tenido que analizar su dinámica, tanto teórica como experimentalmente.

Al llegar a las suelas, al analizar la superficie de contacto esquí-nieve, el problema se pone en verdad peliagudo. Mas no hay que apurarse, hay compañías que se dedican a esos estudios. Total, el costo de la investigación lo incluiremos en el precio del equipo. La firma de marras ha contratado a la compañía noruega Swix para la investigación sobre las "suelas" de los esquís. Los noruegos han respondido con un recubrimiento hecho de un polímero parecido al teflón.

La tecnología empleada viene de muchos lados: estudio de modos normales (en el proceso de eliminación de vibraciones), estudio de materiales (en búsqueda de ligereza, resistencia y elasticidad), problemas de superficies (en el proceso de reducción del coeficiente de rozamiento esquí-nieve), etc. Los equipos de investigadores que intervienen en la producción del prototipo son varios y con numerosos miembros. El conocimiento aplicado no se produce sólo durante la investigación dirigida a la creación de los modernos esquís. Se trata de algo que empezó desde antes y que involucra varias áreas de investigación básica: ciencia de materiales, ciencia de superficies, mecánica, polímeros ... Es imposible hacer la suma de todos los contribuyentes al modelo. El resultado irá a parar a dos tipos de pies: el de los modernos gladiadores que arriesgarán la existencia en pos de un récord, y el de los que, por esnobismo, sólo pueden usar "lo mejor que hay".

El ejemplo muestra otro aspecto. En los países donde la ciencia ha alcanzado madurez se crean compañías para explotar las aplicaciones del conocimiento producido por las "investigaciones básicas". La aplicación de ese conocimiento a diferentes áreas y problemas genera tecnología. La situación llega a ser tan especializada que los productos de la aplicación del conocimiento (tecnología) se venden de compañía a compañía. ¿Cuántos casos como éste se ven en nuestro país? No nos referimos a la compra de tecnología. La compramos pero no en el país, porque rara vez se produce. La etiología es asunto de otro costal, de otro libro. Por lo pronto valdría la pena ver si tanta tecnología ayuda en algo a los campeones.

Inicio



VI. LA PIEL

Siento tu mano tibia correr despacio sobre mi piel...

VÍCTOR MANUEL-SAN JOSÉ-SÁNCHEZ

EN ALGÚN momento calificábamos la caricia como un fenómeno de superficie. Elemento indispensable en las relaciones humanas más importantes: las que calificamos de amor; no es, sin embargo, el único, ni tampoco es la caricia tan sólo el pasar nuestra mano, nuestra piel, por la superficie limítrofe del ser amado. Todos sabemos que es algo mucho más complicado, un contacto, que cuando está bien hecho conlleva el ser; y también sabemos que hay muchas formas de prodigar las caricias: tomar tiernamente el brazo del ser amado; tener, por un tiempo, entre nuestras manos el amado rostro; etcétera.

Si se trata de un fenómeno de superficie, ¿qué fracción de nuestro cuerpo realmente toma parte?, ¿a qué profundidad alcanza el fenómeno? Las respuestas a estas preguntas las llevamos en el alma todos los que hemos vivido la experiencia. Ni remotamente pretendemos contestarlas aquí. Como dice el cuento del chango y el león: "aquí, sólo de habladores". Lo que nos interesa es el fenómeno de superficie que también es muy difícil de contestar completamente y con precisión. Le sacaremos la vuelta a la pregunta y, en vez de contestar directamente, hablaremos de la posible piel de un robot y de los problemas que plantea.

Consideremos un robot, de esos sin sentimientos, a fin de evitar el problema planteado arriba y que se vaya a soltar de repente prodigando su amor a base de caricias y arrumacos. Se trata de un robot "común y corriente", que le llamará en la mañana, le avisará que ya está preparado el baño, le dirá que ya escogió la ropa que debe vestir —de acuerdo a su agenda—, le sugerirá a su pareja que no se levante, que todavía puede disfrutar un rato más de la cama, les avisará a ambos que los niños ya se fueron a la escuela, y le preguntará cómo quiere que le prepare sus huevos. En fin, la maravilla de maravillas, el esclavo que era necesario para que todo el género humano liberado pudiera dedicar su intelecto a pensar acerca de problemas trascendentales. El esclavo que deberían haber tenido los padres del pensamiento occidental para que su obra no descansara sobre el trabajo de explotados. Ni más ni menos que la explotación de la máquina por alguien menos fuerte que ella.

Volvamos al desayuno que el robot quiere prepararle a usted. Pensemos en la sensibilidad requerida para que el robot pueda manejar adecuadamente algo tan delicado. Pensemos que el robot está bien entrenado para desmontar el motor de nuestro automóvil, sentir cada pieza convenientemente, saber cómo tratar una pieza de metal bien lubricada, o sea, hacer todos los movimientos necesarios de un mecánico. Con esa imagen en la mente pasemos ahora a la cocina donde el robot tomará un huevo, le dará vuelta, lo golpeará con precisión contra una superficie afilada y, roto el cascarón, vaciará su contenido en una sartén.

¿Cómo fue que no rompió el huevo al tomarlo? ¿Cómo fue que no se le resbaló al darle vuelta antes de golpearlo? Nos podemos imaginar al robot tomando el huevo haciéndolo papilla al momento de cerrar la mano, o mirando trágicamente (perdón, el robot no puede sentir esto) al huevo estrellado en el piso porque, para no romperlo, tan sólo lo sostenía pero no lo asía y al momento de tratar de estrellarlo se le resbaló de la mano. Se nos pueden ocurrir muchas otras posibilidades pero para el ejemplo que perseguimos basta con éstas.

Si nos dieran un robot que camina y se mueve como un ser humano, pero no puede preparar unos huevos estrellados y se nos pidiera que completáramos el diseño para que lo pudiera hacer bien, encontraríamos de inmediato una gran cantidad de problemas, entre ellos el problema de la piel. ¿Problema de superficie? Veamos qué tanto.

Listemos algunos de los problemas gruesos que tendríamos que resolver. Suponemos que el robot tiene una capacidad de respuesta con base en los datos que se le proporcionan. Necesitamos que nuestro robot sea capaz de reconocer objetos y tratarlos según la información que tiene acerca de ellos. Otro problema que ni de chiste queremos tocar: el aprendizaje del robot. Su piel debe ser capaz de sentir texturas, distinguir entre objetos blandos y rígidos y, además, sentir la fricción. Esto último es particularmente importante para que pueda manipular objetos que exceden el tamaño de su mano. Si es capaz de sentir la fricción, esto es, el esfuerzo lateral (paralelo a la superficie de la piel) estará en capacidad de decidir el aumento de fuerza necesaria para evitar que el objeto se le

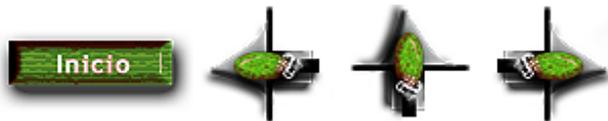
deslice de la mano pero no tan alto como para hacerlo papilla.

Desde luego que hay quien se dedica a resolver estos problemas. Siempre con la filosofía de *Divide et impera*, cada aspecto del problema corresponde a diferentes especialistas. Muchos investigadores se esfuerzan en el diseño de la "piel de robot". Entre ellos vale la pena conocer el afán del profesor Danilo de Rossi de la Universidad de Pisa. Ha logrado resolver por separado dos de los problemas que plantea la piel.

Varias capas que se pueden separar en dos grupos forman el diseño de De Rossi. El primer grupo, lo que sería la dermis, está formado por tres capas: un gel conductor lleno de agua entre dos capas de electrodos que permite sentir los cambios de presión que se producen al tomar un objeto mediante la deformación del gel. Esta deformación cambia el voltaje entre los electrodos. Al menos el robot forrado con esta piel podría distinguir entre un bat de béisbol y el brazo de una muchacha. El segundo grupo, la epidermis, tiene también tres capas: una capa de pequeños sensores, discos del tamaño de la punta de un alfiler, en medio de dos capas de hule. Estos sensores permiten sentir la textura, por ejemplo los vellos del brazo arriba citado. Los discos pueden sentir en forma direccional, de tal manera que son capaces de apreciar la fricción: al correr la mano por el brazo de la muchacha lo hará gentilmente y no produciéndole escoriaciones.

Así que traigan al robot que aquí le tenemos su piel. Pues no. Al juntar la dermis y la epidermis, el agua de la dermis produce corto circuito en la epidermis. Habrá que aislar una de otra. Podemos casi notar en el corazón la reluctancia del *professore* De Rossi: el espesor total de las dos capas juntas era igual al del modelo usado, la piel humana.

Volvemos a la pregunta inicial de si la caricia es un fenómeno de superficie, pero le dejamos la respuesta al lector. Dejamos constancia de mantener fuera el gran problema de cómo se interrelaciona, coordina, procesa la información táctil que se recaba en una caricia y de cómo se retroalimenta junto con otra información obtenida por otras vías para continuar dicha caricia. Como consideración final vale la pena señalar que, aunque nuestro discurso haya generado en la mente del lector una imagen antropomórfica, el robot no tiene que parecerse a nosotros. La piel sería para una extraña mano, extremo del único brazo cuya forma habría sido diseñada pensando en eficiencia y funcionalidad y no en apariencias humanas. Sin embargo...



VII. ¿FUSIÓN SUPERFICIAL?

Al ser destapado por el gigante, el cofre dejó escapar un aliento glacial.

G. GARCÍA MÁRQUEZ

EL MOMENTO en el que José Arcadio Buendía quedó deslumbrado por el hielo y dijo que se trataba del diamante más grande del mundo debió grabarse para siempre en su mente inquisitiva. Sabemos que su inteligencia transitaba por parajes extraños a los otros habitantes de Macondo, que era capaz de mantener con encono el esfuerzo de sus células grises hasta desatar hallazgos como aquél que anunció frente a la familia reunida para el almuerzo: "La Tierra es redonda como una naranja." La crónica no nos cuenta si alguna vez volvió a pensar en el hielo. ¿Qué quedó en sus meditaciones del contacto de su mano con aquella superficie fría? El aliento glacial que brotó cuando el gigante que lo cuidaba abrió el cofre no nos dice si el bloque cristalino se reducía paulatinamente y, tarde o temprano, los gitanos se encontrarían sin su tesoro. Cuando se abre el volumen de *Cien años de soledad* casi se siente cómo lo abraza a uno la atmósfera tórrida en la que viven los personajes. Mantener una temperatura bajo cero para que el bloque durara, era muy probablemente una tecnología ajena a la tribu de gitanos: el hielo se estaba fundiendo continuamente.

El término *fusión superficial* es confuso. Durante un desayuno en el que caímos en el tema, un amigo adoptó una actitud pedagógica y partiendo una gruesa rebanada de mantequilla la depositó sobre unos *hot cakes* recién servidos. Mientras miraba con ojos de ¿lo ven? a los otros comensales, su dedo, índice de fuego, apuntaba a la pila de *hot cakes* coronada por la rápidamente maltrecha rebanada. La sabia mirada y el índice imperturbable decían, al buen entendedor y sin palabras, que lo primero que se fundía era la superficie. Con una lección de tal categoría hay que pasar por una lucha interna antes de decir que no, que ese no es el fenómeno de fusión superficial, que al menos no es a lo que nos referíamos, que el fenómeno que queremos describir con ese nombre es mucho más sutil, que tiene más que ver con hacer una bola de nieve que con ensopar unos *hot cakes* con mantequilla fundida.

El proceso de tomar pequeñas fracciones y compactarlas para formar un cuerpo sólido se denomina *sinterizado*. Es, tal vez, una definición simplificadora que justificadamente nos pueden reprochar los metalurgistas. Es un proceso de gran importancia técnica, en especial en la formación de cuerpos cerámicos y en metalurgia. No es un cambio de fase, sino una reconstitución de los cristalitas del sólido. Aquí aplicamos esa definición a la formación de una bola de nieve por un niño que sale a jugar después de una gran nevada en un clima completamente ajeno al de Macondo.

Se trata de un tema polémico. Hace siglo y medio, Michael Faraday registró en su cuaderno de notas sus primeras observaciones acerca de un fenómeno al que dedicaría su trabajo durante los siguientes veinte años. En esas notas se pregunta por qué al presionar nieve húmeda se puede formar una bola; mientras que si se hace lo mismo con arena húmeda, la formación se desbarata; y por qué al juntar dos bloques de hielo y envolverlos en una pieza de franela se produce un solo bloque.

A riesgo de que se nos acuse de violentar la comparación: cuando Gabriel García Márquez nos describe la mente de José Arcadio Buendía, nos hace acordarnos de Michael Faraday. La familia Faraday se mostró sumamente orgullosa cuando a Michael, a los trece años, lo ascendieron a aprendiz de encuadernador. Curioso, con insaciable deseo de conocimiento leía casi todos los libros que le tocaba encuadernar. Un día se topó con un libro de química. Faraday no sólo repitió todos los experimentos del libro sino que los interpretó correctamente. Con ese libro prendió en él una gran pasión por la química. Sus grandes capacidades deslumbraron a Humphry Davy quien lo llevó al Royal Institute (perteneciente a la Royal Society de Londres) a trabajar como asistente de laboratorio. Poco tiempo después, Davy lo invitó a acompañarlo en un viaje por el continente europeo. En Florencia, Davy y Faraday hicieron un experimento que ya mencionamos cuando hablamos de los diamantes: demostraron mediante un procedimiento en el que quemaron uno de esos cristalitas mágicos, que no son sino carbono. Refrenamos el deseo de evidenciar el genio de Faraday mediante el pobre expediente de listar sus más conocidas contribuciones y nos concretamos al problema de fusión superficial.

Faraday hizo experimentos que lo convencieron de que sobre el hielo había una película microscópica de líquido. Ésta, en equilibrio con el sólido, se presentaría desde temperaturas inferiores a la temperatura de fusión y, además de explicar el sinterizado, sería la razón del bajo coeficiente de fricción del hielo. Sin embargo, otros

contemporáneos no se convencieron. James Thomson, hermano de lord Kelvin, decía que la sinterización del hielo se debía a una reducción de la temperatura de fusión ocasionada por el aumento de presión en los puntos de contacto. De esta manera uno presionaría dos bloques de hielo y, aun abajo de la temperatura de fusión se podría formar líquido que solidificaría rápidamente, actuando como "soldadura". Esta teoría, dada casi veinte años después de que Faraday anotara sus primeras ideas, fue la que prevaleció. Con ella se pretendía explicar no sólo la sinterización del hielo sino también su bajo coeficiente de fricción.

Las explicaciones de Thomson prevalecieron largo tiempo. Todavía en la mitad de este siglo se encontraba en los libros de texto la siguiente explicación del bajo coeficiente de fricción: "Al patinar, la presión ejercida por el patinador licua el hielo y el líquido así formado actúa como lubricante." Ciertamente, la presión puede hacer que la temperatura de fusión cambie. Sin embargo, persiste la pregunta: ¿cuánto baja la temperatura? El peso de un adulto normal bajará la temperatura de fusión ¡un décimo de grado! Así, si la temperatura es muy inferior a cero grados centígrados, el efecto de la presión no desempeñará ningún papel. Cuando fue evidente que las explicaciones de Thomson no funcionaban, se empezaron a considerar otras posibilidades. Allá por los años treinta se presentó la proposición de que el bajo coeficiente de fricción que permite el fácil deslizamiento de los patinadores sobre el hielo se deba a una película líquida generada por el calor proveniente de la fricción. Sin embargo, los experimentos han demostrado que, si bien es cierto que la fricción puede tener un papel en ciertos casos, no puede explicar otros efectos superficiales en el hielo. Por ejemplo, la fricción no tiene nada que hacer en el caso de la sinterización.

Por los años cincuenta era claro que las explicaciones prevalecientes no funcionaban y se empezaron a revisar los conceptos de Faraday. Cada vez es más claro que sus ideas son básicamente correctas: muchos materiales presentan una película superficial (¿líquida?) a temperaturas inferiores a aquella en que se funde el material. El orden en esa película microscópica es distinto del que se mantiene en el resto de las capas atómicas del sólido, pero no es exactamente el mismo que se observa en un líquido. Esto se debe a que los átomos superficiales "sienten" el orden de las capas inferiores y no pueden estar completamente ajenos a él: alguna memoria sobrevive del estado de orden. Se ha acuñado el término *cuasilíquido* para describir este estado.

Cuando un material se funde se observa que la fase líquida crece a expensas de la fase sólida. Los expertos nos hablan de un proceso de *nucleación* que consiste en el crecimiento de la fase líquida alrededor de los defectos del sólido: dislocaciones, átomos colocados fuera de la ordenada red (intersticiales), lugares donde falta un átomo (vacancias), impurezas, etc. La superficie se considera un gran defecto a partir del cual se produce también la nucleación de la fase líquida. Sin embargo, la expresión fusión superficial no se refiere a esta nucleación que se produce a la temperatura de fusión del sólido, sino a la formación de la película de cuasilíquido presente a temperaturas más bajas. De esta manera el concepto de la superficie como un defecto tiene dos sentidos: primero, el enorme que significa terminar el sólido y, segundo, la película con orden distinto y presente desde temperaturas inferiores. La película de cuasilíquido es más relevante para la nucleación y, además, permite explicar por qué no se puede sobrecalentar un sólido mientras que sí se puede sobreenfriar un líquido. Esto último quiere decir que si bajamos muy lentamente la temperatura, podemos mantener el estado líquido hasta temperaturas inferiores a aquella en que sabemos se produce la solidificación. Éste es otro ejemplo de estado metaestable: como los diamantes, los líquidos superenfriados no están en estado de equilibrio. Si se sigue bajando la temperatura se llega a un punto de inestabilidad y, sin remedio, el líquido se solidifica. La inclusión de una fracción sólida en el líquido metaestable lo lleva de inmediato a la fase sólida. El sólido crece (nuclea) alrededor de esa *semilla*. Podría pensarse que una vez que se tiene el sólido se puede aumentar paulatinamente la temperatura y mantener la fase sólida más allá del punto de fusión. Sin embargo, puesto que desde antes de ese punto de fusión aparece la película de cuasilíquido, se tiene ya la semilla a partir de la cual la fase líquida nucleará.

El hielo es un material complicado y para estudiar la fusión superficial se usan materiales más sencillos como el plomo, por ejemplo. El proceso para tener una buena superficie es complicado. Primero hay que garantizar que se tiene un buen trozo del metal con sus átomos bien acomodados, un monocristal. Cortes en diferentes direcciones resultan en distintas estructuras atómicas superficiales. La fusión difiere según qué tan empacados queden los átomos en las capas superiores. La película de cuasilíquido se presenta a temperaturas menores para superficies menos empacadas. Una vez producida la superficie deseada hay que limpiarla. Primero se limpia químicamente, después se aplica un ciclo de dos pasos: primero se bombardea con iones de argón en ultra-alto-vacío y después se mantiene el sistema a 317° C por una hora. El ciclo se repite hasta que la espectroscopía Auger ya no detecta impurezas y la difracción de electrones de baja energía (LEED) nos muestra una superficie bien ordenada. Estas dos técnicas, espectroscopía Auger y LEED serán materia de sendos capítulos más adelante.

Imaginemos un cristal perfecto, como el que se representa en la figura 10(a). Enviamos un haz de protones con

energía fija que viaja en dirección paralela a una fila de átomos. Encontraremos que casi todos los protones *se reflejarán* al rebotar en los átomos de la primera camada e irán a parar a un detector que capta sólo aquéllos que salen en la dirección de reflexión. Los átomos que se encuentran *a la sombra* de los de la superficie casi no serán golpeados por protones. Algunos proyectiles lograrán pasar a las capas inferiores pero al salir rebotados hacia la superficie perderán energía debido al bloqueo de las capas superiores.

La gráfica del número de protones colectados por el detector aparece en la parte inferior de la figura 10(a): hay un pico formado por los protones que fueron rebotados en la primera capa con prácticamente la misma energía con que fueron enviados; luego hay contribuciones, a energías menores, de los protones que rebotaron más adentro. Al aumentar la temperatura los átomos superficiales se mueven de sus sitios y ya no amparan a los átomos inferiores. Ahora los protones pueden pegarles a todos los átomos que se han descubierto [figura 10(b)], pero al llegar a donde prevalece el orden encuentran nuevamente individuos que tienen "bajo su sombra" a los que están más abajo. Aunque los protones hayan podido penetrar más capas pierden energía por el bloqueo que sufren al salir. Por eso la gráfica del proceso [parte inferior de la figura 10(b)] muestra una meseta que representa la parte de desorden superficial. Si más capas se desordenan la meseta se extenderá a energías menores. Estas son las predicciones. Veamos qué dice el experimento.

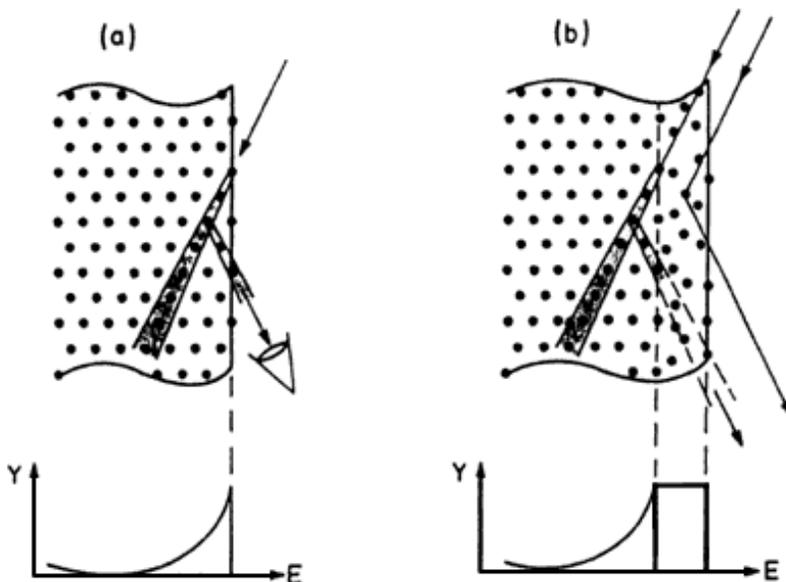


Figura 10. Cambios en la detección de protones al alterarse la superficie de un cristal perfecto. (a) Representa un sólido perfectamente bien ordenado. El haz de protones y el detector están alineados con las filas de átomos. El primer átomo de la fila tiene bajo su cobijo a los siguientes. En (b) hay una película de cuasilíquido. Los átomos que pueden ser alcanzados por los protones son los desubicados y los de la primera camada que mantiene el orden. La situación de (a) se repite con estos últimos. Las gráficas interiores representan las cantidades de protones que son detectados en cada energía. (J. W. M. Frenken y J. F. Van der Veen, *Physical Review Letters*, vol 54, p. 134, 1985)

La temperatura de fusión del plomo es 327.5°C . El montón de crucechitas que se ve en la parte superior de la figura 11 es la meseta que se produce a una temperatura un décimo de grado sobre la de fusión. Por el contrario, los circulitos se obtienen a una temperatura menor que la de fusión (327.3°C). Se trata de una meseta que se extiende hasta unas veinte capas atómicas que corresponde al espesor de la película de cuasilíquido. Las restantes mediciones se obtuvieron a temperaturas bastante inferiores a la de fusión (287.8°C , 232.8°C y 21.8°C). Las curvas b y c (287.8°C y 232.8°C) muestran ya el efecto de la presencia de una película superficial. El profesor J. F. van der Veen y su grupo han realizado estos experimentos con plomo y han estudiado el fenómeno en otros materiales como el aluminio. De sus experimentos concluyen que abajo de 227°C la superficie de plomo estudiada está perfectamente ordenada pero al pasar a temperaturas mayores se forma una película de cuasilíquido que a 287°C tiene tres capas de espesor. El número de capas atómicas en forma de cuasilíquido crece con la temperatura hasta que en el punto de fusión toda la muestra está en fase líquida.

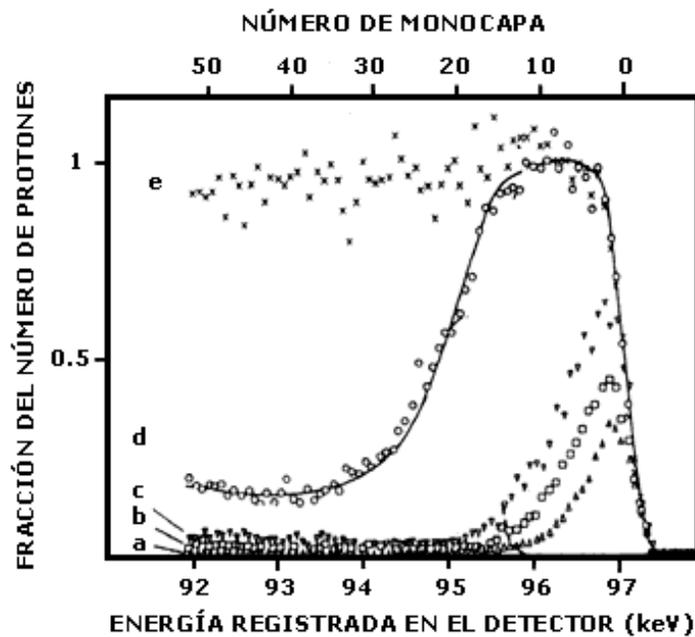


Figura 11. Gráficas de los registros en el detector a diferentes temperaturas de la muestra. La temperatura de fusión del plomo es 327.5° C y las curvas (normalizadas) fueron medidas a 22° C (a), 233° C (b), 288° C (c), 327° C (d) y 327.8° C (e). (J. W. M. Frenken y J. F. Van der Veen, *Physical Review Letters*, Vol. 54, p. 134, 1985.)

Los estudios teóricos para entender la física que subyace en los fenómenos de cambio de orden que arrancan de la superficie son de naturaleza muy variada. Se ha encontrado que la fusión superficial está emparentada con muchos otros procesos. Un ejemplo es el caso de las superficies de aleaciones binarias ordenadas, donde tenemos una situación de orden en el bulto, en la que los átomos de los dos metales constituyentes ocupan sitios perfectamente bien determinados a bajas temperaturas. Al calentar la aleación los átomos empiezan a cambiar sus sitios hasta que en la temperatura de transición de orden a desorden se ha perdido todo rastro de la asignación de sitios dada, a bajas temperaturas, a cada tipo de átomos. Hemos encontrado que, al igual que en la fusión superficial, la transición de orden a desorden puede ser inducida por la superficie. Unas cuantas capas aparecen desordenadas antes de que se alcance la temperatura de transición y, al aproximarse a ella, el número de capas desordenadas va en aumento.

Otro tipo de estudios que se han realizado, son las simulaciones. La figura 12 muestra el resultado de una simulación de fusión superficial para el caso del plomo. Se propone un potencial de interacción entre los átomos de la muestra de tal manera que se recuperen todas las características medidas para el material. En este caso, estamos viendo lateralmente una fracción de la muestra simulada. En la dirección perpendicular al papel existen tantos sitios como los que contamos en la dirección horizontal. Hay dos superficies libres. Se supone que lo que sucede en este fragmento se repite en una muestra que es infinita en la dirección horizontal y en la dirección perpendicular (condiciones periódicas). Se deja evolucionar al sistema a diferentes temperaturas y se registra, a intervalos regulares, la posición de todos los átomos del sistema. Las trayectorias de los átomos aparecen graficadas en la figura 12 que se obtuvo a partir de cálculos realizados en una supercomputadora.

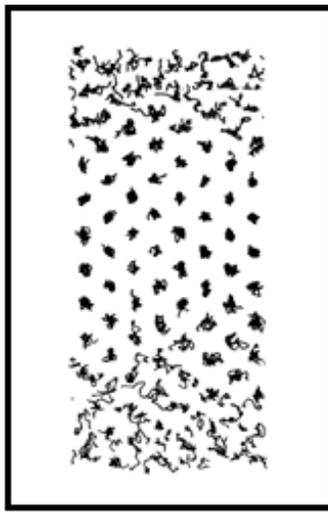


Figura 12. Simulación de un proceso de fusión superficial en una película delgada de plomo. Mientras los átomos del bulto aún mantienen sus posiciones, los superficiales se han desubicado. (Cortesía del profesor C.-Kim Ong.)



VIII. UNA ALFOMBRA VOLADORA

...llevaban una estera voladora. Pero no la ofrecieron como un aporte fundamental al desarrollo del transporte, sino como un objeto de recreo.

G.GARCÍA MÁRQUEZ

CUENTA la crónica de Macondo que poco después de nacer Amaranta llegaron los gitanos, los mismos que habían llevado el hielo, esta vez con una estera voladora. A diferencia de la tribu de Melquiades, no estaban interesados en los avances de la ciencia sino que eran mercachifles: sólo usaban la estera para pasear a la gente que pagaba una módica cuota para sobrevolar Macondo.

Las esteras voladoras han viajado silenciosamente los cielos de muchas fantasías: Ícaro atrapó los más antiguos sueños de la Humanidad, venciendo a la fuerza gravitacional, y los llevó a la hoguera del Sol donde perecieron cuando el calor solar derritió sus alas de cera.

Desde que los hombres fabularon el relato de Ícaro hasta que el ser humano pudo surcar los aires pasaron muchos siglos. Varias formas ideó la imaginación para romper las ataduras a la superficie del planeta. Mecanismos incompletos que pueden, casi en su totalidad, repartirse en dos grandes grupos: tener alas o poseer un don mágico. Hay, desde luego, historias en las que los voladores disfrutaban de ambos. En nuestra actualidad no faltan quienes buscan arcanos misterios que permitirían a los seres humanos elevarse, levitar, perder la condición de "grosera materia adherida siempre al piso". La ciencia ficción nos ha ofrecido artilugios que funcionan con base en "fuerzas antigravitacionales". En los mejores de estos cuentos, los aparatos no son explicados ni los secretos de su funcionamiento develados a los ávidos buscadores de maravillas. Simplemente funcionan y ya. La naturaleza de la fuerza que vence a la gravedad no entra en la discusión, tampoco se nos explica cómo genera la mente esos "campos" que permiten levitar a Chance Gardener (el personaje principal de la película *Un jardinero con suerte*, interpretado por Peter Sellers) quien se aleja caminando sobre las aguas al final de la película. Que caminar sobre las aguas de un lago sea un problema de superficies es un punto de vista como lo es el mensaje de la película: "La vida no pasa de ser un estado de ánimo."

Las fuentes de las fuerzas que permiten la levitación en el mundo físico son de naturaleza variada. Un caso es el de los superconductores que no permiten la invasión del espacio que ocupan por campos magnéticos y al repelerlos levitan frente a un imán, o lo hacen levitar, dependiendo de los tamaños relativos (y las posiciones). Este es el principio físico que tal vez permita, en el futuro, el movimiento de trenes a muy altas velocidades.

Otro ejemplo es el de la fuerza entre electrones ocasionada por el principio de exclusión de Pauli. De acuerdo con él dos electrones no pueden encontrarse en el mismo estado (la descripción del estado incluye la posición). La tabla periódica de los elementos es una manifestación de este principio que, si no lo hubiera, los electrones se podrían acomodar en el nivel atómico más bajo. Pero no, sabemos que dependiendo de la variedad de estados permitida en cada nivel sólo se puede acomodar un número limitado de electrones. Los siguientes tienen que hacerlo en niveles de energías mayores.

La situación que nos interesa aquí se da en la superficie del helio líquido. Se dice fácil, pero los experimentos son difíciles. Lo primero es tener el helio líquido, lo que significa temperaturas inferiores a -269°C que requieren de una tecnología muy refinada. El comportamiento de los electrones adicionales a los que tienen los átomos en helio líquido ha sido un tema de estudio desde hace muchos años. Esto se debe a las propiedades de superfluidez del helio a bajas temperaturas y al hecho de que uno de sus isótopos, conocido como He^3 , sea el único líquido neutro formado por partículas con espín $1/2$, accesible para experimentos de laboratorio. Esas propiedades han convertido al helio en campo fértil para el estudio de las propiedades cuánticas de la materia.

Analicemos lo que sucede cuando un electrón se acerca a la superficie de helio líquido. El electrón sentirá primero una atracción hacia la superficie. Esto es debido a la fuerza entre el electrón y el momento dipolar de los átomos de helio producido por el mismo electrón. Sin embargo, a distancias muy cercanas a la superficie, el principio de exclusión de Pauli produce una fuerte repulsión.

Entonces, para mantener un electrón muy cercano a la superficie es necesario aplicar una fuerza adicional sobre él. Esto se logra por medio de una placa positivamente cargada sumergida en el helio. De otra manera, debido a que "cargas del mismo signo se repelen", los electrones tienden a distanciarse unos de otros lo más que pueden y abandonan la superficie líquida.

Para poder vencer la fuerza producida por la exclusión y penetrar la superficie del helio líquido es necesario que dotemos al electrón de gran energía. Una vez sumergido en el líquido, la presencia del electrón se revela por una pequeña burbuja que también es manifestación del principio de Pauli. Pero para lograr ese estado de burbuja el electrón requiere bastante energía. Una forma de hacerlo es aumentar el voltaje entre los electrones y la placa positiva. Si esto se hace paulatinamente se puede observar una depresión en la superficie del helio. Esta depresión es producida por la repulsión entre los electrones flotantes y los electrones de los átomos de helio. Si el voltaje sigue aumentando llega un momento en el que la depresión alcanza una profundidad crítica y sus paredes se doblan sobre los electrones que pasan al estado de burbuja.

Richard Williams y Richard Crandall, investigadores de la RCA, fotografiaron la depresión en 1973. La fotografía se muestra en la figura 13 junto con un esquema que muestra a los electrones flotantes jalados por la placa positiva sumergida en el helio líquido. Es una fotografía que se mira con respeto: son muchas las dificultades que hay que vencer para captar una imagen como ésta en los espacios reducidos donde se pueden mantener temperaturas cercanas al cero absoluto en las que el helio es líquido.

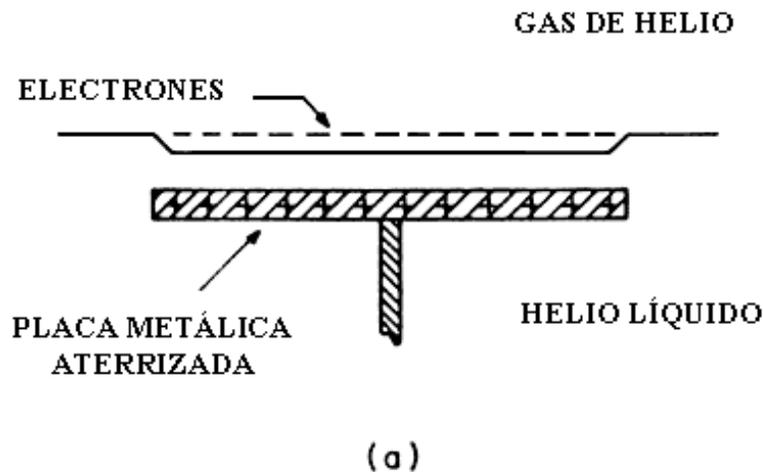
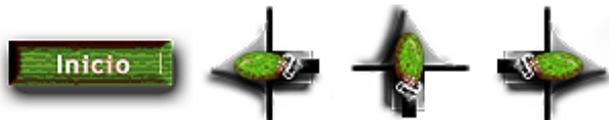


Figura 13. (a) Ilustración esquemática de la superficie de helio líquido, los electrones en la superficie y la placa metálica bajo la superficie. (b) Fotografía de la depresión de la superficie debida a la fuerza de condensación experimentada por los electrones. La fotografía se tomó desde un ángulo de 10° sobre la horizontal. (cortesía de Richard Williams).



IX. LAS PRINCIPALES TÉCNICAS

¿COLORES FALSOS?

HACE algún tiempo, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional sintió la necesidad de forjarse un lema, leyenda, grito de guerra o como quiera llamársele. Algo que identificara la actividad de los investigadores con la personalidad de la institución y el deseo de sacar a México del hoyo. Que fuera como el recordatorio permanente de que la raza grita desde el fondo, que cuando nuestro gran espíritu se manifiesta nos parece sentir que tarde o temprano "la vamos a hacer". Entre todos los posibles lemas sugeridos, destacó uno, hecho medio en serio, medio en broma por Jorge Helman, investigador del Departamento de Física en esa época. No recordamos con precisión el enunciado pero era algo como: "El Centro está por la Raza" o "Por la raza está el Centro". Un juego de palabras que queda para quienes lo entiendan. Uno de los posibles significados, entre tantos que se le puede dar, es que de una u otra manera existe una obligación de la investigación para con "La Raza".

Curiosamente, desde hace algún tiempo se cumple una de las obligaciones de la ciencia y de los que trabajan en su desarrollo en la estación del metro La Raza. Se trata de la difusión de la ciencia. Gracias a una asociación que tiene como una de sus principales actividades tal difusión, existen largos trayectos que han de recorrerse al cambiar de línea en esa estación, túneles donde podemos pescar algo de la ciencia cada vez que pasamos y, si ponemos atención, un vasto conocimiento. Bastaría ir acumulando algo a cada pasada. Podríamos acabar con un excelente conocimiento de las constelaciones y su posición en la bóveda celeste, por ejemplo.

En una de esas ocasiones en que hubimos de atravesar los túneles de La Raza nos tocó escuchar expresiones de desencanto de un par de bellas adolescentes, provistas de sendos cuadernos, causado por un término que aparece en algunas de las fotografías del sistema planetario: fotografía "en colores falsos". Esos dos exponentes de nuestras bellezas en época colegial, enviadas ahí a realizar sus tareas entre día y día de clases, se manifestaban desilusionadas porque la realidad tendría otros colores que los de las fotografías. ¡Con lo fácil que es ir a comprobarlo! En la colección de fotografías que nos muestran los órdenes de magnitud de las longitudes en las que sentimos que campea nuestro conocimiento (desde distancias intergalácticas hasta el tamaño de los quarks), aparecen representaciones de minúsculos átomos o, aún más, de los quarks. Las distancias se dan en potencias de diez: el paso de una fotografía a la otra debería guiarnos para ir entendiendo cuán pequeñas o cuán grandes son las dimensiones comprendidas.

Así, arrastrados por el río de gente (que llega a ser mar en muchas ocasiones), llegamos frente a una representación de partículas subatómicas. No hay oportunidad de quedarse ahí, tal vez a otra hora sería posible, pero no durante las horas "pico". Sin embargo, alcanzamos a notar las hermosas esferas coloreadas, sombreadas, casi posando para la foto. ¿Colores falsos? Claro que sí. Nada puede ser color de rosa, ni verde, ni azul, ni de ningún color a esos niveles. No se puede ver nada de tamaño inferior a 1000Å , si por ver entendemos registrar señales en la región del visible, ya sea con un instrumento, ya sea con los ojos.

MICROSCOPIA

La pregunta no se hace esperar: ¿y las imágenes de microscopio electrónico? Se pueden ver, ¿no es así? Ciertamente. Sin embargo, en el caso de las imágenes de microscopio electrónico hemos realizado un proceso parecido al de aprender a ver. Proceso de aprendizaje del cual no nos acordamos. Hemos venido aprendiendo a reconocer patrones, de hecho hemos inventado la forma de traducir la información que se recibe de un microscopio electrónico a los patrones que podemos reconocer en la región del visible. Parte de los sistemas de observación que se utilizan en la ciencia de superficies, cuando quieren producir una imagen lo hacen mediante un código de traducción. Incluso las imágenes aparecerán coloreadas, pero los colores serán asignados de acuerdo a un código preestablecido. Podrá, por ejemplo, pasar de regiones de baja densidad electrónica en rojo a regiones de alta densidad en azul. Sí, colores falsos, pero dan la información en la forma más adecuada para una rápida interpretación.

Lo cierto es que no siempre nos detenemos a pensar en las limitaciones de nuestros aparatos sensoriales. No es difícil encontrarse con alguien que piensa en la posible existencia de un microscopio óptico sin límite: iluminar y aumentar el tamaño de la imagen mediante un sistema de lentes. Tan pronto como se piensa en las longitudes de

onda y que se entera uno que el espectro visible no es sino una reducida fracción del espectro de longitudes de onda se empiezan a entender las limitaciones de "lo óptico". Un microscopio óptico puede observar objetos cuyos tamaños van desde unos cuantos milímetros hasta aproximadamente una micra (un milésimo de milímetro). Pasamos entonces al microscopio electrónico que tiene un rango de observación de una décima a una millonésima de milímetro. O sea, que hay una parte de posibles tamaños que puede ser observada ya con el microscopio óptico, ya con el electrónico. Esta superposición es como la piedra de Rosetta que permite la creación en microscopía electrónica de códigos fácilmente interpretables como imágenes. Los códigos se aplican a toda la región observable con el microscopio electrónico y deben dar información análoga a la del microscopio óptico en la región de coincidencia.

Otra cosa en la que vale la pena meditar un poco, antes de estudiar las técnicas de observación para regiones mucho menores que las longitudes de onda de la luz visible, es en el proceso mismo de observación. En él intervienen tres partes: la sonda, el objeto observado y el detector de la respuesta al sondeo.

Veamos el caso del sentido de la vista. Para ver un objeto necesitamos iluminarlo. En este caso la sonda la constituyen fotones que hacemos incidir sobre el objeto que absorberá buena parte de ellos pero que reflejará otros. Algunos de los fotones reflejados (la respuesta) llegan al sensor, que es un aparato complicado que tiene que ver con varios órganos de nuestro cuerpo. El proceso de visión es complicado, comprende los detectores de radiación (los ojos) que transforman la señal, un sistema de transmisión de esa señal (nervio óptico) y un centro de procesamiento (cerebro). En el centro de procesamiento se lleva a cabo la parte más complicada de la visión. Lejísimos estamos de querer meternos en el problema de describir las operaciones que se llevan a cabo en el centro de procesamiento. Mencionamos tan sólo que entre todas las fases hay una que requiere la comparación de la información contenida en la señal con patrones archivados en un centro de memoria de la formidable computadora que es el cerebro. Ahora, como dicen los neuropsicólogos, una cosa es reconocer el papel del cerebro y otra entender cómo el tejido nervioso puede convertir energía, tal como la de las ondas luminosas, en sensaciones que nos signifiquen algo y que en su momento nos conduzcan hasta la acción de pensar. Algo semejante podemos decir en este libro de los sistemas detectores y procesadores de las diferentes señales: sabemos el papel que desempeñan, los detalles quedan para el que quiere seguir el juego de la investigación en la ciencia de superficies (u otro campo donde se hagan investigaciones parecidas).

Pongamos un poco de detalle, tan sólo un poco, en la descripción de los procesos seguidos por nuestro cerebro para la captación de información proveniente del medio externo.

El proceso de observación empieza en los receptores. Estrictamente su función es actuar como transductores convirtiendo energía sensorial en actividad neural. Lo que llamamos energía sensorial varía de sentido a sentido. En el caso de la visión se trata de la energía existente en las ondas luminosas que es convertida en energía química en los receptores de la retina y, a su vez, la energía química se convierte, en actividad neural. En el caso del oído, la energía de las ondas sonoras se transforma en energía mecánica en forma de movimiento de los pequeños huesos del sistema auditivo y de la membrana basilar que contiene los verdaderos receptores pilosos. Es sólo después de que las células receptoras pilosas se han activado que la descarga neural ocurre. En el sistema somatosensorial, la energía mecánica en forma de presión, toque, vibración, etc., activa mecanorreceptores que generan actividad neural.

Cada sistema sensorial requiere de tres o cuatro neuronas conectadas en sucesión para hacer pasar la información de las células receptoras a la corteza. El sistema visual usa tres. Una vez que la información ha sido transducida, viene codificada por medio de potenciales de acción. La información sensorial es conducida al cerebro por haces de axones que se llaman nervios hasta que entran al cerebro y de ahí en adelante tractos. Los elementos con los que se maneja una señal, por ejemplo la visual, van cambiando de número y naturaleza a lo largo del proceso que empieza con bastones y conos en la retina, luego siguen células bipolares, etc. De la variedad de los elementos y de cómo cambian de número se desprende que la codificación de la señal va cambiando.

Aunque no es el lugar para formular las dudas, mencionemos que todos los nervios llevan exactamente el mismo tipo de señal. No hay una forma especial para cada uno de los sistemas sensoriales. ¿Cómo hace el cerebro para distinguir entre las señales de esos sistemas sensoriales? ¿Cómo es que no confunde entre señales auditivas y visuales, o entre visuales y táctiles? Nos dicen los neuropsicólogos que a veces se producen ese tipo de confusiones. Que cuando alguien pasa las uñas por la superficie de un pizarrón y hay la típica reacción en la piel hemos registrado el sonido en forma táctil.

LA MICROSCOPIA DIGITAL

Habitualmente cuando se menciona a los microscopistas nos hacemos la imagen de una persona de ojos cansados, como a medio cerrar, casi soñadores, que se la pasa encorvado sobre un tubo que en el otro extremo tiene la muestra observada. Ciertamente que aún es necesario hacer muchos trabajos de investigación que producen personas como las de esa imagen. Basta imaginar a un investigador que necesita aislar una fibra de un músculo de rana y se la pasa horas sobre el microscopio realizando el delicado trabajo. Después montará el delicado objeto entre dos electrodos a fin de imponer un pequeño voltaje y estudiar el efecto de varios fármacos sobre las propiedades de la fibra. Nada, que debido al cansancio hace las cosas torpemente y se le rompe la fibra: a volver a empezar. Sin embargo, no todo el trabajo de microscopía es así. De hecho, los microscopios más modernos trabajan en una forma que tiende a imitar, pobremente desde luego, el proceso de visión.

Creemos que una breve descripción de la manera como trabajan los microscopios ópticos más modernos puede ser de utilidad para entender otras técnicas, el microscopio electrónico de barrido, por ejemplo. Los problemas de patrones que se mencionaron arriba también han de resolverse en la microscopía óptica. Para salir un poco del tema pensemos en la observación de una célula. Las dimensiones son todavía suficientemente grandes como para poder hacer observaciones con radiación (fotones) en la región visible (luz). En este caso se trata de algo de tan poco grosor que la luz que se utiliza para la observación es la que atraviesa a la célula. La sonda es luz y la respuesta también, sólo que la información que obtendremos dependerá de lo que sea absorbido por la célula. Al pensar un poco nos daremos cuenta de que siempre es así: lo que vemos depende siempre de lo que no fue absorbido sólo que en el caso habitual la radiación que recibimos es la reflejada por el cuerpo (la luz no atraviesa un cuerpo opaco, por definición).

Llega el microscopista, pone la muestra (una cosa complicada, trata de observar una célula), la ilumina y, nada: las células son transparentes a la luz, por lo general. La radiación luminosa las atraviesa sin interaccionar con ellas y las propiedades físicas de la luz se mantienen: nada qué observar. Hay que agregar a la preparación unas sustancias que se absorben de manera diferente en distintas partes de la célula. Estas sustancias absorben la luz dejando pasar algún color. Como se absorben de manera selectiva, colorean de diversas formas las partes de la célula y permiten la observación.

Podemos considerar la imagen proporcionada por el microscopio como un mensaje visual, portador de la información en el complejo preparado de célula, más colorantes. La interpretación del mensaje requiere la comparación con esquemas ya grabados (aprendidos). En este caso, el lenguaje utilizado en el mensaje nos es bastante familiar, lo usamos continuamente. Digamos que es el lenguaje de la luz, hecho a base de parámetros luminosos: claro, oscuro; transparente, opaco; brillante, mate; sombreado, iluminado; liso, áspero (en caso de que la textura se registre); lleno, vacío; de tal o cual color; etcétera.

Desde hace tiempo los microscopistas se dieron cuenta de la riqueza de información contenida en los rayos luminosos obtenidos. Se necesitaba un análisis mucho más completo. Para ello se hace algo similar a lo que hace nuestro sistema de visión: se transforman las señales luminosas en señales eléctricas que a su vez se convierten en información numérica. La información numérica puede almacenarse y procesarse de varias maneras, combinarse con otras observaciones, etc. Estas otras observaciones pueden ser, por ejemplo, la respuesta de la célula a luz de diferentes longitudes de onda (diferentes colores). Todo el proceso tuvo un principio: la calibración. Fue necesario que el proceso pudiera reproducir en forma idéntica patrones bien conocidos. Todo ese proceso que acaba con la imagen almacenada en código numérico se denomina microscopía digital. El término comprende también a las imágenes obtenidas del microscopio electrónico. En éste el proceso es el mismo fuera de que lo que se obtiene de la muestra son electrones y no luz. Antes de volver a nuestros problemas de superficies y a nuestra discusión de las sondas vale la pena mencionar que la digitalización revolucionó la microscopía (¿óptica?). Entre otras cosas, permitió el uso de longitudes de onda fuera de la región visible, como es el caso de la radiación ultravioleta. También es posible barrer una región amplia de la muestra y usar la computadora tanto para cambiar la región observada como para llevar el registro de la información obtenida a partir de cada coordenada. Se dice en este caso que se "barre la muestra".

DE LAS SONDAS

Las sondas utilizadas pueden ser variadas y pueden darse diversos tipos de respuesta para una sola sonda. Sondar una membrana con un golpe produce como respuesta cambios de densidad en la atmósfera que serán detectados por el oído o rápidos movimientos (vibraciones) que pueden detectarse poniendo la mano sobre la membrana. Golpear

repetidas veces un cuerpo puede producir una elevación de temperatura suficiente para que se pueda registrar al tacto; en este caso la respuesta, registrada por la mano, es calor. La precisión de lo dicho en este párrafo es discutible, pero da una idea de los términos que se usarán en lo que sigue. La observación de lo microscópico se hace a base de tirar proyectiles (sonda) a un blanco (muestra) y obtener información a partir de la respuesta resultante, que puede ser de naturaleza variada: los mismos proyectiles rebotados (la información viene dada por los ángulos y las energías con las que salen de rebote los proyectiles) u objetos de otra naturaleza.

Las técnicas de superficie usan dos tipos de sonda: fotones y partículas cargadas. Las energías usadas para los fotones los sitúan principalmente en la región de los rayos X donde, en la actualidad, se tienen fuentes (sincrotrones, véase el capítulo XI) sintonizables a cualquier longitud de onda. Las partículas cargadas pueden ser electrones o átomos ionizados. Se utilizan principalmente átomos ionizados de hidrógeno, helio, argón, neón, xenón, galio, litio, oxígeno, sodio y potasio.

LAS PRINCIPALES TÉCNICAS DE ANÁLISIS EN SUPERFICIES DE MATERIALES

De entrada debe entenderse que ninguna técnica es completa. La técnica a utilizar se escoge de acuerdo a la finalidad perseguida, de acuerdo a lo que se quiere saber de la superficie. La otra cosa que determina la técnica utilizada es el valor de la muestra estudiada. Por ejemplo, si lo que se quiere saber es la composición química de la superficie y el perfil de concentraciones al ir penetrando en el material, se podrá usar la espectroscopía de masa de iones secundarios (SIMS), pero si queremos conservar la muestra tendremos que cambiar de técnica, ya que el SIMS es esencialmente destructivo: desbarata la superficie.

La lista (tabla 1) de técnicas de superficie muestra los nombres en inglés y las siglas con las que se les nombra habitualmente en el medio de los especialistas. Estas siglas se han hecho tan usuales que, con frecuencia, los investigadores se olvidan al hablar de ellas, en conferencias o en publicaciones, de recordarle al público o al lector qué quiere decir alguna de las palabras crípticas usadas para denotar una parte de sus experiencias. Vivimos en la época de la sopa de letras ya que no sólo los científicos sino en todas partes, por ejemplo en los medios oficiales, se usan siglas que no siempre se explican. En ocasiones, una misma técnica con una ligera variante o utilizada en otro rango de energía, cambia o agrega nuevas siglas. Adoptaremos la costumbre de dar a cada técnica un nombre en español que sea una traducción aproximada del nombre en inglés y escribiremos en inglés las siglas. La traducción aproximada en español es propia de este libro y de ninguna manera son convencionales. Hay que mencionar que casi no existen entre los hispanoparlantes acuerdos sobre cómo nombrar las técnicas. Casi siempre se las llama por las siglas de los nombres en inglés.

TABLA 1. Algunas de las técnicas más usadas en el estudio de superficies.

AEPS	<i>Auger Electron Appearance Potential Spectroscopy</i>
AES	<i>Auger Electron Spectroscopy</i>
APS	<i>Appearance Potential Spectroscopy</i>
ARUPS	<i>Angle-Resolved Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy</i>
CHA	<i>Concentric Hemispherical Analyser</i>
CMA	<i>Cylindrical Mirror Analyser</i>
CPD	<i>Contact Potential Difference</i>
DAPS	<i>Disappearance Potential Spectroscopy</i>
EAPFS	<i>Extended Appearance Potential Fine Structure</i>
ESD	<i>Electron Simulated Desorption</i>
ESDIAD	<i>Electron Simulated Desorption Ion Angular Distribution</i>
EXAFS	<i>Extended X-ray Absorption Fine Structure</i>
FEM	<i>Field Emission Spectroscopy</i>
FIM	<i>Field Ions Microscopy</i>
HEIS	<i>High Energy Ion Scattering</i>
HREELS	<i>High Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy</i>
ILS	<i>Ionisation Loss Spectroscopy</i>

IMBS	<i>Inelastic Molecular Beam Scattering</i>
INS	<i>Ion Neutralisation Spectroscopy</i>
IRAS	<i>Infrared Reflection-Absorption Spectroscopy</i>
LEED	<i>Low Energy Electron Diffraction</i>
LEIS	<i>Low Energy Ion Scattering</i>
MBE	<i>Molecular Beam Epitaxy</i>
PSD	<i>Photon Simulated Desorption</i>
RFA	<i>Retarding Field Analyser</i>
RHEED	<i>Reflection High Energy Electron Diffraction</i>
SAM	<i>Scanning Auger Microprobe</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SEXAFS	<i>Surface Extended X-ray Absorption Fine Structure</i>
SIMS	<i>Secondary Ion Mass Spectroscopy</i>
SXAPS	<i>Soft X-ray Appearance Potential Spectroscopy</i>
TPD	<i>Temperature Programmed Desorption</i>
UHV	<i>Ultra-High-Vacuum</i>
UPS	<i>Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy</i>
XPS	<i>X-ray Photoelectron Spectroscopy</i>

Antes de ver en detalle un par de las técnicas experimentales más importantes en las ciencias de superficies, daremos un vistazo rápido a las cinco más usadas a fin de ver sus características y hacer sospechar la forma en que se complementan entre sí. Luego, más adelante y para mostrar la forma de aplicación de las técnicas, presentaremos con más detalle la espectroscopía de fotoelectrones producidos por rayos X (XPS), la espectroscopía de electrones Auger (AES, SAM), y la difracción de electrones de baja energía (LEED).

Las cinco técnicas que repasaremos son: espectroscopía Auger (AES, SAM), espectroscopía de fotoelectrones producidos por rayos X (XPS), espectrometría de masa de iones secundarios (SIMS) y espectroscopía de esparcimiento de iones (LEIS).

ESPECTROSCOPIA DE ELECTRONES AUGER(AES)

La espectroscopía de electrones Auger o AES es, tal vez, la técnica más utilizada. El proceso bajo el cual se producen estos electrones se discute en el capítulo XII. Aquí solo se presentan algunas generalidades.

Se utiliza un haz de electrones para excitar los electrones (denominados electrones Auger) de los átomos localizados en la superficie. La señal medida es proporcionada por estos electrones Auger. Debido a que los electrones del haz inicial interactúan fuertemente con los electrones de los átomos de la superficie, se tiene una técnica que es netamente superficial ya que los electrones penetran realmente poco. Los haces electrónicos pueden enfocarse en regiones pequeñas, lo que permite el estudio de áreas pequeñas y, mediante la aplicación de técnicas de microscopio electrónico de barrido (SEM), la obtención de una imagen de la región bajo análisis. Debido también al gran enfocamiento de los haces iniciales es una técnica de gran resolución.

Algunas de las limitaciones de la técnica se presentan principalmente en el estudio de las superficies de materiales aislantes. Como se están enviando cargas eléctricas puede haber problemas con la acumulación de carga sobre la muestra. El haz puede dañar la superficie y, a raíz de los daños, se pueden presentar "efectos raros".

En la sopa de letras ha recibido varios nombres. En la aplicación con barrido se le ha denominado SAM (*Scanning Auger Microprobe*).

ESPECTROSCOPIA DE FOTOLECTRONES PRODUCIDOS CON RAYOS X (XPS)

El haz es de rayos X con los que se excitan electrones de la superficie. Permite conocer con precisión la naturaleza química de los átomos de la superficie ya que la energía de los fotoelectrones depende directamente de la

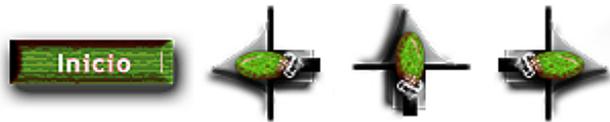
configuración energética de los átomos de los que provienen. Prácticamente no causa daños en la superficie y puede usarse en materiales delicados. No tiene gran resolución ni en área ni en profundidad.

ESPECTROMETRÍA DE MASA DE IONES SECUNDARIOS (SIMS)

Aquí se arrancan átomos de la superficie usando un haz de iones de baja energía. Los fragmentos ionizados se miden directamente con un espectrómetro de masas. Da gran información acerca del contenido químico de la superficie. A diferencia de otras técnicas puede detectar hidrógeno y distingue entre diferentes isótopos. Tiene una buena resolución espacial y da excelente información sobre el perfil de concentraciones con la profundidad. Es esencialmente una técnica destructiva.

ESPECTROSCOPIA DE ESPARCIMIENTO DE IONES (LEIS)

Un haz de iones con energía fija se lanza sobre la superficie. Ahí es esparcido por los átomos superficiales. Los iones tienen energías que dependen de la masa de los átomos superficiales y son analizados mediante espectrómetros de masa. La técnica es altamente sensible a la superficie y puede dar información sobre la estructura de la superficie por medio de la variación de los ángulos de incidencia. Como no tiene penetración más allá de la superficie no tiene capacidad para estudiar perfiles a profundidad.



X. LA IMPORTANCIA DEL ULTRA-ALTO-VACÍO

EN LA lista de técnicas para el estudio de superficies se incluye al Ultra-Alto-Vacío (UAV, la abreviación utilizada en inglés es UHV, de Ultra High Vacuum). No es de ninguna manera una exageración decir que la ciencia de superficies se desarrolló hasta el momento en que fue posible alcanzar el UAV. Veamos las razones para esa afirmación, al mismo tiempo que entendemos qué es el UAV y nos preguntamos realmente qué tan vacía está una cámara de experimentación cuando decimos que se encuentra a ultra-alto-vacío.

Los modernos equipos de investigación y observación de superficies están diseñados de tal manera que se pueden aplicar varias técnicas en la misma cámara, sin romper el vacío. Los entendidos hablan de que hacen esto o aquello *in situ*.

Un investigador ha producido un cristal, digamos a partir de un metal, con una superficie que supondremos perfecta. La deja expuesta a la atmósfera en que vivimos por un corto tiempo y regresa luego a hacer una observación microscópica. Ha de ser microscópica ya que en la mayoría de los casos no se nota ningún cambio a simple vista, aunque en algunos casos sí puedan percibirse opacamientos e incluso cambios de color. Los átomos de la especie química que utilizó en el crecimiento aparecerán recubiertos por una capa cuyo espesor puede llegar a ser igual al de varios de los planos cristalinos que conforman el cristal ahora sepultado. En una cámara de UAV podría haberse dejado el cristal por tiempo indefinido sin que prácticamente átomo alguno hubiera venido a parar a la superficie. Digamos algo más cuantitativo para poder dar una idea más concreta de lo que es el UAV.

Antes que nada el concepto de monocapa. Se trata de la unidad con que los experimentadores nos comunican el grado de recubrimiento de una superficie. Consideremos un centímetro cuadrado de una superficie perfecta, trátase de un metal para efectos de concreción. Ese centímetro cuadrado nos presenta entre mil billones y dos mil billones de los átomos del metal. El número varía con la especie química y con la estructura cristalina. Tomemos, con afán de precisar, que mil quinientos billones de átomos se encuentran en ese corral de un centímetro cuadrado. Para que se vea nuestra riqueza en átomos, recordemos que un billón es un millón de millones y no mil millones como para los estadounidenses. Pongamos ahora el cristal en una atmósfera, que bien podría ser la misma que respiramos, pero para facilitar las cosas la escogemos como formada por un solo tipo de átomos. Pensemos lo peor: todo átomo que visita nuestro corral de un centímetro cuadrado llega para quedarse pegado encima de uno de los átomos que inicialmente forman nuestro cristal. Decimos que se ha producido un recubrimiento de una monocapa cuando todos los átomos del corral han sido cubiertos. En nuestro caso preciso se ha requerido un depósito de mil quinientos billones de átomos en un centímetro cuadrado para completar la monocapa.

¿Cuánto tarda en producirse una monocapa? El tiempo dependerá de tres características de la atmósfera, la que suponemos en equilibrio térmico con el cristal y formada de moléculas que tan pronto llegan a la superficie metálica se pegan a ella: la temperatura, la naturaleza y la densidad de las moléculas. Por simplicidad suponemos que la atmósfera está formada por un gas monoatómico (las moléculas tienen un solo átomo). La cantidad que nos dice cuál es el vacío que tenemos es la presión. A temperatura fija (supóngase que fijamos la temperatura a 20° C, aproximadamente la temperatura en la que vivimos) la presión es directamente proporcional al número de átomos por centímetro cúbico. La unidad de presión usada es el *torr* o milímetro de mercurio. La presión de una atmósfera equivale a 760 torr. Así que un torr es un poco más grande que la milésima de la presión atmosférica. A la presión de un torr una monocapa se deposita en unas cuantas millonésimas de segundo. Si la presión se reduce hasta una millonésima de torr la monocapa se deposita en un tiempo ligeramente mayor a un segundo. Para que la monocapa se forme en una hora se requiere una presión de una mil millonésima de torr (10^{-9} torr).

Todo lo anterior quiere decir que en esta situación de pensar lo peor, en la que todo átomo que llega a la superficie se pega a ella, si queremos realizar un experimento que demore una hora necesitamos que en ese tiempo se forme sólo una fracción de monocapa (menos del 10% de monocapa). Se requiere entonces una presión de una diez mil millonésima de torr (10^{-10} torr), o aún menor. Se dice, cuando logramos presiones de 10^{-9} torr o menores, que hemos llegado a la región del UAV.

Para acabar de darse cuenta del significado del UAV, es conveniente considerar la densidad del gas o, si se quiere, la distancia entre los átomos que quedan en una atmósfera con una presión de la diez mil millonésima de torr. Para hacer todo más interesante, imagine, antes de seguir la lectura, cuántos átomos habría en un centímetro cúbico de la atmósfera de la cámara a presión de UAV. Para que el número tenga significado hay que decir cuántos átomos por

centímetro cúbico habría a la presión de una atmósfera con una sola especie química, y, para sentir qué tan vacío es el UAV, hay que averiguar cuántos átomos hay en un centímetro cúbico de material interestelar en nuestra Galaxia (o ir más lejos indagando el número para el material intergaláctico). Los cálculos son relativamente sencillos, basta saber la presión y la temperatura para decir cuántos átomos quedan en cada centímetro cúbico. No vamos a repetir los cálculos, tan sólo vamos a dar respuestas aproximadas para las diferentes densidades que hemos señalado antes.

A la temperatura en que habitualmente vivimos y con presión de UAV (10^{-10} torr) se tienen unos cuantos millones de átomos por centímetro cúbico. A algunas gentes les resulta sorprendente este número, les parece alto. ¿Lo es?

Los millones de átomos (menos de diez) comprendidos en cada centímetro cúbico del UAV pueden considerarse, en promedio, uniformemente distribuidos en el espacio. La distancia que guardan entre sí un par de átomos vecinos es de algo así como una décima de milímetro. Pareciera que los átomos están demasiado cerca. ¿No es así? Para darnos una idea del orden de magnitud de la densidad y de la separación de estos átomos, pensemos en la misma especie química a la presión de una atmósfera. La densidad se multiplicaría por 10^{10} (diez mil millones) y la distancia por un factor de diez mil. La densidad obtenida es de unos ¡dos mil quinientos millones de billones de átomos por centímetro cúbico!, y la distancia entre átomos es de aproximadamente una millonésima de milímetro. A temperaturas mucho más bajas, entre las estrellas de nuestra Galaxia se tienen densidades mucho menores. Tomemos como unidad la distancia que separa a nuestro Sol del centro de la Galaxia. A un tercio de esa distancia, a partir del centro galáctico, la densidad es de 0.4 átomos por centímetro cúbico, con una separación entre átomos de aproximadamente 1.5 centímetros. A distancias comparables a la que nos encontramos del centro de la Galaxia la materia interestelar tiene una densidad de un átomo por centímetro cúbico. Estos resultados se resumen en la tabla 2.

TABLA 2.

Presión	Temperatura °K	Densidad átomos /cm ³	Distancia entre átomos
Atmosférica	293	$\approx 2.5 \times 10^{21}$	$\approx 7.41 \times 10^{-8}$ cm ~ 10^{-6} mm
760 torr		Dos mil quinientos millones de billones	~ millonésima de milímetro
UAV	293	$\approx 3 \times 10^6$	$\approx 6.77 \times 10^{-2}$ cm ~ 0.07 mm
		tres millones	casi un milímetro
Presión a 3 kiloparsecs del centro de la Galaxia	~ 3	0.4	~ 1.36 cm
Presión a 10 kiloparsecs del centro de la Galaxia	~ 3	1	~ 1 cm

También podemos pensar en un átomo como una canica que tiene un centímetro de diámetro, ponerla en una esquina de un campo de fútbol y preguntarnos dónde se encontrará la siguiente canica. Pues bien, la canica más cercana se encuentra, cuando la presión es de 10^{-10} torr, a ¡diez kilómetros! A la presión atmosférica normal se encuentra en la siguiente esquina del campo.

Los trabajos iniciales en este campo se realizaban en cámaras de vidrio a las que se hacía el vacío. La física de superficies debió aplicarse al sistema que llevaba la señal detectada de la muestra hasta los aparatos de registro o medición. Las líneas que llevaban estas señales debían atravesar las cámaras de vidrio y los sellos que mantenían el vacío eran interfaces entre el vidrio y el metal. Se debían resolver muchos problemas en esta interfaz para que resultase un buen sello. En la actualidad no existe más ese problema. Un laboratorio moderno de ciencia de superficies por lo regular puede efectuar la aplicación de varias técnicas sin romper el vacío. Las cámaras en las que se aplica cada técnica son de acero inoxidable. Los sellos son metálicos y no se presenta el problema de la

interfaz vidrio-metal.

HORNEAR EL SISTEMA

Un problema que sí tienen todos los sistemas es el de la contaminación de las paredes que después han de soportar el vacío. Si no se tiene cuidado, se hace el vacío y cuando se están realizando las más finas y detalladas mediciones empiezan a aparecer las señales de los átomos que se quedaron agazapados en las paredes y que cuando sobrevino el UAV se sueltan. Hay que hacer que esos átomos se suelten de las paredes para expulsarlos del sistema. Para ello es necesario preparar el sistema antes de iniciar el proceso para la obtención del UAV. Se dice que es necesario "hornearlo". Por ejemplo, se pone el sistema entero a unos 200° C por doce horas, a fin de que las moléculas pegadas en las paredes del sistema sean arrojadas de las superficies y cuando se haga el vacío sean arrastradas con el resto de la atmósfera que se quiere vaciar.

¡SUPERFICIES LIMPIAS!

De nada sirve haber tenido especial cuidado para empezar con un sistema limpio (no contaminado) y haber logrado un excelente vacío, si no se tienen superficies limpias o no se tiene la capacidad para limpiarlas.

Ya que cualquier tiempo de exposición a la atmósfera contamina una muestra (ya vimos los tiempos de formación de monocapas a la presión atmosférica), lo más conveniente es limpiar las superficies *in situ*. Hay varias formas de hacerlo. Se usa, por ejemplo, el calentamiento, en forma similar a como se horneó el sistema. Se puede partir la muestra, para tener una superficie "nueva". La muestra se corta siguiendo los planos cristalinos. En tal caso se dice que se ha *clivado* la muestra. Se puede hacer procesamiento químico siempre con sustancias que no contaminen el recinto y finalmente, se puede limpiar la superficie a base de bombardeo de iones.



XI. RADIACIÓN DE SINCROTRÓN

RESULTA curioso que lo que en alguna ocasión fue considerado un desperdicio y un estorbo sea ahora razón suficiente para crear enormes máquinas. Se trata de la radiación de sincrotrón. Sucede que para estudiar las propiedades de la materia en sus manifestaciones más pequeñas, las partículas elementales, se diseñaron aceleradores de electrones. Se pretende tomar un electrón y hacerlo moverse a gran velocidad. Esto no es de ninguna manera trivial ya que, al alcanzar grandes velocidades, la relatividad empieza a desempeñar su papel y lograr un pequeño aumento de velocidad requiere de grandes inversiones de energía.

En la actualidad existe el famoso acelerador lineal de Stanford, que acelera partículas cargadas a lo largo de distancias de kilómetros. A diferencia del acelerador lineal de Stanford, los sincrotrones aumentan la energía cinética de los electrones manteniéndolos en trayectorias circulares. Esto brinda una nueva característica al proceso. La teoría electromagnética nos ha mostrado sobradamente que una carga, al acelerarse, radiará. Diariamente aprovechamos este fenómeno en la radio, por ejemplo.

Si se logra mantener un electrón en trayectoria circular se tienen dos componentes de la aceleración: la aceleración conectada con el aumento de velocidad y la relacionada con el cambio de dirección del movimiento. El electrón, debido a los cambios de dirección, emite radiación tangencialmente a su trayectoria circular. Cuando lo que se quiere es un electrón moviéndose a grandes velocidades, esta radiación significa una pérdida de energía. Por ello, cuando se iniciaba el uso de los sincrotrones se consideraba un desperdicio y un impedimento. Que era un desperdicio es bastante claro: la radiación se aleja del haz de electrones siguiendo una trayectoria rectilínea y tangencial al círculo de los electrones. Si se la deja ir, ¡Ojos que te vieron ir... ! Que era un estorbo también es claro, ya que las pérdidas de energía que la radiación significa son a cuenta de la energía invertida y obstaculizan el camino para llevar a los electrones a mayores energías.

Los sincrotrones no son realmente circulares, sino que alternan tramos circulares con tramos rectos hasta cerrar la trayectoria. Se usan varios tipos de magnetos. La primera clase, constituida de magnetos multipolares, produce un campo magnético no uniforme que actúa como una lente y no deja que el haz de electrones se salga de una región bien restringida: los electrones viajan hombro con hombro al dar la vuelta al sincrotrón. Otro tipo de magnetos produce un campo uniforme que es perpendicular al plano de la trayectoria y obliga al cambio de trayectoria de los electrones.

En realidad hay dos tipos de máquinas: los sincrotrones y los anillos de almacenamiento (*Storage rings*). La diferencia reside en que los sincrotrones aceleran haces de electrones llevándolos a altas energías por breves momentos y los anillos de almacenaje mantienen haces de electrones de alta energía circulando por horas. Ambos gastan enormes cantidades de energía, sobre todo los anillos de almacenamiento, ya que tienen que estar reponiendo la energía perdida por radiación. Para este fin se usan cavidades con campos electromagnéticos que oscilan a radiofrecuencias.

Pronto nació la idea de aprovechar la radiación. Junto a la actitud de considerar al sincrotrón como una fuente de haces de electrones de alta energía empezó a crecer paulatinamente la de considerar la radiación emitida en los cambios de dirección de los electrones como lo más valioso. Si los primeros en aprovechar la radiación fueron considerados unos parásitos, ahora tendrían que ser considerados unos invasores. Hay tantos usuarios que ahora se construyen sincrotrones con la finalidad primaria de aprovechar la radiación.

Múltiples aplicaciones de la radiación de sincrotrón se han ideado hasta el momento, dadas sus particulares características, pero muchas más aparecerán en lo futuro. Veamos esas mentadas características que la hacen tan codiciada: en la actualidad, múltiples líneas tangenciales sirven la radiación de sincrotrón a pequeños laboratorios que la usan en una gran variedad de aplicaciones.

La radiación de sincrotrón cubre un amplio rango de energías o longitudes de onda que abarca desde el infrarrojo hasta los rayos X. Se trata de la fuente más poderosa de radiación continua en el VUV (se denota así a la radiación en la región del ultravioleta que sólo se propaga en distancias significativas en el vacío) y en la región de los rayos X. La intensidad de la radiación (no sólo los rayos X) producida por el sincrotrón es mucho mayor que la de los tubos ordinarios, y tiene varias características más, entre ellas: la radiación de sincrotrón es sintonizable, de gran brillantez y polarizada.

Se tiene una fuente intensa de rayos X cuya longitud de onda puede ser sintonizada. Esto quiere decir que podemos escoger, de un continuo de valores de la longitud de onda, la que más se acomode a nuestras necesidades. La gran cosa, ya que los tubos ordinarios de rayos X trabajan en longitudes de onda fijas.

Cuando nos dicen que una luz es brillante todos entendemos más o menos lo mismo. Estamos acostumbrados a la idea de brillantez. En el caso de las fuentes de rayos X se aplica la misma definición que resulta al tratar de hacer preciso y cuantitativo el concepto de brillantez para la luz de longitudes de onda visibles. Se trata de una simple extensión: en ambos casos se trata de fotones. Nada más natural que extender un concepto que nace intuitivamente para la radiación de la región visible del espectro electromagnético (que también es parte de la emisión del sincrotrón) y que lo que hace, en última instancia, es contar fotones.

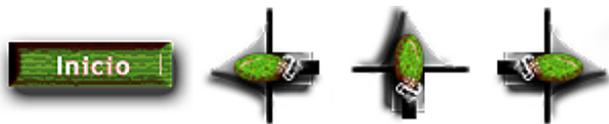
La brillantez depende de tres cantidades: a) número de fotones emitidos cada segundo, b) área transversal de la fuente y c) ángulo del haz. Obviamente la brillantez es proporcional al número de fotones emitidos por segundo. Depende también del tamaño de la fuente. Más precisamente de la sección transversal eficaz de la misma. Esta sección se debe entender de la siguiente manera. Si localizamos un eje para el haz, la sección de la fuente será el área proyectada sobre un plano normal al eje. Mientras más grande sea el área menos brillante será la fuente. En el caso del sincrotrón, el haz de electrones, fuente de la radiación, está muy localizado y, por tanto, el área de la fuente es muy pequeña. La tercera cantidad, el ángulo del haz, nos dice de qué manera, al alejarnos, los fotones irán cubriendo un área cada vez mayor. Como estamos hablando de un haz de fotones, hay que tomar en cuenta que si el haz se abre mucho el número de fotones que toca una superficie de, digamos, un centímetro cuadrado, se va reduciendo a medida que nos vamos alejando. Por ello, en la definición de brillantez aparece el ángulo que mide cómo se abre el haz. En el haz emitido por un sincrotrón los rayos son casi paralelos, del haz se abre muy poco.

Podemos decir, en resumen, que la brillantez mide algo así como la concentración con la que se reciben los fotones. La de la radiación de sincrotrón es un millón de veces la de las fuentes convencionales más intensas.

Las características tan especiales de la radiación de sincrotrón definen con precisión las áreas de empleo. Los médicos la usan en la microtomografía que tiene una resolución mil veces mejor que la tomografía ordinaria.

En el caso de la física de superficies se usa la difracción de rayos X para estudiar propiedades magnéticas, o para el estudio de transiciones de fases de superficies (o mejor; de sistemas de dos dimensiones como capas superficiales y películas de cristales líquidos). En estas situaciones, los efectos son muy débiles y sólo fuentes muy intensas producen un número razonable de rayos X dispersos.

El hecho de que la radiación sea polarizada es esencial para varias aplicaciones. Por ejemplo, al estudiar la orientación de moléculas adsorbidas en superficies, ya que la probabilidad de que un electrón de una molécula absorba un rayo X depende de la orientación de la molécula con respecto a la polarización del fotón y sólo se podrá obtener información de orientación con haces polarizados.



XII. ESPECTROSCOPIA DE ELECTRONES AUGER

LA TÉCNICA de la Espectroscopía de Electrones Auger o AES (*Auger Electron Spectroscopy*) se hizo accesible a los investigadores de superficies al mismo tiempo que las técnicas de vacío. Esto sucedió en la segunda mitad de los años sesenta. Sin embargo, la historia se remonta bastante atrás, a la fecha del descubrimiento del efecto Auger.

EL EFECTO AUGER

Y a hemos visto cómo al ionizarse un átomo en una capa dada, los electrones que se encuentran en niveles más altos de energía tienden a llenar el hueco dejado a menor energía, y cómo al hacerlo se emite un fotón. Al considerar la cantidad de átomos que eran ionizados arrancándoles un electrón de la capa K y compararla con la fracción de estos átomos que emitían fotones se encontraba que la fracción era muy inferior a uno. Si el único mecanismo para que el átomo vuelva al estado base era la caída de un electrón de un nivel superior al nivel ionizado con la emisión de un fotón todos los átomos ionizados deberían emitir fotones.

La existencia de otro mecanismo fue comprobada en 1925 por el físico francés Pierre-Victor Auger. Se trata del ahora llamado efecto Auger. En el proceso Auger el hueco de una capa se llena con un electrón de otra capa pero no hay emisión de fotón, sino que la diferencia de energía pasa a un electrón de una tercera capa. Mientras el fotón emitido en el proceso radiativo tiene una energía exactamente igual a la diferencia de energías de los niveles entre los que se hace el salto del electrón, en el caso Auger el tercer electrón se lleva una diferencia de energía como energía cinética.

Pierre-Victor Auger estudiaba el comportamiento de los rayos X haciéndolos pasar por una atmósfera de hidrógeno y argón en una cámara de Wilson o cámara de niebla. Los rayos X bombardean a los átomos y los ionizan. El electrón arrancado o fotoelectrón deja una larga traza en la atmósfera. Junto a las largas trazas de los fotoelectrones Auger observó las trazas cortas producidas por los electrones Auger.

Tanto la fotoemisión como la electroemisión (Auger) se inician a partir de la ionización de un átomo (inicialmente era neutro, luego queda cargado positivamente al arrancarle un electrón) por el bombardeo ya con rayos X, ya con partículas. Ahora, el proceso Auger implica que el átomo queda doblemente ionizado, ya que hay la emisión de un electrón de más.

DE NUEVO: LA "PICOLOGÍA"

La aplicación del efecto Auger al estudio de las superficies tardó mucho en producirse. Ya hemos mencionado que se desarrolló como técnica hasta que se pudieron obtener buenos vacíos. En los capítulos iniciales de este libro se ha mencionado varias veces tal modelo de espectroscopía y hemos visto varias aplicaciones, como el caso de las superficies de diamante (ver el capítulo III), y aunque hemos mostrado gráficas que señalan cómo obtener información a partir de los "picos" de un espectro Auger no hemos entrado en más detalles. Seguimos en este capítulo con la "picología". La finalidad es dar al lector la oportunidad de entender un poco más el procedimiento que seguiría un investigador para extraer información de las gráficas de Auger.

LOS ELECTRONES AUGER

En el efecto Auger (figura 14) la energía del proceso de desexcitación no se emite en forma de radiación sino que se transfiere a otro electrón que sale del átomo y se denomina electrón Auger. Como las transferencias de energía se hicieron entre niveles electrónicos bien definidos, los electrones Auger llevan información de los niveles energéticos. Si se toma en cuenta que los niveles energéticos electrónicos son una impronta, una huella digital de los elementos, se podrá imaginar cuál es el proceso por el que se identifican los elementos mediante electrones Auger.

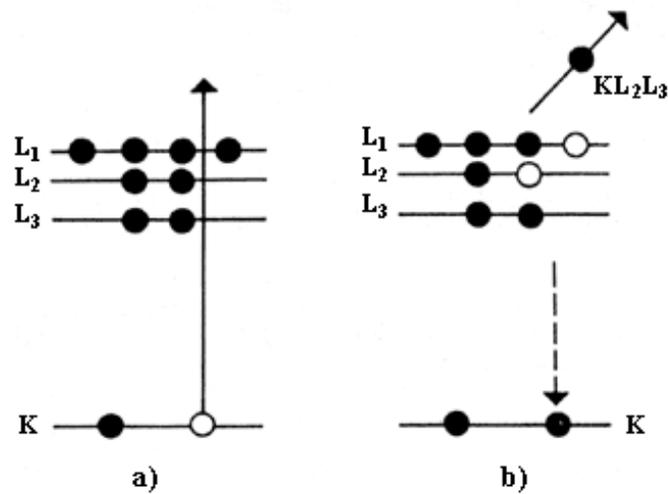


Figura 14. Ilustración del proceso Auger: (a) átomo ionizado en un electrón de la capa K; (b) decaimiento de átomo al estado base al ocupar, un electrón de energía mayor, el hueco de la capa K, emitiendo al mismo tiempo un electrón Auger KL_2L_3 .

Faltaría saber la frecuencia con que se producen los electrones Auger. Esta pregunta ya ha sido ampliamente contestada. De todos los procesos que pueden darse al ionizar átomos bombardeándolos con electrones, el efecto Auger es el dominante: el 95% de las ionizaciones conduce al estado de un átomo doblemente ionizado y un electrón Auger.

SENSIBILIDAD A LA SUPERFICIE

El electrón Auger se mueve por el sólido y pronto pierde su energía al chocar con los demás electrones que sí se mantienen ligados a sus átomos. Si el electrón ha sido producido cerca de la superficie puede escapar con una pérdida de energía pequeña o nula y ser detectado por un espectrómetro que mida su energía. Son entonces dos los efectos que hacen que los electrones Auger lleven información principalmente de los átomos de la superficie: en primer lugar es más fácil que salgan a la superficie los electrones Auger producidos cerca de ella y, en segundo, los electrones sonda no penetran mucho debido a las fuertes interacciones que tienen con los electrones del medio.

LAS GRÁFICAS DE AUGER

Muchos de los electrones sonda son rebotados hacia atrás y también colectados por los espectrómetros. Las gráficas de Auger nos muestran los picos de los electrones Auger sobre un fondo dado por los electrones rebotados. Si todos los electrones Auger salieran del material sin pérdida de energía, los picos serían sumamente estrechos, pero, debido a los choques —pérdida de energía—, los picos engrosan. Las energías utilizadas para el haz de electrones sonda casi siempre se encuentran entre 5 y 10 keV (un electrón volt es la energía que adquiere un electrón al acelerarlo a través de un voltaje de 1 volt). El espectrómetro registra el número de electrones Auger que salen en cada energía. La figura 15 muestra los picos del silicio en la región de energías menores a 2 000 eV de los electrones Auger. Pueden verse los picos bien definidos alrededor de 40 eV y de 1 600 eV.

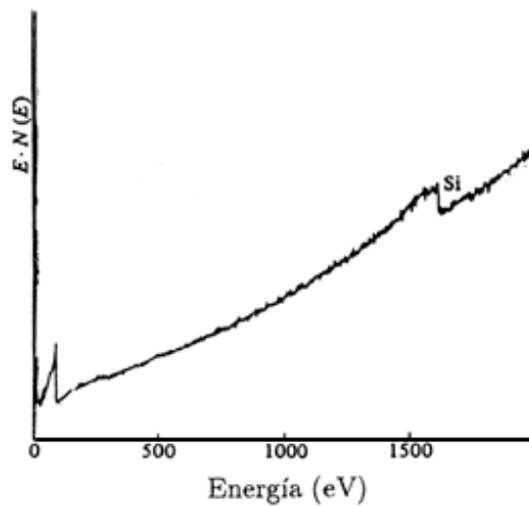


Figura 15. Número de electrones Auger multiplicados por la energía con la que salen de la superficie como función de esa energía para silicio.

Si se tuviera una muestra con elementos desconocidos en la superficie se les puede reconocer a partir de sus picos Auger. Hay catálogos completos de los picos Auger de materiales puros. La figura 16 presenta un resumen. Cada punto representa un pico Auger. En el eje horizontal se da la energía del pico y en el eje vertical el elemento. Los picos del silicio se han marcado para hacer ver la correspondencia. La figura 17 es un pequeño ejercicio que se deja al lector. Hemos dado los valores de los picos para que el lector identifique el elemento. Como se ve, los picos Auger son una impronta de los elementos.

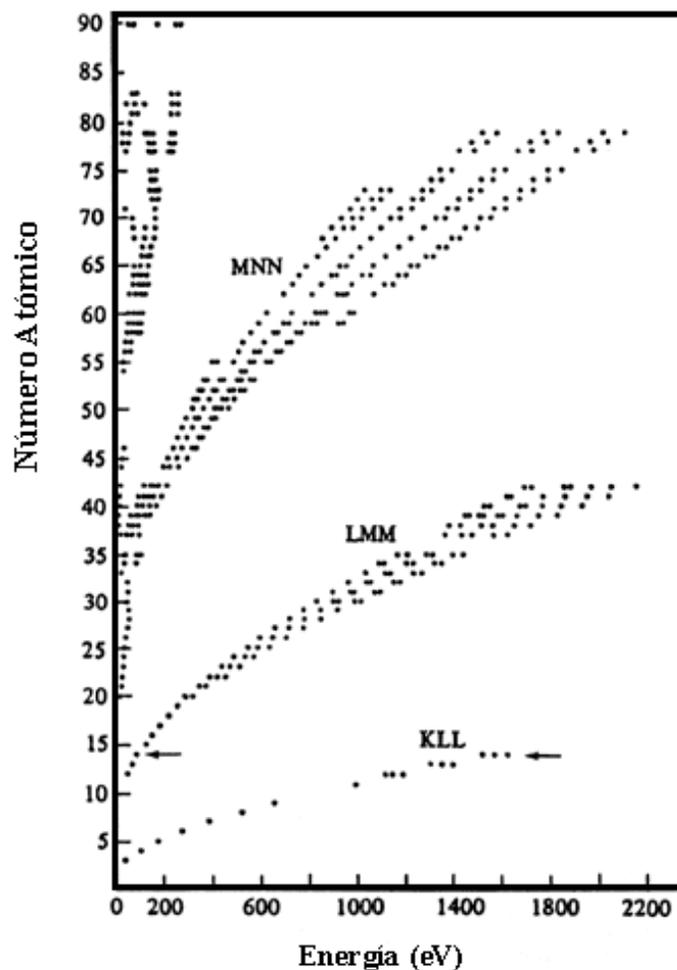


Figura 16. Energías de los principales electrones Auger emitidos por los elementos químicos. El eje

horizontal es la energía con que son emitidos y el eje vertical es el número atómico. Se marca con una flecha el caso del silicio.

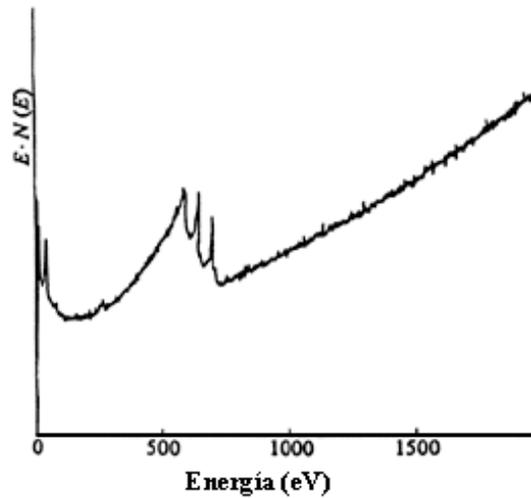


Figura 17. Número de electrones Auger multiplicados por la energía con la que salen de la superficie como función de esa energía para un elemento que se deja al lector, como ejercicio, su identificación.

LAS VARIACIONES DICEN MÁS: EL ESPECTRO DIFERENCIAL

En muchos casos los picos pueden casi desaparecer y confundirse con los picos del fondo o ruido. Como se sabe que la señal Auger (el número de electrones Auger) cae fuertemente después de pasar la energía bien definida del pico, se ha optado por graficar la rapidez con que varía la señal obtenida en el espectrómetro al cambiar la energía (para los entendidos: la derivada del número de electrones Auger respecto a la energía). Usaremos el nombre de espectro diferencial para referirnos a esta nueva cantidad. Cuando en alguna energía en el espectro Auger aparece un pico, en el espectro diferencial se verá un pico hacia abajo. Por convención se ha escogido el valor de energía donde aparece el mínimo en el espectro diferencial como la posición del pico Auger. La figura 18 muestra el espectro Auger y el espectro diferencial del boro. Puede apreciarse cómo el espectro diferencial muestra detalles que es difícil percibir en el espectro directo.

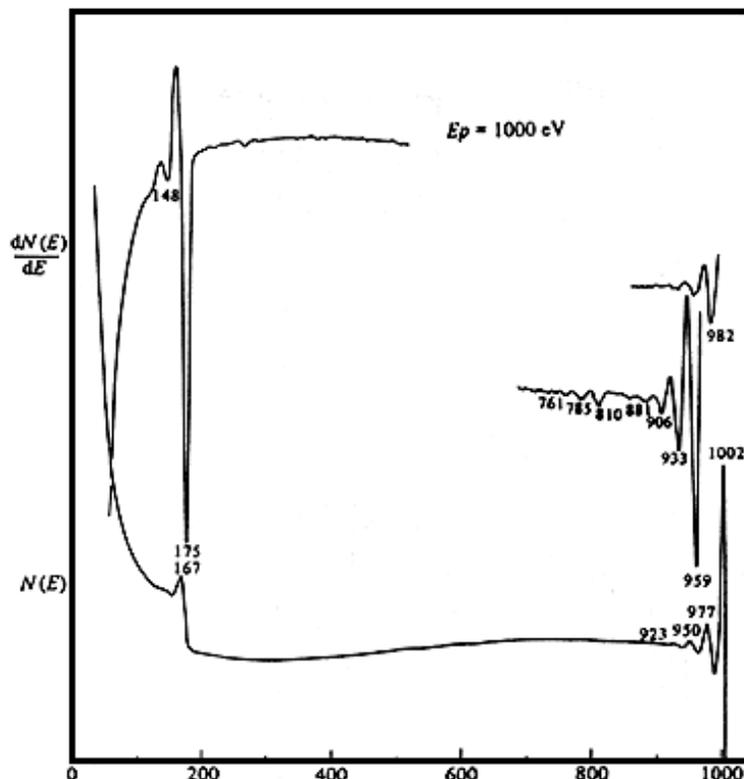


Figura 18. Espectro Auger (curva inferior) y su diferencial para el elemento boro.

En resumen, las ventajas del espectro diferencial son:

- 1) Al separarse de los picos la contribución del fondo es cero, si se exceptúan energías muy bajas.
- 2) Los picos del espectro diferencial son mucho más agudos. De esta manera los problemas de superposición se eliminan más fácilmente. Además, una vez incorporada la convención del mínimo en el espectro diferencial se tiene un punto bien reproducible en la energía.
- 3) Se pueden medir las intensidades midiendo la distancia entre mínimo y máximo en el espectro diferencial.

CONTAMINANTES SUPERFICIALES

La figura 19 contiene un estudio Auger realizado en una superficie contaminada. La gráfica superior corresponde a la superficie de una muestra de níquel como fue introducida a la cámara. Se nota la presencia de oxígeno, cloro, azufre y carbón principalmente. La señal del níquel es muy débil, lo cual indica que la superficie está recubierta por los elementos antes mencionados. La figura inferior contiene el espectro diferencial después de limpiar la superficie. En ésta se nota la presencia de una cantidad mayor de oxígeno que indica probablemente la existencia de una capa de óxido y de argón usado en la limpieza de la muestra.

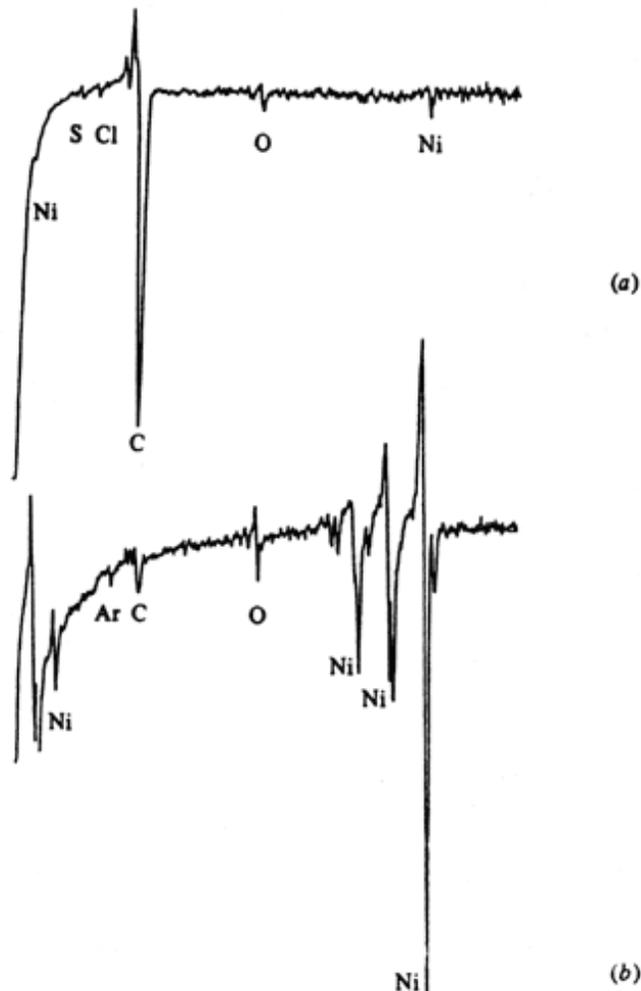


Figura 19. (a) Espectro Auger de una muestra de níquel contaminada principalmente con carbón. (b) Espectro Auger de la misma muestra después de limpiar su superficie.

ESTUDIOS EN UN CRÁTER

Otra forma de utilizar la espectroscopía Auger aplicada principalmente en el caso de películas delgadas es hacer un cráter. Primero se produce una película delgada depositando material sobre un sustrato. Luego un cráter, usando iones de argón, por ejemplo. A continuación se hace una espectroscopía Auger en las laderas del cráter a fin de analizar el perfil de concentraciones con la profundidad, hasta que se empiezan a ver los picos del material usado como sustrato.

Esta aplicación "en cráter" se hace frecuentemente. En el caso de materiales que se difunden uno en el otro se puede utilizar para saber el perfil de concentraciones, la velocidad de difusión, etc. Todos estos son datos importantes en la construcción de algunos dispositivos semiconductores.

¿SE PUEDE SABER QUÉ TANTO HAY DE UN ELEMENTO EN LA SUPERFICIE?

La gran sensibilidad de la espectroscopía Auger a la capa externa de un sólido es precisamente lo que trae como consecuencia las dificultades para relacionar las intensidades de los picos Auger a la composición de la superficie. Otras técnicas son capaces de dar una buena medida cuantitativa de las concentraciones promedio para un amplio rango de elementos. No es el caso de la AES. Sin embargo, los expertos se las han ingeniado para obtener información que puede calificarse de semicuantitativa. Siempre se tiene que tomar en cuenta que la señal observada para un elemento depende no solo de su concentración promedio sino de cómo se distribuyen los átomos de este elemento en las primeras capas de la superficie. Esto también se ha aprovechado para establecer la forma en que algunos sistemas se ordenan en la superficie.

EFFECTOS CRISTALOGRAFICOS

La concentración química en la superficie de los sólidos depende tanto de la red del sólido como de la orientación de los planos superficiales bajo estudio. Ilustremos esto con aleaciones binarias ordenantes.

Una aleación binaria con tendencia a ordenarse es un sistema en el que las dos especies químicas a bajas temperaturas ocupan lugares bien definidos, llamados subredes. Un ejemplo es la aleación CuAu en la cual en una dirección se acomodan los átomos en planos alternantes, unos ocupados sólo por átomos de oro y otros sólo por átomos de cobre.

En este caso, la señal Auger dependerá de la orientación de la superficie con respecto a esos planos bien definidos. En particular si la superficie bajo análisis coincide con los planos mencionados, los resultados del análisis Auger se verán influenciados por dos factores: primero, debido a las diferencias en la composición o densidad en los primeros planos paralelos a la superficie y, segundo, dependerá del tipo de átomos que contiene el primer plano.

EFFECTOS QUÍMICOS

Como se puede sospechar de todo lo que se ha dicho hasta el momento acerca de la AES, su uso primario es la identificación de los elementos presentes en la superficie. Pero no es la única posibilidad. Muchos picos llevan información del estado químico de la superficie. O mejor, llevan información del estado químico de los elementos que se encuentran en la superficie. Esto quiere decir que es posible distinguir si un elemento dado se encuentra como especie pura o formando algún compuesto.

Habitualmente se prefiere la XPS como técnica para indagar el estado químico de la superficie, ya que los picos de fotoelectrones son más angostos y definidos y los efectos químicos se pueden interpretar más fácilmente que en el caso de los correspondientes picos Auger. Quedan, con todo, muchas situaciones en las que los espectros Auger pueden proporcionar información química útil.

La forma en que un efecto químico (un elemento formando un compuesto) se hace notar es cambiando la forma del pico, produciendo un corrimiento del valor de la energía en que se producía o, como en muchísimas situaciones, con ambos: cambio de forma y corrimiento.

Un ejemplo es el caso del silicio, que mostramos en la figura 20. Los picos del silicio puro en dos regiones diferentes de energía se muestran en la parte superior de la figura. En los dos niveles siguientes se muestran los picos producidos por los compuestos SiO_2 y un nitruro. Los valores de las energías se muestran explícitamente, el corrimiento es bastante claro, y el cambio de forma es evidente.

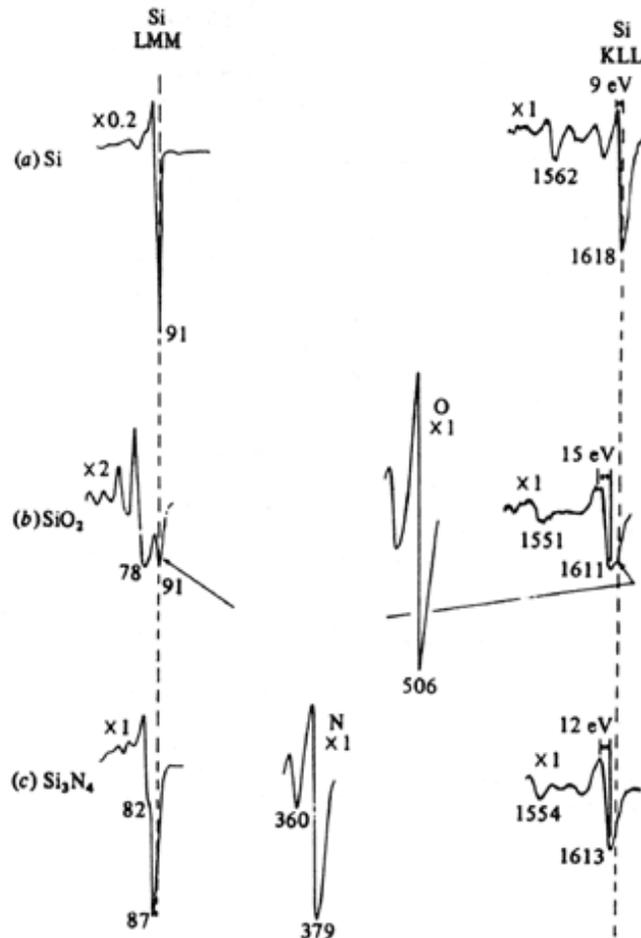


Figura 20. Corrimientos químicos en el espectro del silicio. (a) Silicio puro. (b) Espectro Auger del compuesto SiO_2 . (c) Espectro Auger del compuesto Si_3N_4 .

Pudiera quedar la duda de que lo que se está viendo es una superposición de los picos de estos diferentes elementos. Por ejemplo, que se hubieran encimado los picos del oxígeno con los del silicio. Para acabar de salir de dudas se muestran los picos de los elementos puros, oxígeno y nitrógeno. Como se ve no hay oportunidad de que influyan en la región observada, y no hay más que concluir que los electrones Auger, provenientes del silicio, han cambiado su estado debido a que ahora los átomos de silicio no se enlazan a otros átomos de silicio, sino a átomos de otro elemento. Es decir, nos hablan de un nuevo estado químico del silicio.

No es difícil sospechar que con los compuestos se hace algo análogo a lo que ya dijimos se hace con los elementos puros. Se coleccionan los espectros como "huellas digitales" del compuesto y así, en caso de que se nos presenten en algún espectro Auger, podremos identificar rápidamente el compuesto. Lo mejor es guardar los hechos característicos en una computadora a la que daremos a analizar cada nuevo espectro para una posible identificación.

El cambio de forma y el corrimiento de los picos Auger se produce también al reacomodarse los electrones de un elemento cuando se pasa de una forma alotrópica a otra [forma alotrópica: diferentes maneras en que se puede presentar un elemento. En el elemento al que queremos referirnos, el carbón, las dos formas alotrópicas de interés en este momento son: el grafito y el diamante]. Tal es el caso del ejemplo que se presentó en la figura 5, del capítulo III. En ese caso se presentan tres espectros Auger: uno del carburo que se forma entre carbón depositado y sustrato, otro del grafito que se tiene al engrosar la capa, y finalmente, uno de diamante. En este caso los dos últimos espectros se han corrido debido al cambio de una forma alotrópica, —grafito— a la otra —diamante—. Esto requirió de un cambio en el estado electrónico de los átomos.

La espectroscopía Auger puede usarse de múltiples maneras, esto siempre tomando en cuenta que no hay técnica que pueda resolver todos los problemas, y que antes de lanzarse a utilizar cualquiera hay que saber lo más posible de la muestra que se desea estudiar o tratar. Hay que considerar que cada vez que se quiere usar una técnica de tecnología avanzada, se produce un gasto fuerte. Si se aplica inadecuadamente el Auger a un sistema, pueden obtenerse resultados desastrosos además de haber desperdiciado recursos.

La investigación más simple requeriría de una serie de análisis puntuales a partir de áreas de interés seleccionadas de una imagen producida con microscopio electrónico de barrido (antes puede uno haberse ayudado de microscopía óptica). La contaminación superficial puede irse eliminando con haces de iones ligeros. La finalidad de esta investigación sería saber cuáles elementos están sólo en la superficie y cuáles persisten en la región cercana a ella. Un estudio más detallado podría comprender la identificación de elementos de interés y la determinación de su distribución espacial sobre la superficie, usando algún procedimiento de barrido. Si se necesita el perfil a profundidad, se debe determinar primero los elementos de interés y registrar la intensidad Auger a medida que se erosiona la superficie. O producir un cráter como el de la figura 21 y analizar sus "laderas".

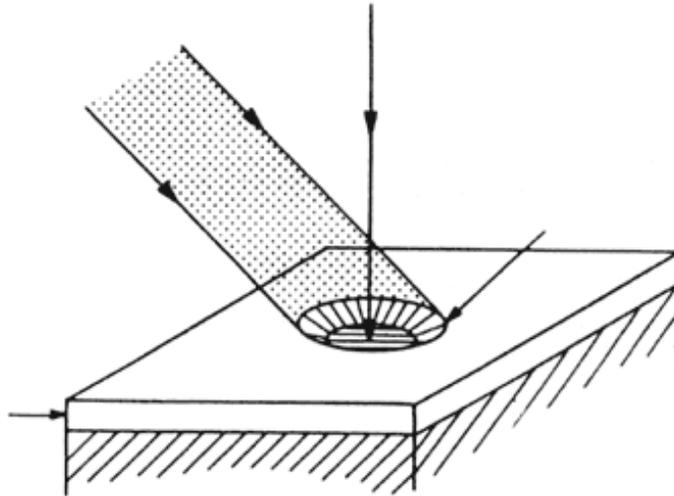


Figura 21. Diagrama esquemático que ilustra el uso de un haz de iones para obtener el perfil de composición a través de una película delgada por medio de la espectroscopía Auger.

Si por ejemplo se quiere saber si la contaminación superficial de una muestra penetra mucho en ella, una investigación que se puede realizar es el análisis Auger al mismo tiempo que se bombardea la muestra con iones para ir penetrando cada vez más, hasta que los picos del contaminante desaparecen. En algunos casos la profundidad alcanzada por el contaminante es de 10 nanómetros.



XIII. DIFRACCIÓN DE LOS ELECTRONES DE BAJA ENERGÍA

LEED: LA HISTORIA COMO HUBIERA SIDO O COMO ES FÁCIL IMAGINÁRSELA

LA HISTORIA de la Difracción de electrones de baja energía o LEED (*Low Energy Electron Diffraction*) se remonta a las épocas en las que se empezaba a comprender la dualidad onda-partícula de entidades como el electrón. Si el electrón tuviera comportamiento ondulatorio entonces podría ser difractado. La teoría vino a poner esto claramente de manifiesto como consecuencia de la mecánica ondulatoria (1924) de Louis de Broglie, que extendía la dualidad onda-partícula que Einstein había descubierto para el caso de los fotones y que hacia los años veinte estaba bien establecida lo mismo que el efecto fotoeléctrico, en el que los fotones arrancan electrones; la difracción de rayos X por parte de los cristales había sido experimentalmente demostrada desde 1912. Los trabajos de Bragg acerca de la aplicación de la difracción de rayos X en la cristalografía tenían más de diez años.

Realmente la historia del LEED se encuentra enraizada en una época grandiosa de la física. Los haces electrónicos habían sido logrados en el laboratorio desde los últimos años del siglo pasado. Si efectivamente De Broglie tenía razón y electrones con diferentes energías tenían diferentes longitudes de onda, todo lo que se necesitaba era calcular la energía necesaria para que la longitud de onda fuera de las dimensiones de la distancia entre planos cristalinos. Resultaba que la energía necesaria para los electrones debía ser del orden de 100 eV. La receta, como se ha contado aquí, terminaría diciendo "aplíquese entonces un haz de electrones de 100 eV a un cristal y obsérvese la difracción producida".

Pero no, la historia no fue como se ha contado en el párrafo anterior. Como ha pasado muchas veces en la historia de la ciencia, el descubrimiento de la difracción de electrones por parte de un cristal fue un accidente.

LEED: LA HISTORIA, APROXIMADAMENTE COMO PASÓ

Davisson y Germer trabajaban en los Laboratorios Bell con una muestra de níquel policristalino. Esto quiere decir que no se trataba de una muestra con sus planos bien ordenaditos sino que sería tanto como tener muchos pequeños cristales. Así, donde termina la superficie no se tiene una superficie única. Al estar calentando la muestra, la cámara de vidrio tronó, dejando entrar la atmósfera a la región de vacío. Rápidamente el níquel se contaminó con oxígeno, formándose óxidos en su superficie. Después de conseguir una nueva campana de vacío, procedieron a limpiar la muestra calentándola en una atmósfera de hidrógeno, proceso llamado de reducción. Pues bien, el proceso impuesto a la muestra, con una fuerte oxidación seguida de la reducción, produjo una extensa recristalización de manera que la muestra presentaba una superficie bien ordenada, simulando un monocristal. Si previamente Davisson y Germer creían que la dependencia angular del esparcimiento electrónico se debía a efectos intra-atómicos, al llevar a cabo la experiencia con la "nueva" muestra, se dieron cuenta de que los efectos eran debidos al orden cristalino.

La historia sigue. Los grandes se juntan en Oxford en 1926. Se levanta Max Born y deja sorprendido a Davisson al señalar que unos experimentos que éste había realizado previamente tenían que ver con la mecánica ondulatoria. Davisson y Germer se lanzan a trabajar para comprobar la aseveración de Born y establecer si en verdad los electrones cumplían la relación entre longitud de onda y cantidad de movimiento establecida por De Broglie. Publican sus resultados en 1927 tanto en la revista inglesa *Nature* como en la estadounidense *The Physical Review*.

En la reunión de Oxford también estaba Thomson, quien se unió a la búsqueda de las propiedades ondulatorias del electrón e inmediatamente se puso a trabajar en la dirección marcada por Max Born: modificó, con la ayuda de A. Reid, su instrumentación de forma que pudiera producir haces de electrones, que por otra parte tenían más energía que los que usaban Davisson y Germer. Thomson y Reid publicaron su artículo, donde mostraban pruebas experimentales de la naturaleza ondulatoria del electrón, en *Nature*, sólo que salió un mes más tarde que el artículo de Davisson y Germer. Diez años después Thomson y Davisson compartieron el premio Nobel.

COMO LOS RAYOS X PERO EN SUPERFICIES

Como se mencionó más arriba, desde 1912 Bragg había desarrollado sus trabajos para lograr la aplicación de la difracción de rayos X a la cristalografía. En el caso de electrones de baja energía, lo que se hace en las superficies es análogo a lo que hacen los rayos X en la cristalografía de tres dimensiones. Esto suena a la receta del oso *à la Orange*: se mata el oso y se prepara como el pato *à la orange*. Lo que queremos decir es que los principios

envueltos son los mismos. Al difractarse los rayos X o los electrones en un sistema ordenado se obtienen familias de puntos brillantes llamadas patrones de difracción. Se conoce en la actualidad qué estructuras producirían qué patrones de difracción. De esta manera es posible saber, a partir del patrón de difracción, cuál es la estructura de la superficie. En la figura 22 se muestran los patrones de difracción que se obtienen al hacer incidir electrones de baja energía en la dirección normal a la superficie (111) de platino. Como puede verse de estos patrones de difracción, esta superficie tiene una geometría hexagonal. Las cuatro figuras corresponden a diferentes valores de la energía incidente de los electrones. Se puede demostrar de forma sencilla que entre mayor sea la energía de los electrones, más cercanos a la normal estarán los puntos brillantes.

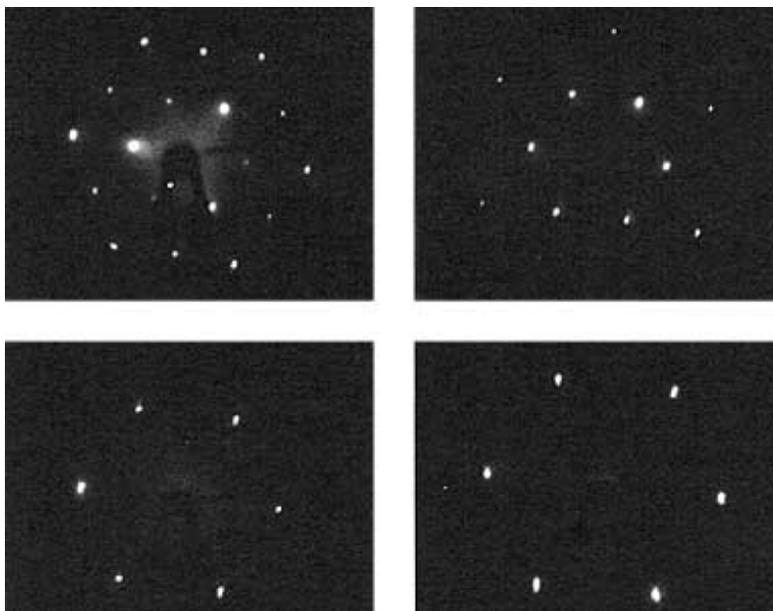
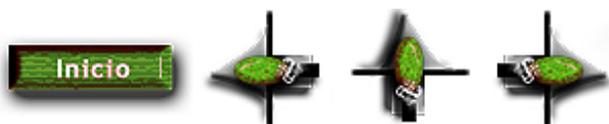


Figura 22. Fotografías de patrones de difracción de electrones de baja energía en la superficie (111) de platino. Las fotografías corresponden a diferentes energías de los electrones. (Cortesía de G. Somorjai y M. Van Hove).

Sin embargo, la difracción producida por una superficie puede proporcionar mucho más información. Es posible, por ejemplo, conocer si la superficie está escalonada, si hay defectos estructurales, cómo están las terrazas, si hay reconstrucción; etcétera.

Se puede aplicar la difracción de electrones de baja energía en combinación con un espectrómetro Auger, lo que permite conocer al mismo tiempo las características químicas de los átomos que constituyen la estructura superficial estudiada.



XIV. CONCLUSIÓN

¿EL ENCANTO DE LAS SUPERFICIES?

LA IDEA de escribir un libro como éste surgió cuando hace varios años los autores caminaban a lo largo de la playa de Copacabana en Río de Janeiro, Brasil, después de una ardua sesión del congreso al que en ese momento asistían. El tema de esa reunión era la física de superficies. Ahí se discutían problemas de superficies que nos parecían complejos. El estudio de las propiedades magnéticas, las propiedades ópticas, las propiedades químicas, etc., de esa región tan particular de los sólidos y los líquidos, así como la preparación de muestras y el desarrollo de técnicas especiales capaces de obtener información de las superficies, mantenían ocupados a muchos investigadores en el mundo. Ahí se habían dado cita los expertos, principalmente latinoamericanos, para discutir los últimos avances.

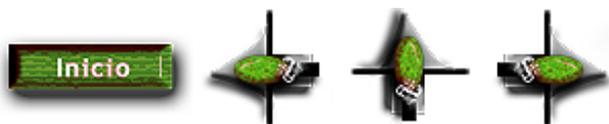
Tras comentar lo que ese día habíamos aprendido (?), y ante la belleza natural de esa lindísima playa, nos dimos cuenta de que había superficies (y fenómenos que ocurren en ellas) mucho más complejas y más interesantes que estudiar. El aceite de coco usado para la protección de la piel de los bañistas contra la radiación ultravioleta nos hizo reflexionar sobre esos fenómenos que tienen lugar en la vida diaria y que se relacionan, aunque no en forma obvia, con lo que nosotros investigamos.

Bajo el calor abrazador del sol tropical y el estímulo de un par de "Antárticas" bien frías, surgieron una serie de temas, algunos de los cuales tratamos de describir en los capítulos del III al VIII. Son ejemplos de la vida diaria con los que intentamos ilustrar lo interesante y complejo de los fenómenos que se dan en ese lugar llamado superficie y cómo la investigación básica puede ayudar a entenderlos. Intentando una mayor claridad, nos hemos valido del fantástico universo de García Márquez, espacio en el que los fenómenos superficiales son tan nítidos como profundos.

Los ejemplos mencionados muestran también la importancia tecnológica que tienen los procesos superficiales, motor que mueve la gran actividad científica en la fisicoquímica de superficies.

La discusión de algunas de las técnicas usadas en el estudio de las superficies ha sido principalmente cualitativa. Esperamos no haber caído en el error tan típico del investigador científico (muchas veces inevitable) de confundir al lector con fórmulas complejas. Sin embargo, en la bibliografía se citan obras que puede consultar quien se quiera adentrar en esta particular rama de la ciencia.

Esperamos que el lector que haya tenido la paciencia de llegar hasta estas líneas se convenza de que *las superficies tienen un cierto encanto*.



BIBLIOGRAFÍA

Realmente son tantas las fuentes que han influido en este libro y con las que estamos en deuda que es imposible nombrarlas todas. En algunos casos una parte del libro se ha desprendido de una nota de periódico, en otras ocasiones la influencia, en forma más natural, ha venido de los libros especializados en las superficies y las revistas así como los libros de divulgación han desempeñado también un papel en la forma que el libro ha tomado al final.

Muchas personas han influido de una u otra forma en el libro. Ya se mencionó en la Introducción que buena parte del libro se escribió en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste. Durante la labor desarrollada en Trieste hubo muchas cosas que afectaron al libro. En especial varias coincidencias importantes, de las que cabría mencionar dos: el Taller de Aplicaciones de la Radiación de Sincrotrón que tuvo lugar en el Centro, en mayo de 1990 y el hecho de que un científico de Singapur, Kim Ong, compartiera, en el propio Centro, el cuarto con uno de los autores y dedicara su estancia en Trieste a trabajar en el problema de fundido superficial. Aunque los autores habían trabajado en temas aledaños al fundido superficial, no hay como escuchar de un especialista, cuál es el estado de un tema particular.

Mencionaremos sólo algunas de las fuentes, las que consideramos más importantes y que creemos beneficiarían más a los lectores.

M. A. Van Hove, W. H. Weinberg, C.-M Chan, *Low-Energy Electron Diffraction: Experiment, Theory, and Surface Structure Determination*. Springer Series in Surface Sciences 6, Springer-Verlag, Berlín, 1986.

Se trata de un amplio tratado (603 páginas) sobre el tema en el que los autores efectivamente tratan todos los aspectos del LEED. No es necesario, pero subrayamos que los autores van a la cabeza en el desarrollo de la ciencia de superficies. Este libro es realmente "la biblia" del LEED. Aunque el volumen de Van Hove y compañía está dirigido a especialistas, hay partes sumamente accesibles. Un especialista o alguien que quiera empezar en el campo (y con el tiempo convertirse en especialista) encontrará múltiples herramientas. Cada uno de los once capítulos del libro cuenta con un buen número de referencias hasta totalizar más de 600. Además el libro incluye una guía a la bibliografía y una lista de más de 130 superficies, tanto de materiales puros como compuestos, acompañando cada una de ellas con las referencias donde se puede encontrar información específica. Aunque en nuestro libro hemos pasado de soslayo al LEED, creemos que no era posible dejar de mencionar esta obra mayor. Nuestra lista de técnicas de superficie agrega sólo unas cuantas a la lista de acrónimos de técnicas de superficie dada por Van Hove.

J. M. Walls, editor, *Methods of Surface Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

Varios especialistas en técnicas de superficies contribuyen en este volumen. El tratamiento de la espectroscopía Auger es excelente, aunque incompleto en algunos aspectos. Varias de nuestras figuras vienen del capítulo escrito por H. E. Bishop, una persona que ha contribuido grandemente a la comprensión de la AES. El capítulo acerca de XPS por A. B. Christie, también ha sido particularmente importante para nosotros. Cabe subrayar el aire didáctico que tiene todo el libro y que efectivamente hace comprensibles las técnicas de superficies. Hay una tendencia a presentarlas como algo acabado, como un aparato que basta comprar para luego aplicar sus técnicas a problemas de materiales. Así, se habla del RBS como algo que tiene el defecto de no ser comercialmente accesible.

R. Vanselow y R. F. Howe, editores, *Chemistry and Physics of Solid Surfaces*, varios volúmenes. De entre ellos destacamos el Volumen VI, Springer-Verlag, 1986.

El capítulo 16 del volumen VI de esta colección, dedicada íntegramente a las superficies de materiales sólidos, se refiere al problema del fundido superficial.

J. F. van der Veen, B. Pluis, A. W. Denier van der Gon, *Surface Melting*.

Esta es una revisión del estado de cosas que guardaba la investigación en el problema de fundido superficial hasta la fecha de la publicación (1986). Realmente para especialistas. Se trata de explicar por que hay superficies que se

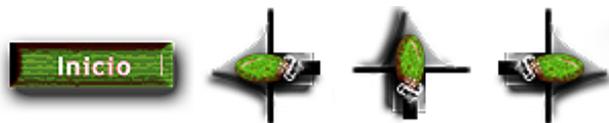
funden antes que el bulto. O dicho de otro modo, trata de contestar cuándo la transición de fundido es de bulto y cuándo es de superficie. Incluye una tabla en la que se señala, para un buen número de elementos puros, cuándo habrá fundido superficial. Este grupo holandés ha dedicado un gran esfuerzo a entender el fenómeno. Sus trabajos han sido realizados principalmente para las superficies del plomo y del aluminio.

D. P. Woodruff y T. A. Delchar, *Modern Techniques of Surface Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

Escrito con gran coherencia, se trata de un libro para especialistas, pero muchas partes son accesibles. Es el libro del que más nos hemos servido. No tiene un aire tan pedagógico como el editado por Walls, pero está escrito con gran claridad y es muy completo. Además, a diferencia del libro de Walls, no está tan orientado al estudio de los materiales. El enfoque es que la superficie es lo más importante. La forma en que clasifica los métodos experimentales es muy interesante. Trata ampliamente las espectroscopías de función de trabajo.

B. Kolb y I. Q. Whishaw, *Fundamentals of Human Neuropsychology*, 2a. edición, W. H. Freeman, Nueva York, 1985.

En búsqueda de un libro que hablara de cuáles son los transductores, y entre qué tipos de señales se encuentran, dimos con éste que utiliza precisamente ese lenguaje. Podemos hablar sólo de la parte que se refiere al proceso de captación de señales. No disponemos de puntos de comparación, pero nos pareció un libro claro y al hojear rápidamente las otras partes del libro, la impresión obtenida fue de buena organización.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 2000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



CONTRAPORTADA

Una caricia, la aspereza de una prenda, los brillos de una gema, la pesada gota de lluvia que rueda lentamente por la mejilla de Jaromik Hladik, etcétera, son fenómenos que se dan en una región reducida del espacio llamada superficie. Sin embargo, el desarrollo reciente de técnicas experimentales capaces de obtener información sobre las propiedades de las fronteras donde terminan los sólidos y los líquidos ha permitido el entendimiento de algunas propiedades de las superficies.

En lenguaje sencillo los autores analizan algunos temas surgidos de la vida diaria que ilustran el rico y complejo mundo del lugar llamado superficie. Los ejemplos que presentan cumplen también el objetivo de mostrar la importancia tecnológica que tienen los procesos superficiales. El libro se enriquece con citas tomadas de la literatura, dentro de las cuales el maravilloso universo de Gabriel García Márquez ocupa un lugar preponderante.

Sin recurrir a complicadas fórmulas matemáticas, los autores abordan con claridad algunas técnicas experimentales que permiten obtener información sobre la composición química de la superficie, la forma geométrica en que están organizados sus átomos, qué clase de moléculas se pegan a ella, etcétera.

Francisco Mejía Lira obtuvo el grado de físico en la Escuela de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Los estudios de posgrado, maestría y doctorado, los realizó en el Departamento de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Autor de múltiples artículos en el área de la ciencia de superficies y editor de libros especializados en el tema. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Miembro asociado del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia. Investigador del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Falleció el 19 de septiembre de 1991.

José Luis Morán López es doctor en ciencias por la Universidad Libre de Berlín. Sus investigaciones en el área de física de superficies le han valido el reconocimiento nacional e internacional. Ha recibido el Premio Nacional de Ciencias Exactas de la Academia de la Investigación Científica, el Premio Manuel Noriega Morales de la OEA y el Premio C.V. Raman del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, Italia, del que es miembro asociado. Fue presidente fundador de la Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío, es miembro correspondiente de la Academia de ciencias del Tercer Mundo e investigador del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Inicio

