

Autoridades Académicas

- *Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit*
- *Vicerrectora: Mg. María Florencia Castro*

- *Secretaria General: Cdora. Mariana Passarello*
- *Secretaria Académica: TP. Pilar Traverso*
- *Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Dra. Carolina Cristina*
- *Secretario de Extensión: Lic. Juan Pablo Itoiz*
- *Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán*
- *Secretario Legal y Técnico: Abog. Carlos D. Pérez*
- *Secretario de Relaciones Institucionales: Cdor. Martín Palma*
- *Secretaria Económico Financiera: Cdora. Mariela García*
- *Directora Centro de Edición y Diseño: Mg. María de las Mercedes Filpe*

Director de la Revista
Dr. Ángel L. Plastino

Edita



CEDi Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
Callao 289 3.º piso, CP.1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño

Año 9 N.º 10
Octubre de 2023
Publicación semestral
ISSN 2408-4492
Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

Sede Junín

Libertad 555, CP.6000
Tel 54 236 4407750
Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP.2700
Tel 54 2477 409500.
Pergamino, prov. de Buenos Aires,

Argentina

*Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDi
(cedi@unnoba.edu.ar)*

www.unnoba.edu.ar



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento -
NoComercial - SinObraDerivada 4.0 Internacional.



CONSEJO EDITORIAL

Dr. Plastino, Ángel R.
UNNOBA

Dr. Tamarit, Guillermo R.
UNNOBA

Mg. Tavela, Danya V.
UNNOBA

Dra. Cristina, Carolina
UNNOBA

Mg. Filpe, Ma. de las Mercedes
UNNOBA

Arbitraje

La nuestra es una revista de divulgación que publica artículos originales, en el sentido de que no han aparecido antes en ningún otro medio.

Por ser una revista de divulgación, nuestra principal preocupación es que sus artículos sean accesibles a un público con formación universitaria. No juzgamos tanto el contenido como su accesibilidad.

Todos los artículos son arbitrados por el Consejo Editorial. La mayoría de ellos son el resultado de invitaciones especiales a reconocidos expertos en la áreas abordadas. Se aceptan también presentaciones espontáneas que se someten a riguroso escrutinio que aquí sí se centra en el contenido.

OBJETIVOS Y METAS

Existe gran retraso en el desarrollo de la divulgación de la ciencia y del pensamiento académico en general, en relación con los vertiginosos avances que se han registrado en estos últimos años. Esto ocasiona un pernicioso desfase entre la sociedad y sus científicos y académicos. Por ello resulta muy importante intentar llevar variados aspectos de la concomitante actividad al público, en formato accesible.

Esto constituye a la vez un desafío y una necesidad social. Para satisfacerla, *NÚCLEOS* propone que los propios científicos y académicos traten de ayudar a los ciudadanos a valorar su trabajo. *NÚCLEOS* pretende que nuestros autores-creadores acerquen a sus lectores una visión actualizada de recientes desarrollos, en particular aquellos que se originan en el país. Nos interesa ayudar a apreciar la relevancia del pensamiento creativo, acercándolo en forma directa desde y por sus protagonistas.

Fantásticas innovaciones y grandes sorpresas nos brindan hoy las ciencias y otras disciplinas académicas, con enormes consecuencias tecnológicas y humanas. Beneficia el desarrollo cultural de un pueblo que cierto tipo de investigaciones, hallazgos, descubrimientos y experimentos puedan ser transmitidos al público. Este forma parte de la sociedad de la información pero, en general, conoce muy poco sobre ciencia y tecnología, a pesar de que estas estén cambiando al mundo, transformando de modo radical la vida cotidiana. *NÚCLEOS* intenta, de forma modesta pero esperamos que eficaz, que se acerquen al público elementos esenciales del desarrollo actual del conocimiento.

Editorial

Acercamos al lector nuestro décimo número, con contenido variado que esperamos concite interés.

El título del primer artículo es una metáfora poética empleada para destacar la idea de que los átomos y elementos que componen nuestro cuerpo y todos los objetos en el universo se formaron en el interior de estrellas a lo largo de la historia del cosmos. Esta afirmación se basa en una comprensión científica de la formación de elementos químicos en el universo. En efecto, los átomos que constituyen la materia en la Tierra, incluyendo los que forman nuestro propio cuerpo, se originaron en el proceso de nucleosíntesis en el interior de estrellas masivas y en explosiones de supernovas. Durante estas etapas de la vida estelar, los núcleos ligeros como el hidrógeno y el helio se fusionaron para crear elementos más pesados, como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y otros elementos esenciales para la vida.

El trabajo sobre la Patagonia hace referencia a una temática que combina aspectos de geología, geografía, economía y política, y se centra en la explotación de hidrocarburos y otros materiales en la región norte de la Patagonia en América del Sur. Mucho de nuestro futuro depende de esta problemática.

El siguiente artículo sobre el concepto de “la construcción social del cielo” se refiere a la idea de que nuestras percepciones, interpretaciones y significados relacionados con el cielo y los astros son el resultado de influencias culturales, sociales y cognitivas. Se trata de una perspectiva que reconoce que nuestras nociones sobre el cielo no son simplemente observaciones neutrales de la naturaleza, sino que están moldeadas por nuestras experiencias culturales y nuestras interacciones sociales. El término “astronomía cultural” remite al estudio de cómo diferentes culturas y sociedades a lo largo de la historia han entendido y dado significado al cielo, las estrellas, los planetas y otros objetos celestes. Esta rama de la astronomía no solo se centra en los aspectos científicos de la observación de los cuerpos celestes, sino que también considera las dimensiones culturales y sociales de la astronomía. Aquí se hace foco en el Chaco.

Finalmente, hablamos del microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés). Se trata de una herramienta revolucionaria en la investigación científica que ha permitido a los científicos observar y manipular la materia a una escala nanométrica con una resolución sin precedentes. Cumplir 40 años de existencia es un hito significativo en la historia de la nanotecnología y la ciencia de materiales. El trabajo presenta aspectos destacados y fascinantes sobre el STM y su relevancia.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

EL MICROSCOPIO DE EFECTO TÚNEL (STM): LOS OJOS DEL NANOMUNDO CUMPLEN 40 AÑOS

RESUMEN: Recientemente se han cumplido 40 años desde que se inventó el microscopio de efecto túnel (STM), instrumento clave en la historia de la microscopía tanto porque supuso una revolución conceptual que permitió el desarrollo posterior de otras microscopías de proximidad como porque fue la herramienta con la que el ser humano pudo ver

PALABRAS CLAVE: EFECTO TÚNEL, MICROSCOPIA DE EFECTO TÚNEL, STM, MICROSCOPIA DE FUERZAS ATÓMICAS, AFM, MICROSCOPIA DE SONDA DE PROXIMIDAD, SPM, NANOCIENCIA, NANOTECNOLOGÍA

y mover átomos de forma individual. Esta hazaña científico-tecnológica espoleó la llegada de lo que hoy conocemos como nanotecnología. En este artículo se describe cómo se llevó a cabo dicha invención, los retos que tuvieron que superarse y las repercusiones científicas provocadas por la aparición de este instrumento.

ABSTRACT: Recently we have celebrated 40 years since Scanning Tunneling Microscope (STM) was invented. The STM is a key instrument in the history of the microscopy since it represents a conceptual revolution that stimulated the proliferation of other scanning probe microscopes for the observation and manipulation of atoms.

This technological achievement promoted the development and expansion of Nanotechnology. This

article describes the invention of the STM, the challenges it had to overcome and the scientific impact of the development of this technique.

KEYWORDS: TUNNEL EFFECT, SCANNING TUNNELING MICROSCOPE, STM, ATOMIC FORCE MICROSCOPY, AFM, SCANNING PROBE MICROSCOPY, SPM, NANOSCIENCE, NANOTECHNOLOGY

* Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM-CSIC. c/ Sor Juana Inés de la Cruz 3, Cantoblanco, 28049-Madrid, España. pedro.serena@icmm.csic.es

1. INTRODUCCIÓN: DEL SUEÑO ATOMISTA A LA EVIDENCIA DEL ÁTOMO

En el año 2021 se celebró una importante efeméride para la comunidad científica: se cumplieron 40 años de la invención del microscopio de efecto túnel, conocido coloquialmente en la comunidad científica como STM, por las siglas de la expresión inglesa *scanning tunneling microscope*. Este fue un descubrimiento de suma importancia porque el STM fue la primera herramienta que permitió observar los átomos de una forma relativamente sencilla (o al menos eso nos parece ahora). Este instrumento ha hecho del gigantesco reto que supone poder observar una partícula tan diminuta como un átomo, que posee típicamente un diámetro de unos pocos Å (donde $1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$), una tarea rutinaria.

Observar átomos supuso hacer realidad un sueño de los seres humanos mantenido desde que los modelos atomísticos fueron planteados hace más de 2500 años por filósofos de la India y los griegos Leucipo y Demócrito.¹ Para la escuela atomista griega todo estaba formado por átomos, diminutas partículas materiales indestructibles, diferenciadas entre sí por su tamaño y forma, que eran capaces de combinarse entre ellos para formar estructuras más complejas. Mucho después, a principios del siglo XIX, J. Dalton propuso el primer modelo atómico con base científica (Muñoz, 2014). Este modelo fue uno de los pilares de la química moderna: permitió explicar la formación de sustancias a partir de un número limitado de elementos y dio soporte teórico tanto a la Ley de las Proporciones Constantes como a la Ley de las Proporciones Múltiples.

Desde entonces, han ido postulándose los modelos atómicos de la materia, uno tras otro, incorporando los descubrimientos que se producían de manera incesante. En 1905 A. Einstein (Einstein, 1905) relacionó el movimiento browniano con la existencia de los átomos, idea que fue corroborada experimentalmente poco después por J. Perrin (Perrin, 1908). De esta manera se tuvo una constatación indirecta de la existencia de los átomos. En la década siguiente J. J. Thomson, E. Rutherford, N. Bohr y A. Sommerfeld propusieron modelos atómicos, en el marco de una física clásica que estaba a punto de sufrir el “terremoto cuántico”. En la década de 1920 los modelos atómicos incluyeron las aportaciones conceptuales hechas desde la mecánica cuántica, teoría que fue gestada gracias a las contribuciones de M. Planck, L. de Broglie, E. Schrödinger, W. Heisenberg, P. A. M. Dirac, A. Einstein, S. N. Bose, W. E. Pauli, M. Born y E. Fermi, entre otros (Ireson, 2000). Conceptos como nivel de energía, orbital electrónico, nube electrónica, transición electrónica o principio de exclusión quedaron incorporados al concepto de átomo. La sencillez de los modelos atomistas griegos quedaba ya muy lejana, pero la fascinación por el átomo seguía siendo la misma.

A pesar de los avances conceptuales y los resultados experimentales, una vez llegada la segunda mitad del siglo XX, los átomos seguían siendo una entelequia teórica, confirmada indirectamente por observaciones experimentales. A pesar de ello, había quien anticipaba que algún día los átomos podrían no solo verse, sino manipularse a voluntad con herramientas sofisticadas que tarde o temprano serían ideadas por los seres humanos. Tal optimismo era propio de una de las grandes personalidades de la ciencia del siglo pasado, R. Feynman, quien, a finales de 1959, impartió la conferencia *There's Plenty of Room at the Bottom* (Feynman, 1960) en el Instituto Tecnológico de California (Caltech), donde dejó en claro que “los principios de la física, tal y como yo veo, no dicen nada en contra de la posibilidad de manipular átomo a átomo... Esto es algo que en principio puede hacerse, pero en la práctica no ha sido así porque somos demasiado grandes”. También adelantó que se desarrollarían nuevos microscopios con una resolución capaz de discernir átomos y se diseñarían herramientas con las que fabricar novedosos equipos electrónicos y nuevos materiales con ultraprecisión. R. Feynman estaba anticipando lo que luego fueron la nanociencia y la nanotecnología, disciplinas que se han ido consolidando en el último medio siglo (Serena, 2010, 2021).

R. Feynman tenía razón y tan solo hubo que esperar a que determinadas ideas y desarrollos experimentales madurasen. La historia de estos desarrollos es la que se cuenta en las siguientes secciones, centrándonos en la invención del STM, su funcionamiento, su impacto en la ciencia y el futuro que esta fascinante técnica tiene por delante.

2. MICROSCOPIAS NO LOCALES Y LOCALES

La superficie de cualquier objeto es el lugar en el que este interactúa con su entorno. Los átomos de la superficie tienen menos vecinos que los del interior (átomos de volumen) y por este simple hecho sus propiedades son distintas. Entender cómo estos átomos se ordenan, se reorganizan, o cómo reaccionan con otros átomos o moléculas ha sido objeto de estudio de disciplinas como la física y la química de superficies, la ciencia de materiales, la tribología, la catálisis, etc.

Un elemento fundamental del estudio de una superficie es la determinación de su topografía con el mayor nivel de detalle posible. Este conocimiento, además de ser interesante desde una perspectiva de ciencia básica, posee un gran interés tecnológico (Jiang *et al.*, 2007a, 2007b). Para llevar a cabo el estudio topográfico de las superficies de materiales se han desarrollado herramientas cada vez más sofisticadas con las que ha sido posible explorar regiones más pequeñas a la vez que se alcanzaban mayores resoluciones. La microscopía óptica fue la precursora de esta exploración de lo “pequeño” desde el siglo XVII. Sin embargo, el límite de resolución de estos microscopios está condicionado por la longitud de onda de la luz utilizada (luz visible), lo que impide resolver objetos o detalles geométricos con tamaños inferiores a los 200 nm, aproximadamente.

A principios del siglo XX se comenzaron a usar haces de electrones para estudiar las superficies. En particular, el microscopio electrónico de transmisión (TEM, de *transmission electron microscope*) fue desarrollado por E. Ruska y M. Knoll a principios de la década de 1930. Poco después, en 1937, M. von Ardenne inventó el STEM (de *scanning transmission electron microscope*), instrumento en el que un haz de electrones focalizado barría la superficie de la muestra bajo estudio. La microscopía electrónica aprovecha el Principio de Dualidad onda-corpúsculo, que atribuye a una partícula una longitud de onda característica (longitud de onda de De Broglie) que decrece cuando aumenta su energía. De esta forma, el límite de resolución de los microscopios electrónicos podía aumentarse usando haces de electrones de alta energía, que podrían enfocarse adecuadamente sobre la muestra gracias al uso de complejas lentes electromagnéticas.

Los equipos TEM y SEM se convirtieron en los auténticos protagonistas de la exploración de las superficies y el volumen a escala subnanométrica durante buena parte del siglo XX (Haguenau *et al.*, 2003). En SEM, el haz de electrones interactúa con la materia y provoca diferentes emisiones que son recogidas por diferentes sensores, lo que permite reconstruir imágenes 3D de la superficie de la muestra, construir mapas de composición o recoger información cristalográfica. En 1969, A. V. Crewe pudo observar átomos de uranio y torio aislados, colocados sobre superficies de carbono mediante microscopía STEM (Crewe, 1970). Las técnicas de microscopía electrónica se fueron haciendo más y más sofisticadas

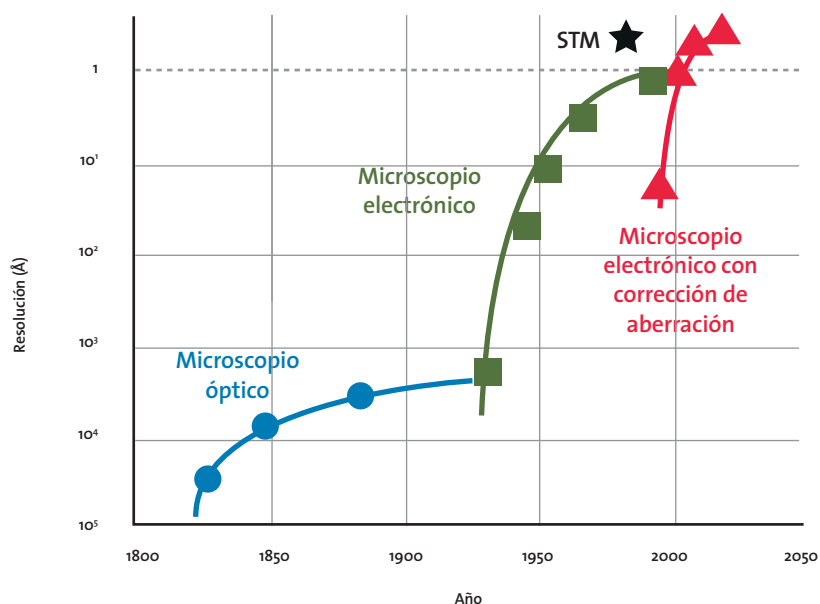


Figura 1. Evolución desde 1800 de la resolución del microscopio óptico (círculos), del microscopio electrónico (cuadrados) y del microscopio electrónico con corrección de aberración (triángulos). La estrella representa la microscopía de efecto túnel (STM). Basada en Liu, 2021.

y fueron superando todo tipo de problemas técnicos hasta conseguir la resolución atómica gracias a la incorporación de sistemas de corrección de aberración (Pennycook *et al.*, 2006). Además, estas técnicas, en combinación con el uso de bajas temperaturas, han sido claves para la resolución de decenas de miles de moléculas orgánicas complejas. Por el desarrollo de la criomicroscopía electrónica de alta resolución, sus inventores, J. Dubochet, J. Frank, y R. Henderson, recibieron el Premio Nobel de Química del año 2017.

Otras aproximaciones utilizadas para realizar la observación de superficies fueron las basadas en el microscopio de emisión de iones por efecto campo (FIM, de *field ion emission*). En 1956, E. Muller y K. Baladur (Müller y Bahadur, 1956; Muller, 1956) utilizaron un FIM para distinguir los haces de iones emitidos desde átomos individuales ubicados sobre una punta de wolframio muy afilada. En la década de 1970 se pudieron distinguir simultáneamente y en tiempo real diferentes átomos individuales de

especies metálicas moviéndose sobre una superficie. Sin embargo, esta técnica estaba limitada a ciertos materiales y a ciertas condiciones de operación, por lo que tuvo menor impacto que el TEM o el SEM.

La microscopía óptica también experimentó grandes avances como el desarrollo del microscopio de contraste de fase, logrado por F. Zernike en 1935, quien recibió el Premio Nobel de Física del año 1953; o el desarrollo de la microscopía confocal, patentada por M. Minsky en 1957. Más recientemente, se han desarrollado varias técnicas de microscopía óptica que han sido capaces de superar el límite clásico de resolución (Prakash *et al.*, 2022). En particular, los inventores y desarrolladores de la microscopía óptica de fluorescencia, E. Betzig, S. W. Hell y W. E. Moerner, recibieron el 2014 el Premio Nobel de Química.

La Figura 1 ilustra la evolución del límite de resolución que se ha ido alcanzando mediante las diferentes técnicas microscópicas (Liu, 2021). El proceso de mejora muestra una evolución a saltos, condicionada por las disrupciones tecnológicas. Cuando una tecnología comienza a dar muestras de agotamiento (saturación), la aparición de una disrupción tecnológica provoca una rápida mejora del poder de resolución hasta llegar a una etapa de crecimiento lento o saturación, que se prolonga hasta que una nueva disrupción tiene lugar.

Es importante señalar que las técnicas microscópicas (óptica, electrónica) descritas anteriormente utilizan haces de fotones o electrones que son emitidos desde una fuente para ser guiados y focalizados mediante diferentes tipos de lentes hasta la muestra que se desea estudiar. Estas sondas interactúan con la materia y provocan la emisión de fotones, electrones o rayos X, tanto en el plano de incidencia (modo de reflexión) como en transmisión. Los haces reflejados o transmitidos, así como las partículas secundarias emitidas, son recogidos por distintos tipos de sistemas sensores: nuestros ojos, en el caso de la microscopía óptica con luz visible, o pantallas fluorescentes y sofisticados detectores de electrones en las otras técnicas. A partir de la interpretación adecuada de toda esa información, por medio de complejos modelos teóricos, se puede llegar a comprender la topografía, la textura y la composición superficial o de volumen de la muestra observada. Estas aproximaciones son de carácter “no local” y son comunes también en otras técnicas de caracterización de la materia, como ocurre en los sincrotrones, en los que el material que se desea estudiar es expuesto a potentes haces de ondas electromagnéticas de longitud de onda controlada, que interactúan con el material formando imágenes directas o complejos patrones de ondas difractadas. A partir de dichos patrones, con los

adecuados modelos teóricos y sistemas de computación, es posible reconstruir la estructura atómica interna del material.

De forma paralela se fueron desarrollando otras técnicas basadas en la denominada aproximación “local”, donde las sondas son emitidas en la proximidad de la zona a estudiar. Esta aproximación plantea ciertos problemas, pero el más importante es el de controlar, con precisión, la posición relativa entre el emisor y la superficie de estudio. Esta idea no era nueva, pues había antecedentes de estos métodos no locales de caracterización de superficies desde mediados del siglo XIX. Por ejemplo, la indentación de una afilada punta en una superficie era la forma habitual de caracterizar sus propiedades mecánicas (Walley, 2012). También se habían desarrollado métodos de perfilometría capaces de determinar la topografía de la muestra mediante una serie de barridos paralelos que recogen la altura de la superficie en cada punto explorado de la muestra (Jiang *et al.*,

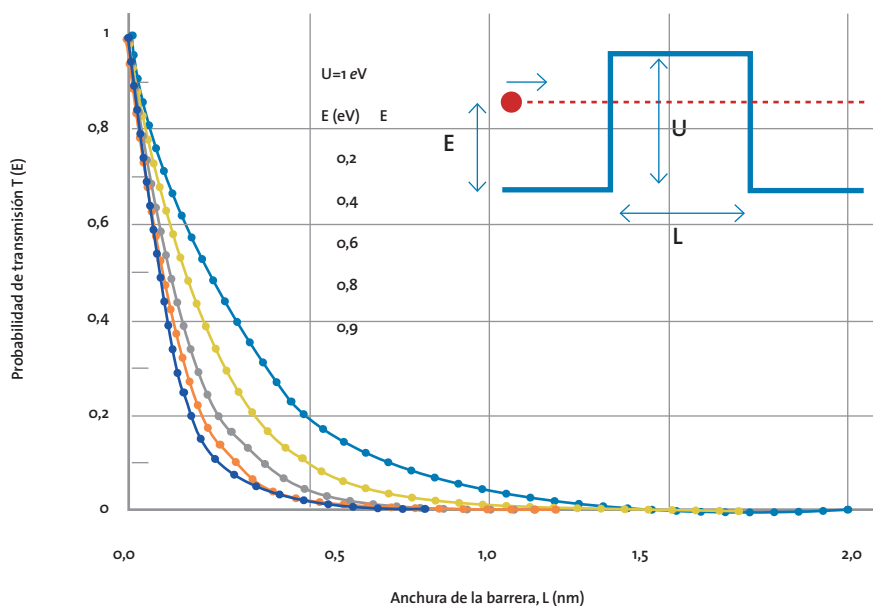


Figura 2. Probabilidad de transmisión T de un electrón a través de una barrera de potencial rectangular de altura $U=1$ eV (ver inserto) en función de la anchura de la barrera L para diferentes energías E del electrón incidente.

que en el marco de la mecánica clásica sería infranqueable. En la Figura 2 se ilustra este fenómeno mediante el sencillo modelo de una barrera “rectangular” de energía U y anchura L , sobre la que impacta una partícula de masa m y energía E que se mueve inicialmente por un potencial plano. En este caso particular, se puede estimar, resolviendo la ecuación de Schrödinger, que la probabilidad de transmisión de la partícula T es aproximadamente

$$T(E) \approx e^{-2\sqrt{\frac{2m(U-E)}{\hbar}}L} \quad (1)$$

Donde \hbar es la constante de Planck. En este sencillo ejemplo se puede observar como la probabilidad $T(E)$ depende exponencialmente de la anchura de la barrera. La probabilidad de transmisión también depende de la masa de la partícula y de la diferencia $U-E$. En la Figura 2 se muestran varias curvas $T(E)$ para diferentes casos en los que un electrón con energía 1 eV se encuentra ante barreras de diferentes alturas y anchuras. Como muestran la Ecuación 1 y la Figura 2b, la probabilidad de transmisión decae exponencialmente a medida que aumenta el espesor de la barrera.

Una de las más llamativas aplicaciones del efecto túnel tuvo lugar en 1957, cuando L. Esaki desarrolló, mientras trabajaba en Sony, un nuevo diodo basado en materiales semiconductores. Por ese hallazgo, Esaki recibió el Premio Nobel de Física en 1973. La posibilidad de construir dispositivos de estado sólido en los que estudiar y aprovechar fenómenos cuánticos fue una de las líneas de investigación más poderosas dentro de

2007a, 2007b). La resolución alcanzada con estas técnicas era micrométrica, por lo que estas herramientas todavía necesitaban mejorar en tres o cuatro órdenes de magnitud su resolución para poder caracterizar la materia a escala atómica. Y precisamente este salto se produjo gracias a un inesperado y sorprendente aliado: el efecto túnel.

3. LA INVENCION DEL STM

El efecto túnel es uno de estos sorprendentes fenómenos que se dan en el marco de la mecánica cuántica y que despertó un gran interés desde su desarrollo teórico (Merzbacher, 2002). El efecto túnel sirvió para explicar los espectros moleculares, la emisión de electrones desde una superficie por efecto campo o la emisión de partículas alfa desde núcleos radiactivos. En esencia, este efecto trata de la posibilidad de que una partícula de masa m y con cierta energía E pueda atravesar, con cierta probabilidad T , una barrera de energía

la física del estado sólido desde los años 60 del pasado siglo. Sin embargo, este tipo de estudios tenía sus limitaciones ya que, una vez fabricado el dispositivo, sus parámetros geométricos no podían ser alterados, de forma que las corrientes medidas solo podían modificarse mediante la variación del voltaje, el cambio de temperatura o la presencia de campos magnéticos. En esa época comienza el interés por fabricar dispositivos de geometría variable de forma que los efectos cuánticos (por ejemplo, la corriente túnel) se pudiesen controlar utilizando este nuevo parámetro.

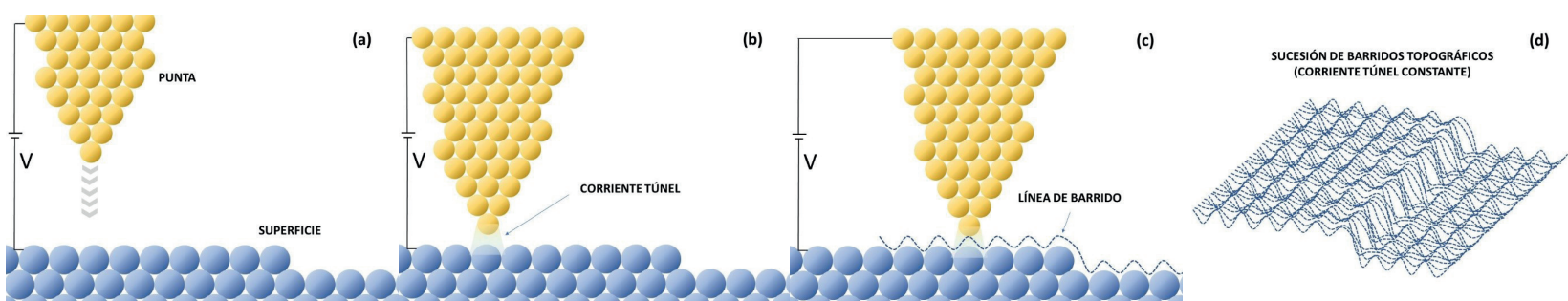
En este contexto de interés por las propiedades cuánticas, se pueden enmarcar los trabajos de H. Rohrer y G. Binnig, inventores del STM. La historia de esta invención ya se ha descrito con anterioridad (Baratoff, 1986, Quate, 1986, Binnig y Rohrer, 1987) por lo que aquí describiremos someramente esta apasionante historia. A principios de 1978, H. Rohrer, un brillante científico que trabajaba en los laboratorios de IBM en la localidad suiza de Rüschlikon, cercana a Zürich, se encuentra en Frankfurt con G. Binnig, un joven doctorando, y ambos intercambian ideas sobre el efecto túnel y el diseño de un experimento para medirlo con precisión. A finales de 1978, G. Binnig se incorpora al grupo de H. Rohrer en IBM y ambos investigadores comienzan a trabajar en un sistema metal-vacío-metal de geometría variable para estudiar la transmisión de electrones debida al efecto túnel.

El diseño del sistema metal-vacío-metal incluía, como uno de los electrodos, una punta metálica, de forma que la geometría del sistema se podría controlar variando la separación punta-superficie (dirección z). Controlando la distancia entre la punta y la superficie se podría observar la aparición de corriente túnel al aproximar ambas lo suficiente. También, como dicha corriente varía exponencialmente con la distancia punta-muestra, se podría utilizar para determinar la distancia entre ambas. Además, si se moviese la punta de forma paralela a la superficie (plano xy) a la vez que se mide la corriente, cualquier alteración de la corriente indicaría que la distancia punta-superficie ha sido modificada, con lo que se obtiene información sobre la topografía de la muestra.

Tras un par de años de esfuerzo, en 1981, Rohrer y Binnig tenían a punto la primera versión de una máquina capaz de acercar de forma controlada una punta metálica hasta una superficie conductora y medir la corriente túnel que aparecía al aplicar una diferencia de potencial entre la punta y la muestra. Además, el movimiento de la punta en el plano xy permitía medir la corriente túnel a lo largo de barridos controlados sobre ella.

En el diseño del primer STM fue decisiva la contribución de Ch. Gerber, un experimentado técnico, y de su joven ayudante E. Weibel. Las puntas tenían que ser lo suficientemente afiladas como para terminar en un átomo, lo que se logró usando puntas metálicas que eran afiladas mediante ataque químico. El desplazamiento relativo punta-muestra se consiguió mediante el uso de materiales piezoeléctricos (que se deforman con la aplicación de un voltaje). De esta manera, la punta metálica se colocó en el punto de unión de tres barritas piezoeléctricas a lo largo de los ejes cartesianos (x, y, z) y mediante la aplicación de tres voltajes independientes (V_x, V_y, V_z) se podía controlar la deformación de las barras, y por lo tanto, la posición de la punta. A su vez, mantener la distancia punta-muestra de manera estable requería aislar el equipo de todo ruido mecánico procedente del exterior. Para ello se optó por usar un complejo sistema de muelles e imanes que permitían amortiguar cualquier vibración o el ruido mecánico.

Figura 3. Esquema del funcionamiento de un microscopio de efecto túnel (STM). La punta se acerca a una superficie (a) hasta que se establece una corriente túnel (b). El barrido de la punta, que mantiene la corriente túnel a un valor constante gracias al sistema de retroalimentación permite determinar la topografía a lo largo de una línea de barrido (c). Finalmente, mediante la realización de varios barridos paralelos entre sí (d), es posible determinar la topografía de una región de la superficie de la muestra.



Por si fuese poco, el sistema requería operar en un alto vacío para evitar que contaminantes no deseados alterasen tanto la superficie de la muestra estudiada como la propia punta metálica. La primera versión del STM, que fue acumulando modificaciones y mejoras sobre la marcha, era un equipo algo desgarrado, con aspecto muy diferente a las versiones actuales. Sin embargo, este equipo contenía todos los elementos que se han ido manteniendo, con mejoras en el diseño, hasta la actualidad. En la Figura 3 se muestra de manera esquemática la forma de funcionamiento del STM.

A los anteriores ingredientes, hubo que añadir una electrónica de control de alta sensibilidad con la que medir las pequeñas corrientes (pA a nA) que se establecían entre la punta y la muestra. Para mantener la corriente túnel en un valor constante mientras la punta metálica efectúa barridos sobre la superficie, la electrónica contaba con un lazo de retroalimentación (*feedback*) que obligaba a la barra piezoeléctrica que controlaba el movimiento en la dirección z a deformarse de modo que la punta se acercase (alejase) cuando la corriente túnel disminuyera (aumentase). Este sistema de retroalimentación debía ajustarse para evitar que la punta impactase con la superficie o se alejase demasiado y perdiera la corriente túnel. Sin embargo, hay que decir que ambas circunstancias se daban muy a menudo, porque controlar movimientos de forma tan precisa era (y sigue siendo) todo un reto.

Tras realizar medidas de corriente túnel en función de la distancia entre punta y muestra, H. Rohrer y G. Binnig observaron que, al explorar la superficie manteniendo constante la corriente túnel, el mecanismo de *feedback* obligaba a mover la barra piezoeléctrica de la dirección z siguiendo aproximadamente la topografía de la muestra. En los primeros experimentos fueron capaces de detectar los escalones de altura atómica que se forman en la superficie de oro. Además, como la corriente túnel es muy sensible a los cambios topográficos de la superficie muy pronto se pensó en que el STM podría distinguir (resolver) átomos. Los primeros resultados relacionados con la técnica se mostraron en varias reuniones científicas durante 1981, generando una gran expectación, y fueron publicados en diferentes revistas en 1982 (Binnig *et al.*, 1982, Binnig y Rohrer, 1982). Un año después aparecieron los artículos en los que se mostraba la estructura en espacio real de la reconstrucción 7x7 de la cara (111) de la superficie de silicio que por aquel entonces era uno de los enigmas científicos del momento, muy relacionado con la fabricación de semiconductores en la industria electrónica (Binnig *et al.*, 1983, Binnig y Rohrer, 1983).

Estos resultados revolucionaron el mundo científico e impulsaron definitivamente el interés por el STM. Por otro lado, desde un primer momento, G. Binnig y H. Rohrer fueron conscientes de lo importante que era difundir esta potente técnica, y por eso convirtieron su laboratorio de IBM en un lugar de peregrinación al que decenas de colaboradores se acercaban para aprender a construir y manejar los equipos, creando una incipiente escuela de usuarios del STM. Los integrantes de esta incipiente comunidad fueron responsables de ir introduciendo mejoras en el diseño del STM. Además de los desarrollos técnicos, fue fundamental el desarrollo de una teoría (Tersoff y Hamman, 1983) que permitiera entender las complejas relaciones existentes entre la estructura electrónica de la punta y de las superficies, la propagación de electrones en estos sistemas, las corrientes medidas y la correspondiente topografía. Sin duda, esta etapa de difusión y consolidación de la escuela del STM figura entre las más apasionantes de la reciente historia de la ciencia contemporánea.

Uno de los primeros lugares del mundo que se incorporó a la comunidad STM fue la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), donde se tuvo acceso a una de las primeras versiones del STM, gracias a dos de sus profesores A. Baró y N. García, quienes nuclearon un primer grupo de investigación en torno a este equipo, de donde se irradió rápidamente la técnica a otros grupos españoles, lo que hizo que España jugase un papel relevante en el desarrollo y utilización del STM en las décadas siguientes. Esta circunstancia fue reconocida en 1986, año en que la ciudad de Santiago de Compostela acogió la primera edición de la conferencia internacional sobre STM. La rocambolesca llegada

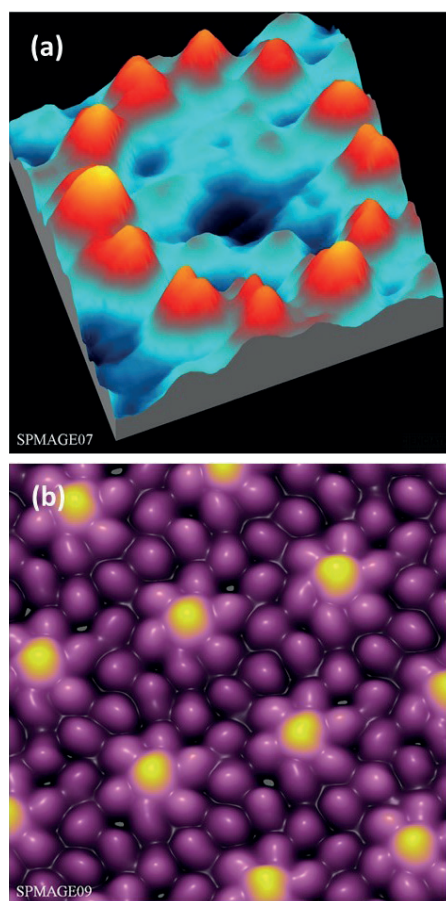


Figura 4. Imágenes obtenidas por STM. (a) Doce átomos de Br depositados sobre la superficie Si(111)-(7x7) formando un patrón circular a 50 K. Cortesía de Seungo Yun Yang (Universidad de Toronto, Canadá). (b) Moléculas de triazina formando un patrón ordenado a 170 K en ultra-alto-vacío (UHV) sobre la superficie Cu(111). Cortesía de Bruno de la Torre (Universidad Autónoma de Madrid, España). Ambas imágenes fueron finalistas del certamen internacional SPMAGE, en las ediciones de 2007 y 2009, respectivamente.

del STM a Madrid, los primeros estudios realizados en la UAM para obtener imágenes de virus con esta técnica (Baró *et al.*, 1985) y otras vicisitudes se cuentan en el documental *40 años viendo átomos*,² estrenado en 2021, y en un artículo con el mismo título (Asenjo *et al.*, 2022). En ambos se realiza también un homenaje a dos profesores de la UAM, J. M. Gómez-Rodríguez y J. J. Sáenz, recientemente fallecidos, quienes tuvieron un destacado papel en el desarrollo experimental y teórico, respectivamente, del STM.

Sin duda alguna, con la invención del STM se hizo realidad un sueño mantenido por la humanidad durante miles de años, el de poder ver átomos, aunque en realidad más que ver, se puede decir que el STM funciona “palpando” la materia, detectando pequeñas corrientes. Dada la trascendencia de esta invención, H. Rohrer y G. Binnig recibieron el Premio Nobel de Física en 1986, solo cinco años después de la invención del STM. Dicho premio fue compartido con E. Ruska, inventor del TEM. En los años siguientes la técnica evolucionó muy rápidamente: disminuyó el tamaño de los sistemas STM, lo que facilitaba la eliminación del ruido mecánico y su integración con otras técnicas de caracterización de superficies; mejoró la precisión de los piezosistemas que determinan el movimiento relativo entre punta y muestra; e incorporó sofisticados sistemas de adquisición y análisis de imágenes. Además, su relativo bajo coste, en comparación con otras técnicas de microscopía electrónica, permitió su rápida difusión dentro de la comunidad científica interesada por la ciencia de superficies. Un par de ejemplos de los extraordinarios “paisajes” que pueden contemplarse con esta técnica los encontramos en la Figura 4.

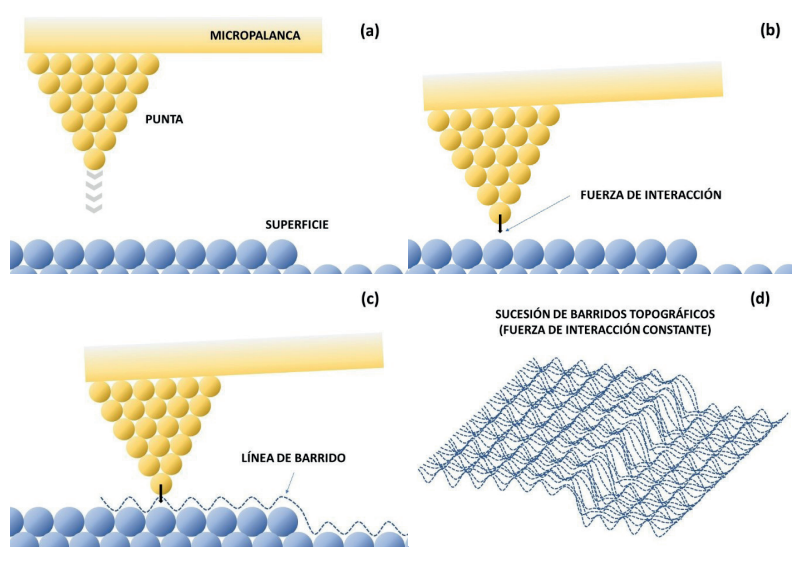


Figura 5. Esquema del funcionamiento de un microscopio de fuerzas atómicas (AFM). El sistema palanca+punta se acerca a una superficie (a) hasta que aparece una fuerza de interacción, flexionando la palanca (b). El barrido de la punta que mantiene la fuerza a un valor constante gracias al sistema de retroalimentación permite determinar la topografía a lo largo de una línea de barrido (c). Finalmente, mediante la realización de varios barridos paralelos entre sí (d), es posible determinar la topografía de una región de la superficie de la muestra.

4. LA REPECUSIÓN DEL STM: LAS NUEVAS MICROSCOPIAS LOCALES SPM

El STM no solo hizo accesibles las superficies a escala atómica, sino que dio un paso más allá: hizo que la propia punta pudiese ser usada como una pequeña herramienta capaz, en ciertas condiciones, de manipular los átomos moviéndolos de un lado a otro de una superficie de manera controlada. En 1990 se publica el trabajo de D. Eigler y E. Schweizer en el que aparece la icónica imagen del logotipo de la empresa IBM escrito usando 35 átomos de Xe (Eigler y Schweizer, 1990). Con esta prodigiosa hazaña se hacían realidad las predicciones hechas 30 años antes por R. Feynman. Más adelante se fueron desarrollando otros métodos para manipular la materia a escala nanométrica, usando también la punta del STM como un cincel capaz de crear estructuras en superficies suficientemente blandas (Pascual *et al.*, 1993). La visualización y la manipulación de la materia a escala nanométrica, así como la creación individualizada de nanoestructuras, plantearon una nueva forma de concebir la fabricación de objetos, impulsando lo que ahora conocemos como nanotecnología (Serena, 2010, 2021).

El STM tuvo otro impacto no menos importante que el de hacer posible la manipulación atómica:

fue el punto de partida de un cambio conceptual en la caracterización de las superficies. Como ya se ha dicho, el STM tiene algunas limitaciones, entre ellas que la muestra debe ser conductora. Estas limitaciones se pudieron sobrepasar en 1986 cuando los infatigables G. Binnig y Ch. Gerber, junto a C. F. Quate, dieron a conocer el microscopio de fuerzas atómicas (AFM, por las siglas de *Atomic Force Microscope*), otro instrumento también basado en la aproximación de sonda local (Binnig *et al.*, 1986). En este microscopio, una punta muy afilada adosada a una pequeña palanca (*cantilever*) se acerca controladamente a la su-

perficie hasta que se detecta una fuerza (atractiva o repulsiva) entre la punta y la muestra que puede ser medida, gracias a la deflexión de la palanca, y de esta forma utilizarse como parámetro de control para determinar la distancia punta-muestra.

En la Figura 5 se muestra esquemáticamente el funcionamiento del AFM. Este es similar al de un STM, salvo que en lugar de corrientes se miden fuerzas de interacción, lo que permite explorar sistemas de todo tipo, que ya no requieren ser conductores. Estas fuerzas pueden tener componentes perpendiculares a la superficie (adhesión, electrostática,...) o paralelas a ella (fricción), y su medida proporciona información complementaria sobre la superficie. Otro valor añadido del AFM con respecto al STM es que la primera técnica puede operar en medios líquidos, lo que le confiere una mayor versatilidad. Estas ventajas competitivas explican el impresionante auge del AFM en la caracterización de muestras biológicas.

Dada la existencia de diferentes interacciones entre la punta y la muestra, la técnica AFM rápidamente supo adaptarse a los requisitos necesarios para medir diferentes propiedades. De esta forma, por ejemplo, surgió una variante del AFM capaz de medir fuerzas magnéticas usando una punta magnética que podía discernir los dominios magnéticos (Asenjo *et al.*, 2001). Esta variante del AFM pasó a denominarse microscopía de fuerzas magnéticas (MFM).

A medida que se desarrollaban instrumentos capaces de analizar específicamente determinadas interacciones fueron surgiendo variantes del AFM. En conjunto, todas las microscopías que operan a escala local usando una pequeña punta como sonda se denominan microscopías de sonda de barrido o SPM (del inglés, *scanning probe microscopy*). La Tabla 1 muestra una buena parte de las microscopías de la familia SPM. También es importante señalar que las estrategias empleadas en el diseño de las microscopías SPM han sido empleadas en el diseño de sensores de diverso tipo, incluyendo sensores químicos (“narices electrónicas”), acelerómetros o biosensores.

Tabla 1. Técnicas de microscopía englobadas bajo la denominación SPM		
Acrónimo	Nombre (en inglés)	Tipo de interacción o de propiedad medida
STM	Scanning Tunneling Microscopy	Corriente túnel
AFM	Atomic Force Microscopy	Fuerzas (en general)
MFM	Magnetic Force Microscopy	Fuerzas magnéticas
C-AFM	Conducting-AFM	Transporte eléctrico
SCM	Scanning Capacitance Microscopy	Concentración y portadores de carga
KPFM	Kelvin Probe Force Microscopy	Diferencias de potencial en la superficie
PFM	Piezoresponse Force Microscopy	Estructura de dominios piezoeléctricos
SThM	Scanning Thermal Microscopy	Temperatura local y conductividad térmica
FFM	Friction Force Microscopy	Fuerzas de fricción
SNOM	Scanning Near-field Optical Microscopy	Luz reflejada y transmitida en campo cercano
MM-AFM	Multi-Mode AFM	Respuesta mecánica de la muestra a diferentes modos de vibración de la micropalanca

5. CONCLUSIONES Y UNA MIRADA AL FUTURO

En conjunto, todas las técnicas SPM han hecho posible el estudio con resolución atómica tanto de superficies como de diferentes objetos nanométricos, por lo que en ocasiones se le ha denominado “los ojos del nanomundo”. Las técnicas SPM están alcanzando su madurez, tras un largo desarrollo, y tienen un gran futuro por ser complementarias de otras muchas técnicas ya existentes para observar y caracterizar superficies. Esta combinación de metodologías proporciona una precisa información sobre las

propiedades de los objetos a escala nanométrica lo que ha sido determinante para el desarrollo de la nanotecnología.

Pensando en el futuro, los microscopios SPM, a pesar de los innumerables desarrollos que incorporan, necesitan seguir mejorando para profundizar en el estudio de los fenómenos que tienen lugar en la nanoescala. Entre los principales retos que deben abordar en las próximas décadas se encuentran los siguientes (Asenjo *et al.* 2022):

- Miniaturización del SPM para facilitar su integración junto con otras técnicas de análisis y caracterización.
- Mejorar la determinación conjunta de diversas propiedades en un único equipo (topográficas, eléctricas, magnéticas, mecánicas, tribológicas, etc.).
- Operar en atmósferas controladas de diferente tipo.
- Detectar nanoestructuras que están situadas bajo la superficie.
- Lograr la identificación rutinaria de las especies atómicas que se encuentran en una superficie.
- Aumentar la velocidad de adquisición de imágenes para facilitar el estudio de procesos dinámicos en diferentes rangos de temperaturas.
- Incorporar sistemas de inteligencia artificial y *big data* para analizar los datos que se obtienen en el proceso de caracterización de las superficies.
- Sin duda alguna, es mucho lo que se ha conseguido en estas cuatro décadas desde el descubrimiento del STM, pero cada hito logrado ha abierto nuevas cuestiones y plantea nuevos retos, por lo que el desarrollo de las microscopías SPM requerirá la contribución de las siguientes generaciones de científicos y científicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a J. M. García-Martín y a C. Arroyo por su trabajo e implicación en el documental *40 años viendo átomos*, que fue inspirador del presente artículo.

Notas

1. <https://plato.stanford.edu/entries/atomism-ancient/>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=pJoMtKqTOco>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asenjo, A., García, J. M. y Vázquez, M. (2001) La microscopía de fuerzas magnéticas: una técnica avanzada para la observación de dominios magnéticos, *Revista Española de Física* 15(1), 15-23.
- Asenjo, A., García-Martín, J. M. y Serena, P. A. (2022) 40 años viendo átomos, *Revista Española de Física* 36(3), 5-11.
- Baratoff, A. (1986) 1986 Nobel Prizes Development of Scanning Tunneling Microscopy, *Europhysics News* 17(11-12), 141-144 <https://www.europhysicsnews.org/articles/e pn/pdf/1986/11/e pn19861711p141.pdf>

- Baró, A. M., *et al.* (1985) Determination of surface topography of biological specimens at high resolution by scanning tunnelling microscopy, *Nature* 315(6016), 253-254. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.59.615>
- Binnig, G. and Rohrer, H. (1987) Scanning tunneling microscopy from birth to adolescence, *Reviews of Modern Physics* 59(3) Part I, 615-625. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.59.615>
- Binnig, G., and Rohrer, H. (1982) Scanning Tunneling Microscopy, *Helvetica Physica Acta* 55, 726-735.
- Binnig, G., and Rohrer, H. (1983) Surface imaging by Scanning Tunneling, *Microscopy Ultramicroscopy* 11, 157-160.
- Binnig, G., Quate, C.F., and Gerber, Ch. (1986) Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett.* 56, 930-933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch., and Weibel, E. (1982) Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, *Phys. Rev. Lett.* 49, 57-61. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.49.57>
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch., and Weibel, E. (1983) 7×7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space, *Phys. Rev. Lett.* 50, 120. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.50.120>
- Crewe, A. V., Walland, J., and Langmore, J. (1970) Visibility of Single Atoms, *Science* 168(3937), 1338-1340. DOI: 10.1126/science.168.3937.133
- Eigler, D., and Schweizer, E. (1990) Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, *Nature* 344, 524-526. <https://doi.org/10.1038/344524a0>
- Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Ann. Phys. (Leipzig)* 17, 549-560. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
- Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Bottom, *Engineering and Science*, 23 (5). 22-36. <https://calteches.library.caltech.edu/1976/>
- Haguenau, F. *et al.* (2003). Key Events in the History of Electron Microscopy, *Microscopy and Microanalysis* 9(2), 96-138. doi:10.1017/S1431927603030113
- Ireson, G. (2000) A brief history of quantum phenomena, *Phys. Educ.* 35(6), 381-386. DOI 10.1088/0031-9120/35/6/301
- Jiang, X. *et al.* (2007a) Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy, *Proc. R. Soc. A* 463, 2049-2070. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1874>
- Jiang, X. *et al.* (2007b) Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift, *Proc. R. Soc. A* 463, 2071-2099. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1873>

AGUSTINA ASENJO

Es doctora en Ciencias Físicas por la UAM e investigadora científica del ICMM-CSIC. Sus líneas de investigación se centran en el estudio de los procesos de inversión de imanación en nanomateriales y su caracterización mediante Microscopía de Fuerzas Magnéticas. Tiene 126 publicaciones, entre capítulos de libro, artículos científicos y de divulgación. Participó en más de 25 proyectos de investigación y dirigió cuatro tesis doctorales. Fue vicedirectora de Asuntos Científicos y Relaciones Internacionales del ICMM. Participa habitualmente en actividades de divulgación, en algún caso con perspectiva de género.

PEDRO A. SERENA

Es doctor en Física de la UAM e investigador científico del ICMM-CSIC. Ha trabajado en la modelización de diversos nanosistemas. Participó en más de 40 proyectos de investigación. Es autor de 99 artículos publicados en revistas internacionales y de 83 artículos de divulgación e informes de política científica-tecnológica. Dirigió cuatro tesis doctorales. Participó en tareas de coordinación de redes, de gestión científica en el CSIC y el Ministerio de Ciencia e Innovación y de formación. Es autor o coautor de 5 libros, ha organizado exposiciones, ciclos de conferencias, certámenes, etc. y ha sido guionista y presentador de series de televisión y documentales.

- Liu, J. (2021) Advances and Applications of Atomic-Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy, *Microscopy and Microanalysis* 27(5) 943-995. <https://doi.org/10.1017/S1431927621012125>
- Merzbacher, E. (2002) The Early History of Quantum Tunneling, *Physics Today* 55(8) 44-49. <https://doi.org/10.1063/1.1510281>
- Müller, E.W. (1956) Resolution of the Atomic Structure of a Metal Surface by the Field Ion Microscope, *Journal of Applied Physics* 27, 474-476. <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/27/5/474/161218/Resolution-of-the-Atomic-Structure-of-a-Metal?redirectedFrom=fulltext>
- Müller, E. W. and Bahadur, K. (1956) Field Ionization of Gases at a Metal Surface and the Resolution of the Field Ion Microscope, *Phys. Rev.* 102, 624-631. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.102.624>
- Muñoz, E. L. (2014) Evolución de los modelos atómicos hasta arribar al modelo de Bohr. Un análisis de su poder de predicción, *Revista de Enseñanza de la Física* 26(1), 53-62. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/9511>
- Pascual, J. I., *et al.* (1993) Quantum contact in gold nanostructures by scanning tunneling microscopy, *Phys. Rev. Lett.* 71, 1852-1855. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.71.1855>
- Pennycook, S., *et al.* (2006) Materials Advances through Aberration-Corrected Electron Microscopy, *MRS Bulletin*, 31(1), 36-43. doi:10.1557/mrs2006.4
- Perrin, J. (1908) L'agitation moléculaire et le mouvement brownien, *Compt. Rend. (Paris)* 146, 967-970. https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Perrin/Perrin_publi.htm
- Prakash, K., *et al.* (2022) Super-resolution microscopy: a brief history and new avenues, *Phil. Trans. R. Soc. A* 380:20210110. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0110>
- Quate, C. F. (1986) Vacuum Tunneling: A New Technique for Microscopy *Physics Today* 39(8), 26-33. <http://dx.doi.org/10.1063/1.881071>
- Serena, P. A. (2010). La nanotecnología, *Colección "¿Qué sabemos de?"* CSIC-La Catarata, Madrid.
- Serena, P. A. (2021). Nanotecnología para el desarrollo sostenible, *Colección "¿Qué sabemos de?"* CSIC-La Catarata, Madrid.
- Tersoff, J., and Hamann, D. R. (1983) Theory and application for the Scanning Tunneling Microscope, *Phys. Rev. Lett.* 50(25), 1998-2001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.1998>
- Walley, S. M. (2012). Historical origins of indentation hardness testing, *Materials Science and Technology*, 28(9-10), 1028-1044. DOI: 10.1179/1743284711Y.0000000127