

40 años viendo átomos

Agustina Asenjo, José Miguel García-Martín, Pedro A. Serena

La invención del microscopio de efecto túnel hace cuatro décadas marcó un cambio conceptual en la exploración de las superficies, facilitando la llegada de la nanotecnología. En esta revolución, la comunidad científica española tuvo un especial protagonismo.

Con motivo del 40.^º aniversario de la invención del microscopio de efecto túnel, acaecido en 2021, se muestra la importancia presente y futura de esta técnica y de las microscopías de sonda de barrido, la decisiva contribución de la comunidad científica española a su desarrollo y el papel desempeñado por José María Gómez Rodríguez y Juan José Sáenz Gutiérrez, profesores de la Universidad Autónoma de Madrid, desafortunadamente fallecidos en 2020.

1. Introducción

En 2021 se cumplieron 40 años de la invención del microscopio de efecto túnel (STM, *scanning tunneling microscope*), la primera herramienta que permitió ver átomos de una manera relativamente fácil y rutinaria. Demócrito (siglos v-iv a. C.) ya había desarrollado una teoría atómica de la realidad, pero tuvimos que esperar hasta la segunda mitad del siglo xx para visualizar esas entidades que él creía infinitamente pequeñas e indivisibles (hoy sabemos que no es así). Más recientemente, R. Feynman, en su visionaria conferencia en Caltech en diciembre de 1959 “Hay mucho espacio ahí abajo: una invitación para entrar en un nuevo campo de la física” [1], señaló otro reto: manipular átomos. Como veremos, el STM también ha permitido llevar a cabo esa manipulación átomo a átomo. Por todo ello, el STM que G. Binnig y H. Rohrer, investigadores del laboratorio de IBM en Zúrich (Suiza), dieron a conocer en 1981 supuso una auténtica revolución, y no es de extrañar que en 1986, sólo cinco años después, les otorgaran el Premio Nobel de Física, curiosamente compartido con E. Ruska, que unos cincuenta años antes (sí, en la década de los años treinta!) había inventado el microscopio electrónico de transmisión (TEM, *transmission electron microscope*).

España es uno de los países donde el STM y toda la familia de microscopías afines han tenido más calado, lo que se manifiesta tanto en el número de investigaciones que emplean estas técnicas como en su alta calidad. Sin duda, esto se debe a que hubo quienes se interesaron desde el principio por este equipamiento: Nicolás García y Arturo M. Baró, entonces profesores de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Arturo hizo una estancia en IBM Zúrich y Nicolás consiguió que el segundo STM del mundo viniera a España. Posteriormente, una *spin-off* de la UAM, Nanotec Electrónica SL, comercializó sus propios equipos con notable repercusión internacional.

Todo esto se cuenta en el documental *40 años viendo átomos*, codirigido por los autores de este artículo y disponible en el canal CSIC Divulga¹. Esta obra también rinde homenaje a dos personas, lamentablemente fallecidas de forma temprana en 2020, que trabajaron en estos temas: Juan José Sáenz Gutiérrez y Jose María Gómez Rodríguez, respectivamente conocidos como “Mole” y “Chema” en su entorno académico, y a cuyas contribuciones también nos referiremos.

2. La invención del STM

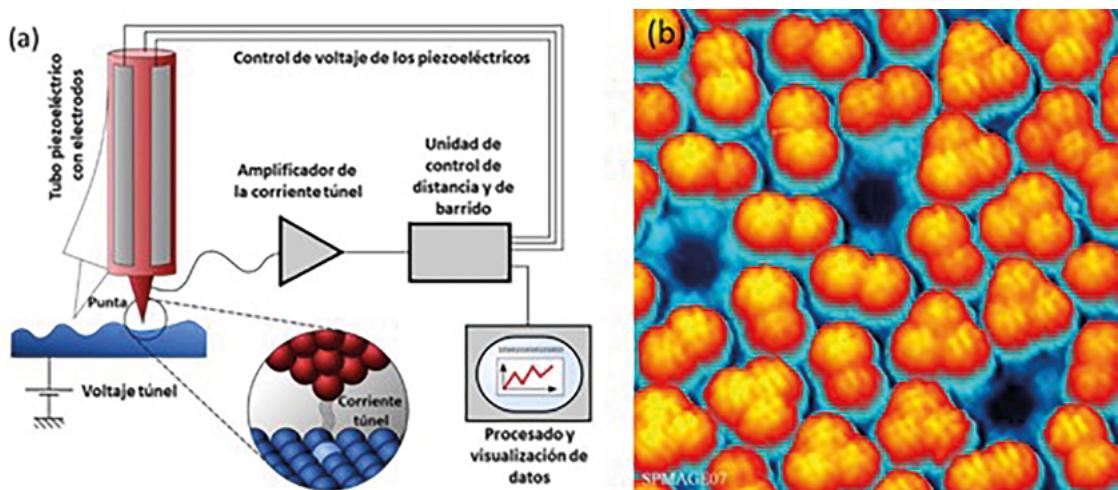
Las superficies han sido objeto de estudio tanto por su interés fundamental como tecnológico. La microscopía óptica (MO) lideró este estudio desde el siglo xvii hasta la llegada de las técnicas de microscopía electrónica (ME) basadas en el control y uso de haces de electrones. En ambas técnicas, unas sondas (fotones o electrones) emitidas desde una fuente lejana son guiadas hasta la superficie de la muestra, con la que interaccionan para ser reflejadas o transmitidas, provocando eventualmente la emisión de otras partículas. Los haces reflejados o transmitidos, así como las partículas generadas, son recogidos por el ojo humano en el caso de la MO o por sofisticados detectores en la ME, facilitando la reconstrucción de la topografía de las muestras.

Durante dos tercios del siglo xx, el TEM, inventado por E. Ruska y M. Knoll a principios de la década de 1930, junto con el STEM (*scanning transmission electron microscope*), inventado poco tiempo después por M. von Ardenne, fueron protagonistas de la exploración de las superficies. Además, en las últimas décadas las técnicas de ME han mejorado considerablemente gracias a la incorporación de sistemas de corrección de aberración. En paralelo, la MO también ha experimentado grandes avances al rebasar el límite de resolución óptica.

La carrera por alcanzar la resolución atómica de las superficies exploradas ha sido un sueño perseguido por la comunidad científica desde que se tiene certeza de la existencia de los átomos. En la segunda mitad del siglo xx los trabajos de E. Muller y K. Baladur lograron discernir los haces de iones emitidos desde átomos individuales, gracias al microscopio de emisión de iones por efecto campo (FIM, *field ion microscope*).

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=pJ0MtKqTOco>

Fig. 1. (a) Esquema de un STM (autores: M. Schmid y G. Pietrzak, adaptada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scanning_Tunneling_Microscope_schematic.svg). (b) Imagen STM de moléculas de C_{60} atrapadas en los poros de una red molecular (autor: M. Stöhr, finalista de la edición del certamen SPMAGE07).



cope). En 1969, A. V. Crewe pudo distinguir átomos individuales de especies pesadas situados sobre superficies de carbono usando el microscopio STEM.

En paralelo a estas aproximaciones “no locales” de la MO y la ME, se fueron desarrollando otras técnicas de caracterización superficial basadas en aproximaciones “locales”. Como ejemplo podemos mencionar la indentación de puntas en una superficie para caracterizar sus propiedades mecánicas o los métodos perfilométricos que capturan la topografía de las muestras. Estas técnicas locales dieron un salto gigante cuando H. Rohrer y G. Binnig idearon el STM a finales de los años 1970, con la colaboración de los técnicos C. Gerber y E. Weibel. En 1981 se tuvo un primer equipo operativo capaz de realizar la observación de átomos [2], uno de los hitos más apasionantes de la historia de la humanidad [3].

La idea que está tras el desarrollo del STM es el uso, como sonda, de una afilada punta metálica que se aproxima de manera controlada hasta una superficie conductora, entre las que se aplica una diferencia de potencial, de forma que, cuando la separación punta-muestra es de unos pocos angstroms, se establece una corriente electrónica debida al efecto túnel. La Fig. 1(a) muestra el esquema básico de un STM. La corriente túnel es muy sensible a la separación punta-muestra, por lo que se utiliza como parámetro para controlar dicha separación. El instrumento incorpora sistemas piezoelectrónicos para desplazar la punta en las tres direcciones del espacio, lo que permite que se acerque y se aleje de la superficie, y que efectue recorridos sobre la misma. Durante estos recorridos (barridos) se puede medir la corriente muestra-punta en diferentes puntos, reconstruyendo un mapa de intensidades de corrientes. Otro modo de funcionamiento, el más extendido, consiste en realizar barridos manteniendo la corriente túnel constante, variando la distancia punta-muestra de forma controlada, lo que permite capturar la topo-

grafía de la muestra, como vemos en la Fig. 1(b). Se debe mencionar que en algunos casos la interpretación de las imágenes no es trivial, porque la topología aparece mezclada con la estructura electrónica de punta y muestra.

En los años setenta varios grupos intentaron, sin éxito, estudiar propiedades cuánticas controlando simultáneamente los movimientos relativos entre objetos micrométricos y minimizando las perturbaciones mecánicas, pero fueron H. Rohrer y G. Binnig los primeros en conseguirlo. La versión original del instrumento incorporaba sistemas precisos de control de la posición de la punta y amortiguaba el ruido mecánico mediante sistemas de levitación magnética. Ese equipo, además, era capaz de operar en una campana de ultra alto vacío (UHV, de *ultra high vacuum*), lo que requería el uso de materiales compatibles con estas condiciones. El desarrollo del primer STM requirió, como suele ocurrir en ciencia, de grandes dosis de tesón, paciencia y creatividad [3].

Las primeras imágenes del STM avivaron el interés de la comunidad científica y abrieron nuevas sendas en la física de superficies. En los años 1980 se sucedieron continuos avances que fueron mejorando las prestaciones y versatilidad del STM. A finales de esa década el STM dio un paso de gigante al conseguir, por primera vez, manipular de forma individual unos pocos átomos usando la punta a modo de pinza nanométrica [4]. Esta hazaña hacía realidad el sueño de Feynman, abriendo el camino a otras formas de explorar el nanomundo e impulsando la disciplina multidisciplinar, ubicua y transversal que conocemos por nanotecnología.

3. El microscopio de fuerzas atómicas (AFM)

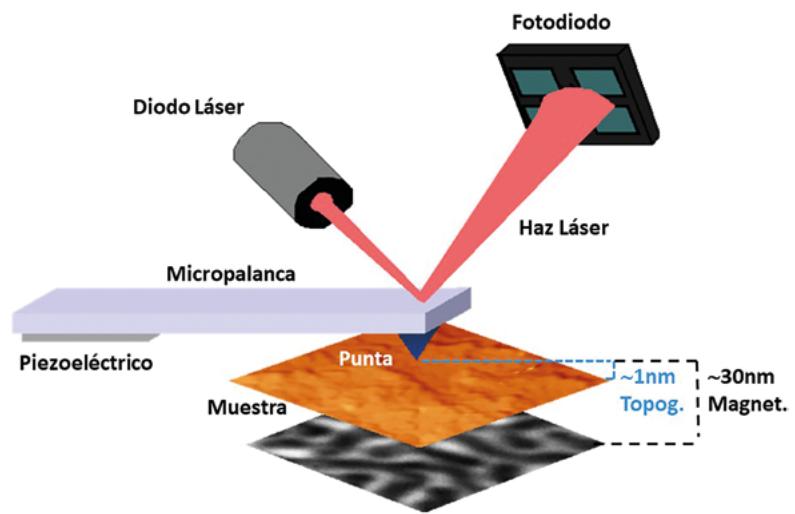
El STM tiene una limitación importante: la muestra estudiada debe permitir la conducción de corriente eléctrica, por lo que no puede emplearse con materiales aislantes. G. Binnig se empeñó en desarrollar una microscopía a escala nanométrica para estos materiales, lo que logró en 1986 con la

ayuda de C. F. Quate y C. Gerber, inventando el microscopio de fuerzas atómicas (AFM, *atomic force microscope*) [5]. En este nuevo microscopio, una punta muy afilada colocada en el extremo de una micropalanca se acerca a la superficie hasta que entra en contacto con la misma, y representando el desplazamiento en vertical en función del movimiento horizontal se obtiene un mapa topográfico en la nanoescala, donde la altura de los objetos se representa en una escala de colores. Recuerda a lo que hace una persona invidente con la punta de su bastón.

En la primera versión del AFM, el movimiento de la palanca en la dirección vertical se medía con un STM acoplado encima. Posteriormente se utilizaron diversos sistemas de medida de ese desplazamiento, como hacer que esa micropalanca fuera una de las placas de un condensador, hasta que se llegó a la configuración actual estándar: medir el desplazamiento con ayuda de un sistema óptico. Un haz láser incide sobre la micropalanca y su reflexión se focaliza en un fotodiodo, de modo que las deflexiones de aquella se traducen en señales eléctricas. Suele emplearse un fotodiodo con 4 sectores, lo que permite también medir torsiones de la micropalanca causadas por fuerzas laterales como la fricción. La Fig. 2 ilustra la configuración actual de un AFM.

Todo lo que hemos contado hasta el momento se refiere al modo originario de medida, de contacto. Sin embargo, hoy en día se utilizan habitualmente modos dinámicos, que implican un menor desgaste de la punta y además facilitan la caracterización de otras propiedades. En el modo dinámico más sencillo, la micropalanca oscila a su frecuencia de resonancia con la ayuda de un pequeño sistema piezoelectrónico. Las interacciones atractivas o repulsivas de la punta con la superficie de la muestra se manifiestan con desplazamientos de la frecuencia de resonancia hacia valores más bajos o más altos, respectivamente. Con la ayuda de un amplificador de tipo *lock-in*, se pueden medir los cambios en la amplitud y la fase de la señal de la micropalanca con respecto a los valores que tenían en ausencia de interacciones (la denominada oscilación libre).

Un ejemplo claro del potencial de los modos dinámicos es la microscopía de fuerzas magnéticas, MFM (*magnetic force microscope*), donde se utiliza una punta magnética y un doble barrido para obtener la estructura de dominios magnéticos de la muestra [6]. Previamente, la punta se imana en la dirección vertical para que haya un polo magnético bien definido en el extremo más cercano a la superficie a estudio. Luego, en el primer barrido, con la punta muy próxima a la muestra (altura promedio del orden del nanómetro), se obtiene un perfil topográfico. Para el segundo barrido, la punta se eleva una distancia fija de decenas de nanómetros (digamos 30 nm) para que la interacción



magnética sea la dominante, con la ayuda del *software* de control se repite el mismo perfil adquirido en la primera pasada —de modo que la distancia entre punta y muestra sea constante— y se miden entonces las interacciones magnéticas. Conocido el polo magnético de la punta, las interacciones atractivas y repulsivas se pueden asociar a la existencia de polos opuestos o iguales, respectivamente, en la muestra (Fig. 2).

El primer MFM surgió en 1987, siendo una de las primeras variantes del AFM. Por cierto, J. J. Sáenz, uno de los homenajeados, es coautor de uno de los artículos pioneros sobre el MFM [7]. La gran ventaja del AFM es que puede operar en condiciones ambientales, por lo que, a partir de esta técnica, surgieron muchas otras, de las que mencionamos las más comunes. Mediante métodos dinámicos multimodales donde se miden cambios en amplitud o fase a una frecuencia distinta a la utilizada para la adquisición de la topografía, se obtiene información sobre propiedades mecánicas (también puede hacerse midiendo curvas de fuerza frente a distancia, aunque a menor velocidad). Recubriendo la punta con metales y aplicando una diferencia de potencial adecuada, se pueden estudiar propiedades de transporte eléctrico (C-AFM: *conducting-AFM*), concentración y signo de portadores de carga (SCM: *scanning capacitance microscopy*), diferencias de potencial superficial (KPFM: *kelvin probe force microscopy*) y la estructura de dominios piezoelectrónicos (PFM: *piezoresponse force microscopy*). Empleando un termopar en la punta, o una película resistiva a modo de bolómetro, se puede obtener un mapa de la temperatura local y de la conductividad térmica (SThM: *scanning thermal microscopy*). Mediante diversas estrategias (una punta con un fino recubrimiento metálico, o con una partícula fluorescente en su extremo, o empleando una fibra óptica como sonda) es posible estudiar la luz reflejada o transmitida localmente por una muestra en

Fig. 2. Esquema de un AFM. Se observan las partes principales (palanca, piezoelectrónico excitador, punta, haz láser, fotodiodo), un ejemplo de una imagen de la topografía de una muestra y, debajo, el correspondiente mapa de polos magnéticos (ver explicación en el texto).

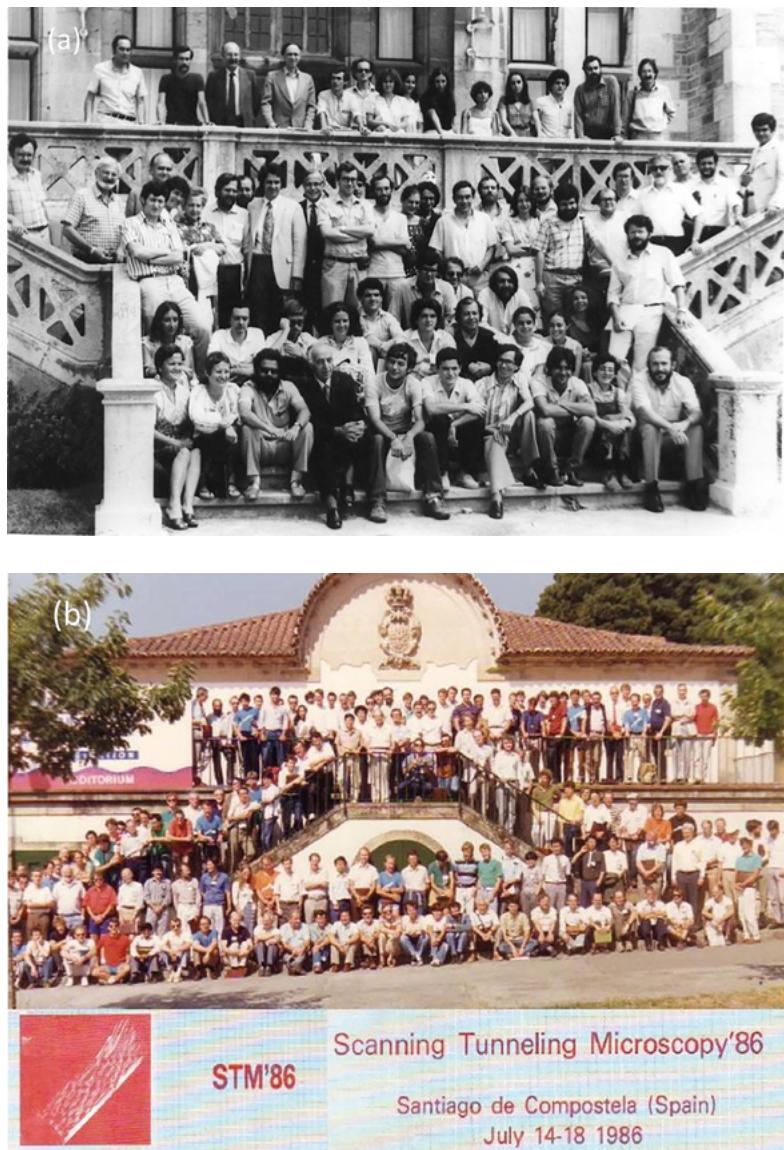


Fig. 3. (a) Escuela de verano de la UIMP celebrada en 1982 en el Palacio de la Magdalena de Santander. (b) Foto del primer congreso mundial de STM celebrado en 1986 en Santiago de Compostela.

campo cercano (SNOM: *scanning near-field optical microscopy*). Toda esta pléthora de técnicas, junto con las seminales STM y AFM, se engloban bajo el nombre genérico de microscopías de sonda de barrido (SPM, *scanning probe Microscopy*).

Además de todos estos desarrollos de gran repercusión en ciencia, el AFM ha tenido mucho impacto socioeconómico: desde su uso para control de procesos industriales hasta equipos portátiles para caracterizar materiales artísticos y museísticos que no pueden transportarse a un laboratorio. Hay versiones educacionales del tipo “móntelo usted mismo” por un precio asequible. Y como curiosidad, en 2008 el Phoenix Mars Lander de la NASA que llegó a Marte llevaba un AFM.

4. La Escuela española de SPM

4.1 Llegada del STM a la UAM y la introducción del SPM

La creación del primer laboratorio STM en la UAM fue fruto de la concurrencia de varios factores, podríamos hablar de “casualidades”, algo

que muchas veces produce grandes avances en ciencia. Por un lado, la amistad entre Nicolás García, profesor de la UAM y H. Rohrer, investigador de IBM. Por otro, la estancia de Arturo M. Baró en los laboratorios de IBM para aprender sobre la técnica, y además la celebración en 1982 del Curso de Verano de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP) “Present-day problems in the physics of solids: homage to Prof. Nicolás Cabrera” al que asiste H. Rohrer junto con muchos de los investigadores e investigadoras que serán protagonistas del desarrollo del STM en España (Fig. 3(a)).

En 1984 IBM decide donar un STM a la UAM (la primera de las cuatro copias que se realizaron del original) que es trasladado a Madrid por Rohrer y Gerber en el maletero de un coche. Tras ese viaje, más o menos accidentado y ciertamente excepcional², se instala en la UAM el primer STM de España. No es casualidad que esto ocurriese en la “joven” UAM con un profesorado altamente motivado y donde una de las líneas de investigación más reconocidas era la Física de Superficies. Como curiosidad cabe señalar que este instrumento histórico se conserva en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (MUNCYT).

La iniciativa de García y Baró atrae inmediatamente colaboraciones fruto de las cuales cristalizan distintos trabajos, entre los que cabe destacar el artículo sobre la teoría de STM firmado por N. García, C. Ocal y F. Flores [8]. Inmediatamente se crea un laboratorio (conocido coloquialmente como “La Punta”) codirigido por A. Baró y N. García, en el que R. Miranda se integra como postdoc y que cuenta con L. Vázquez, J. Gómez Herrero y J. M. Gómez Rodríguez como estudiantes. También el profesor S. Vieira se suma a estas colaboraciones y comienza a desarrollar equipos STM a temperaturas criogénicas. El empuje de los investigadores españoles, apoyados por H. Rohrer, hicieron posible que el primer congreso mundial sobre STM tuviera lugar en Santiago de Compostela en 1986 (Fig. 3(b)) [9], tres meses antes del anuncio de la concesión del Premio Nobel a H. Rohrer, G. Binnig y E. Ruska.

Los siguientes años fueron de una enorme actividad en el campo del STM y del recientemente desarrollado AFM. El entusiasmo por estas técnicas lleva a Baró y su grupo (al que se incorporó J. Colchero) a abordar el desarrollo de un AFM *made in Spain*. En torno a este desarrollo germinó la empresa de nanotecnología Nanotec Electrónica SL, que durante 16 años suministró por todo el mundo centenares de equipos de SPM junto con su software libre WSxM [10], llegando a tener una filial en Estados Unidos. La importancia de esta

² Esto se relata en el documental “Cómo el Microscopio Más Potente del Mundo acabó en España” (QuantumFracture), en <https://www.youtube.com/watch?v=J8hE0kTSj0s>

compañía para la comunidad española de microscopía fue determinante para su posicionamiento internacional, ya que permitió a muchos grupos, mal financiados en aquella época, acceder a estas sofisticadas técnicas. Además, el estilo de negocio de la empresa, con una intensa interacción con el cliente, permitió un alto grado de especialización de los grupos gracias a un modelo de innovación cooperativa.

4.2 Consolidación y repercusión de la Escuela Española de Fuerzas y Túnel

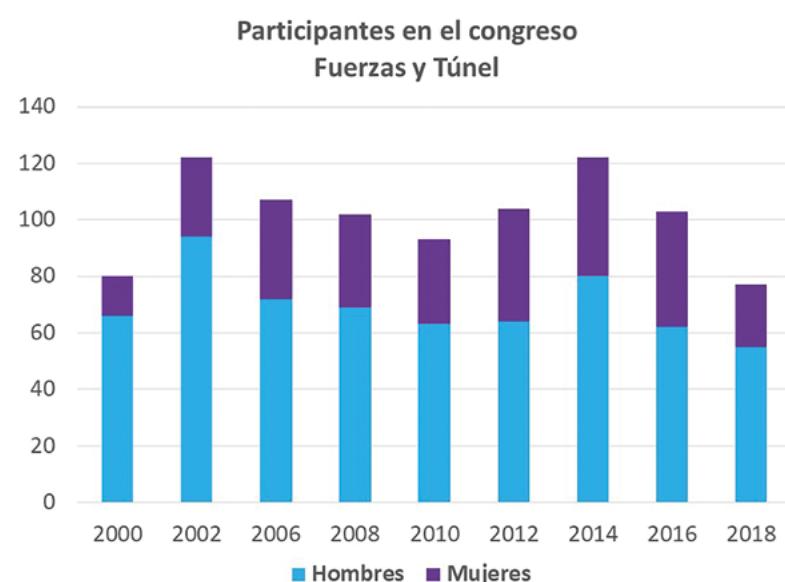
En los primeros años tras el desarrollo del STM (1981-1991), España se situó rápidamente entre los 10 primeros países en el mundo en número de artículos³, y la UAM entre los 10 centros de mayor repercusión en estas microscopías. Con el tiempo, España (y también la UAM) fueron perdiendo posiciones a nivel internacional por el auge de estas técnicas en Asia y por el descenso en la inversión en I+D sufrido en la pasada década. Hoy en día, la Academia China de Ciencias encabeza la lista de publicaciones por instituciones, y hay que resaltar que el CSIC ha conseguido situarse entre los 15 primeros puestos.

Respecto a los investigadores de más producción, los europeos, seguidos de los americanos, encabezan las listas. Entre ellos figura M. Salmerón (Universidad de Berkeley), quien formó parte inicialmente de la escuela española y por cuyo laboratorio en EE. UU. han pasado multitud de estudiantes de España en las últimas décadas. El primer investigador con afiliación española entre los 200 de mayor producción es R. Miranda.

Analizando los 10 artículos más citados encontramos el del *software* de control de Nanotec Electrónica SL [10] y entre los 200 con más citas aparecen los trabajos de C. Gómez-Navarro (UAM) [11] y de R. García (ICMM-CSIC) y R. Pérez (UAM) [12]. Entre los autores de las 500 publicaciones más citadas están N. Agrait (UAM), M. Ugeda (CSIC) e I. Brihuega (UAM). También cabe destacar a O. Custance y J. I. Pascual como embajadores de la escuela española en el mundo.

La enorme actividad de los grupos de microscopía en España a finales de los noventa hizo necesaria la creación de un espacio de encuentro donde compartir resultados, reforzar conocimientos y consolidar la Escuela Española en Fuerzas y Túnel, surgiendo las primeras jornadas sobre Microscopía (celebradas en Barcelona en 1998) que fueron el origen del congreso bianual Fuerzas y Túnel (Fig. 4) que está plenamente consolidado.

En los comienzos de la microscopía SPM, los protagonistas fueron en su mayoría hombres,



lógico si se piensa en la alta masculinización de la ciencia en esas fechas. Sin embargo, ha habido mujeres muy destacadas en el campo, como Carmen Ocal, entre las pioneras mundiales del STM, o Teresa Cuberes, que trabajó en manipulación de átomos mediante STM. En la actualidad, la mujer lucha por hacerse un hueco en este campo, como puede verse en la Fig. 4. Ejemplos de este avance son los galardones otorgados en 2021 a Miriam Jaafar, por el Club Español de Magnetismo (CEMAG) como Investigadora Emergente gracias a sus trabajos en MFM, y a Eva Cortés del Río, por el Grupo Español de Física de Estado Sólido (GEFES) de la RSEF, por el artículo destacado del año [13].

4.3 Las contribuciones científicas de José María Gómez-Rodríguez y Juan José Sáenz Gutierrez

El aniversario de la invención del STM, ha coincidido con la desaparición de J. M. Gómez-Rodríguez y J. J. Sáenz, dos excelentes personas que participaron en esos apasionantes momentos de la implantación del STM en España, cada uno desde perspectivas distintas, la experimental y la teórica.

J. M. Gómez-Rodríguez (Chema) comenzó su carrera científica bajo la supervisión de A. M. Baró, con quien realizó la tesis doctoral, siendo pionero en el uso de estas técnicas para cálculos de la dimensión fractal de las superficies [14]. Durante su etapa postdoctoral se inició en el UHV-STM con trabajos sobre la dinámica de átomos de Pb sobre la reconstrucción (7 × 7) del Si(111) [15], trabajo en el que también participó J. J. Sáenz. A su vuelta, prosiguió con el estudio de superficies de metales, semiconductores, moléculas y materiales 2D, estableciendo un laboratorio donde se han puesto a punto equipos de STM y AFM de baja temperatura y temperatura variable (Fig. 5). Sin duda alguna J. M Gómez-Rodríguez ha sido una persona clave en la implantación de la Escuela Española de

Fig. 4. Número de participantes en los congresos Fuerzas y Túnel segregado por género

³ Todos los datos mostrados en esta sección se han obtenido analizando más de 20.000 publicaciones del periodo 1981-2022 encontradas en la Web of Science que incluyen STM, SPM, AFM en su título o en las palabras clave.

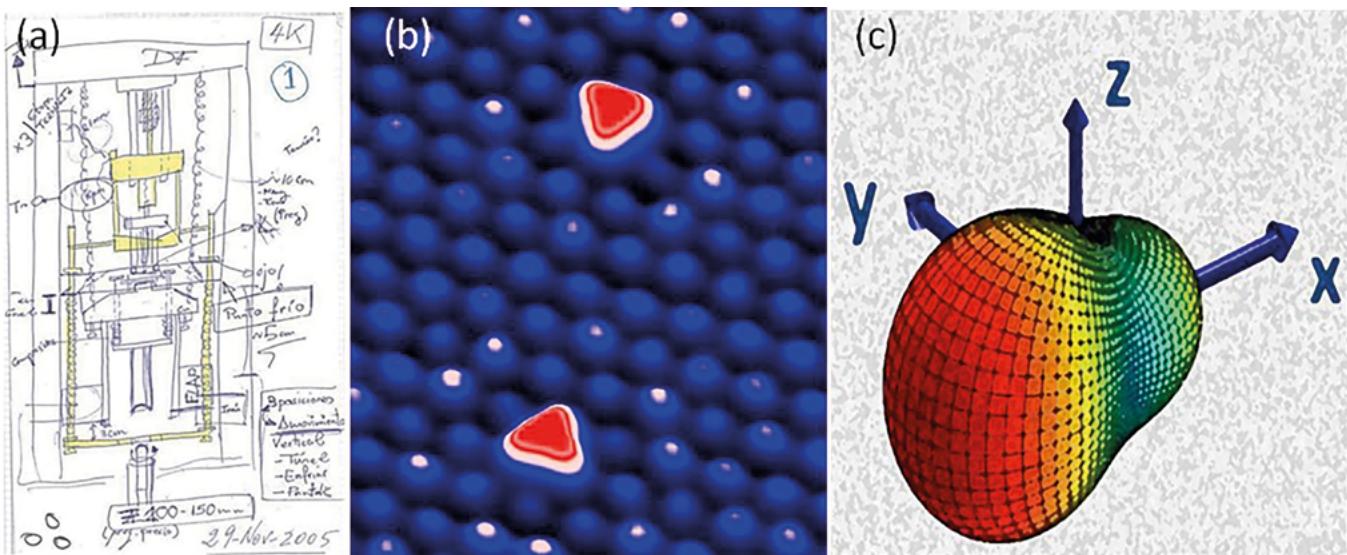


Fig. 5. (a) Esquema de un STM de baja temperatura diseñando por el grupo de J. M. Gómez-Rodríguez. (b) Imagen de STM con adátomos de Pb sobre superficie de Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) Pb, cedida por Iván Brihuega. (c) Patrón de dispersión de la radiación correspondiente al campo lejano para una nanopartícula de silicio. Imagen adaptada de [19].

Fuerzas y Túnel, participando en la creación de Nanotec Electrónica SL, desarrollando equipos de STM y AFM y formando nuevos doctores.

Por su parte, la carrera de J. J. Sáenz (Mole) ha sido muy amplia en cuanto a temática y extensamente reconocida a nivel internacional. Comenzó su carrera bajo la supervisión de N. García, abordando el desarrollo teórico del STM en colaboración con experimentales [15]. Fue autor del primer artículo sobre MFM, muy citado todavía [7], hizo incursiones en la Microscopía de Fuerzas Electrostáticas [16], en el efecto de los meniscos de agua [17] y en la importancia de los procesos histeréticos [18]. En los últimos años, se movió a la Nanofotónica con trabajos de gran impacto [19] (Fig. 5(c)). Sin duda alguna, el legado dejado por J. J. Sáenz es cuantioso y de gran repercusión.

5. El futuro

Los instrumentos para mirar lo pequeño tienen un gigantesco futuro. Siguiendo la omnipresente tendencia hacia la miniaturización, se desarrollarán SPM más y más pequeños, que podrán integrarse en diminutos sistemas junto con otras técnicas de análisis y caracterización. De forma paralela, se están dando pasos trascendentales para la determinación multimodal de diversas propiedades (eléctricas, magnéticas, ópticas, mecánicas, tribológicas, etc.), yendo mucho más allá de una completa caracterización topográfica [20]. Las técnicas SPM del futuro serán capaces de identificar de manera rutinaria cada uno de los átomos que forman una superficie e incluso discernir algunas nanoestructuras que se encuentren debajo de esta usando estrategias similares a las técnicas ecográficas.

Desde el punto de vista instrumental, otro de los retos que se deben abordar es el de la adquisición de imágenes a altas velocidades para poder acceder al estudio de procesos dinámicos en

diferentes rangos de temperaturas [21]. El SPM multimodal, de alta velocidad y operando de forma simultánea con otras técnicas, generará un ingente caudal de datos, lo que requerirá el uso de metodologías de *big data* e inteligencia artificial.

Las herramientas SPM han demostrado ser extremadamente versátiles, a la vez que tienen costes relativamente bajos, por lo que ya se han comenzado a emplear en la educación universitaria y preuniversitaria. Cuando estas herramientas comiencen a extenderse en la comunidad educativa de nuestro país, y se puedan ver átomos en el aula escolar, será más fácil que surjan nuevas generaciones de científicos y científicas que sigan la senda abierta por investigadores como Chema y Mole, auténticos aventureros del nanomundo.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado por las Direcciones de nuestros centros, la Delegación institucional del CSIC en la Comunidad de Madrid, y a todas aquellas personas que han hecho posible el vídeo *40 años viendo átomos*, en particular a Carlos Arroyo Sacristán.

Referencias

- [1] R. P. FEYNMAN, "There's Plenty of Room at the Bottom", *Engineering and Science*, 23(5), 22-36 (1960).
- [2] G. BINNIG y H. ROHRER, "Scanning Tunneling Microscopy", *Helv. Phys. Acta* 55, 726-735 (1982).
- [3] G. BINNIG y H. ROHRER, "Scanning Tunneling Microscopy from Birth to Adolescence" *Rev. Mod. Phys.* 59(3), 615-625 (1987).
- [4] D. EIGLER y E. SCHWEIZER, "Positioning Single Atoms with a Scanning Tunnelling Microscope", *Nature* 344, 524-526 (1990).
- [5] G. BINNING, C. F. QUATE y C. GERBER, "Atomic Force Microscope", *Phys. Rev. Lett.* 56, 930-933 (1986).

- [6] A. ASENJO, J. M. GARCÍA y M. VÁZQUEZ, "La microscopía de fuerzas magnéticas: una avanzada para la observación de dominios magnéticos", *Rev. Esp. Fís.* 15 (1), 15-23 (2001).
- [7] J. J. SÁENZ, N. GARCÍA, P. GRÜTTER, E. MEYER, H. HEINZELMANN, R. WIESENDANGER, L. ROSENTHALER, H. R. HIDBER y H.-J. GÜNTHERODT, "Observation of Magnetic Forces by the Atomic Force Microscope", *J. Appl. Phys.* 62, 4293-4295 (1987).
- [8] N. GARCÍA, C. OCAL y F. FLORES, "Model Theory for Scanning Tunneling Microscopy: Application to Au(110) (1×2)", *Phys. Rev. Lett.* 50, 2002-2005 (1983).
- [9] J. MÉNDEZ, "SPM. Microscopías de Campo Cercano", en "Nanociencia y Nanotecnología en España", editado por A. CORREIA y P. A. SERENA, Fundación Phantoms (2008). Disponible en <https://www.nanospain.org/docs.php>
- [10] I. HORCAS, R. FERNÁNDEZ, J. M. GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J. COLCHERO, J. GÓMEZ-HERRERO y A. M. BARÓ, "WSxM: A Software for Scanning Probe Microscopy and a Tool for Nanotechnology", *Rev. Sci. Inst.* 78, 013705 (2007).
- [11] C. GÓMEZ-NAVARRO, R. THOMAS WEITZ, A. M. BITTNER, M. SCOLARI, A. MEWS, M. BURGHARD y K. KERN, "Electronic Transport Properties of Individual Chemically Reduced Graphene Oxide Sheets", *Nano Lett.* 7(11), 3499-3503 (2007).
- [12] R. GARCÍA y R. PÉREZ, "Dynamic Atomic Force Microscopy Methods", *Surf. Sci. Rep.* 47 (6-8), 197-301 (2002).
- [13] E. CORTÉS-DEL RÍO, J. L. LADO, V. CHERKEZ, P. MALLET, J-Y. VEUILLEN, J. C. CUEVAS, J. M. GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J. FERNÁNDEZ-ROSSIER e I. BRIHUEGA, "Observation of Yu-Shiba-Rusinov States in Superconducting Graphene", *Adv. Mater.* 33(22), 2008113 (2021).
- [14] J. M. GÓMEZ-RODRÍGUEZ, A. M. BARÓ, L. VÁZQUEZ, R. C. SALVAREZZA, J. M. VARA, y A.J. ARVIA, "Fractal Surfaces of Gold and Platinum Electrodeposits: Dimensionality Determination by Scanning Tunneling Microscopy", *J. Phys. Chem.* 96(1), 347-350 (1992).
- [15] J. M. GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J. J. SÁENZ, A. M. BARÓ, J.-Y. VEUILLEN, y R. C. CINTI, "Real-Time Observation of the Dynamics of Single Pb Atoms on Si(111)-(7×7) by Scanning Tunneling Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 76, 799-802 (1996).
- [16] S. GÓMEZ-MOÑIVAS, J. J. SÁENZ, R. CARMINATI y J. J. GREFFET, "Theory of Electrostatic Probe Microscopy: A Simple Perturbative Approach", *Appl. Phys. Lett.* 76(20), 2955-2957 (2000).
- [17] M. KÖBER, E. SAHAGÚN, M. FUSS, F. BRIONES, M. LUNA y J. J. SÁENZ, "Adhesion Hysteresis in Dynamic Atomic Force Microscopy", *Phys. Status Solidi (RRL)* 2(3), 138-140 (2008).
- [18] M. JAAFAR, Ó. IGLESIAS-FREIRE, P. GARCÍA-MOCHALES, J. J. SÁENZ, y A. ASENJO, "Negative Dissipation Gradients in Hysteretic Materials", *Nanoscale* 8(38), 16989-16994 (2016).
- [19] A. GARCÍA-ETXARRI, R. GÓMEZ-MEDINA, L. S. FROUFE-PÉREZ, C. LÓPEZ, L. CHANTADA, F. SCHEFFOLD, J. AIZPURUA, M. NIETO-VESPERINAS y J. J. SÁENZ, "Strong Magnetic Response of Submicron Silicon Particles in the Infrared", *Opt. Express* 19(6), 4815-4826 (2011).
- [20] R. GARCÍA, "Images from Below the Surface", *Nature Nanotech.* 5, 101-102 (2010).
- [21] T. ANDO, "High-speed Atomic Force Microscopy and Its Future Prospects", *Biophys. Rev.* 10, 285-292 (2018).



Agustina Asenjo Barahona
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM-CSIC



José Miguel García-Martín
Instituto de Micro y Nanotecnología, IMN-CNM, CSIC. Madrid



Pedro A. Serena
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM-CSIC

SPIE. The international society
for optics and photonics

SPIE Optics + Optoelectronics 2023

24 - 27 April 2023

Prague, Czech Republic

<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/optics-and-optoelectronics>

