

# Instituto de Física-UNAM\*

Mercedes Rodríguez Villafuerte\*\*

**RESUMEN:** El Instituto de Física (IF) de la UNAM tiene una amplia comunidad de investigación en física, siendo una institución con un sólido prestigio a nivel nacional e internacional. Por más de siete décadas, ha sido impulsor de diversos centros de investigación en física en México y jugado un papel significativo en la formación de recursos humanos altamente especializados. Actualmente, más del 25% de su planta académica realiza investigación básica y aplicada en nanociencias y nanotecnología (NyN), organizada en alrededor de 17 grupos de investigación con contribuciones tanto teóricas como experimentales, haciendo del IF una institución líder en este ramo. Los académicos experimentales desarrollan actividades de síntesis, caracterización y aplicaciones de nanomateriales en más de 20 laboratorios con técnicas experimentales muy diversas, con equipamiento sofisticado y de vanguardia. Por otro lado, las líneas de investigación teóricas han producido resultados extremadamente novedosos. En este documento se describen a detalle las líneas de investigación, las técnicas tanto teóricas y experimentales cultivadas por nuestros académicos, la infraestructura en equipamiento y laboratorios, la amplia gama de colaboraciones tanto nacionales como internacionales, así como fuentes de financiamiento para los proyectos de investigación. También se mencionan los logros del Instituto de Física en el área de NyN que incluyen: la publicación de artículos científicos en revistas de alto impacto internacional, los cuales reciben permanentemente un gran número de citas; la formación de recursos humanos, difusión y divulgación de la ciencia, la invitación frecuente para participar en comités científicos de congresos de gran prestigio internacional, además de recibir distinciones y premios.

**PALABRAS CLAVE:** Instituto de Física, investigación básica y aplicada, nanomateriales, laboratorios, colaboraciones.

**ABSTRACT:** The Institute of Physics (IF) at UNAM has a large community of research in physics, being an institution with a solid national and international prestige. For more than seven decades, it has been driving various physics research centers in Mexico and played a significant role in the training of highly specialized human resources. Currently, more than 25% of its academic staff conducts basic and applied research in nanoscience and nanotechnology (N&N), organized in about 17 research groups with both theoretical and experimental contributions, making the IF a leading institution in this field. Experimental researchers carry out synthesis, characterization and applications of nanomaterials in more than 20 laboratories with a wide range of experimental techniques and sophisticated and cutting edge equipment. Moreover, theoretical research lines have produced extremely novel results. This document describes in detail the research, the theoretical and experimental techniques cultivated by our researchers, our infrastructure (equipment and laboratories), the wide range of national and international collaborations, as well as sources of funding for research projects. Our achievements in the

---

Recibido: 31 de marzo de 2016. Aceptado: 25 de abril de 2016.

\* Se agradece a los académicos del IF que proporcionaron la información para la elaboración de este documento. A la maestra Victoria Silva por su ayuda en la organización de la información.

\*\* Secretaria Académica del IFUNAM, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México, México. Correspondencia: (sac-if@fisica.unam.mx) Tel.: +52 (55) 5622-5034.

N&N area include: the publication of scientific articles in high impact international journals, which permanently receive a large number of citations; the training of human resources, dissemination and popularization of science, the frequent invitation to participate in scientific committees of congresses of international prestige, as well as being recipients of honors and awards.

**KEYWORDS:** Institute of Physics, basic and applied research, nanomaterials, laboratories, collaborations.

## Introducción

Creado en 1939, el Instituto de Física (IF) ha madurado para convertirse en una comunidad de investigación en física importante en el país, con un sólido prestigio internacional y con un indiscutible papel en la formación de recursos. Tiene como misión realizar investigación en física y áreas afines, formar recursos humanos a través de la docencia y la preparación de investigadores y especialistas de alto nivel, difundir nacional e internacionalmente los conocimientos que genera, e impulsar la vinculación de la ciencia con otras actividades culturales, intelectuales y productivas del país.

El IF (figura 1) ha desempeñado un papel prominente en el desarrollo científico universitario y nacional. En la UNAM dio origen a los Institutos de Investigaciones en Materiales (1967), de Nanociencias y Nanotecnología (originalmente Centro de Ciencias de la Materia Condensada, 1997) y de Ciencias Físicas (1998), así como al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (2002). También ha contribuido a la formación de instituciones externas a la UNAM, como el Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato, el Centro de Investigación de Física de la Universidad de Sonora y el

**FIGURA 1.** Instituto de Física, UNAM.



Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

En la actualidad, nuestra planta académica se integra de un total de 177 miembros, de los cuales 127 corresponden a investigadores y 50 a técnicos académicos. Una fracción importante de los académicos (34 investigadores y 16 técnicos académicos) realiza investigación básica y aplicada en NyN. Aunque el IF tiene una larga tradición de investigación en NyN, desde inicios de la década de 1980, no fue sino hasta el 2004 cuando los diferentes grupos de investigación se organizaron para formar la Red de Grupos de Investigación en Nanociencia (REGINA) de nuestro insti-

tuto. El principal objetivo de REGINA fue promover la colaboración entre grupos de investigación del IF en el tema de nanociencia, con el fin de generar proyectos interdisciplinarios y optimizar el uso de equipo experimental y sistemas de cómputo. Desde entonces, se ha mantenido la organización de eventos académicos de manera coordinada tomando en cuenta los intereses de los grupos de investigación. Adicionalmente, REGINA fue también un antecedente fundamental para la creación de la Red Temática de Nanociencias y Nanotecnología del CONACyT.

## Líneas de investigación, desarrollo e innovación relacionadas con la NyN

A lo largo de los años, el Instituto de Física se ha posicionado como una institución líder en las áreas de NyN. Sus contribuciones desde el punto de vista teórico han sido tan novedosas como aquellas obtenidas utilizando técnicas experimentales. A la fecha se pueden identificar los siguientes grupos de investigación (entre paréntesis se indican los investigadores involucrados). En algunos de ellos existe una afortunada sinergia entre investigadores teóricos y experimentales:

- Caracterización y propiedades ópticas de nanoestructuras (Cecilia Noguez, Alejandro Reyes, Carlos Villagómez, Giuseppe Pirruccio).
- Crecimiento y caracterización de nanopartículas por implantación de iones (Alicia Oliver, Jorge Rickards, Juan C. Cheang, Luis Rodríguez, Alejandro Crespo, José L. Ruvalcaba, Alejandro Reyes, Erick Flores, Edgar Casanova).
- Física computacional de nanomateriales (Ignacio Garzón, Luis A. Pérez, Lauro Paz).
- Microfluídica y biosistemas a nanoescala (Rafael Barrio).
- Microscopía electrónica de nanoestructuras (Patricia Santiago, Jesús Arenas, José Reyes, Dwight R. Acosta).
- Modelos de nanoalambres y transistores de materiales bidimensionales (Gerardo G. Naumis).
- Nanocatálisis computacional *ab initio* (Lauro Paz).
- Nanoestructuras fotónicas y fotoeléctricas (Arturo Rodríguez, Jesús Arenas, Margarita Rivera).
- Nanofotónica de geles (Jorge García).
- Nanosistemas para transporte y liberación de fármacos y radionúclidos (Luis A. Medina).
- Orden atómico local en nanocristales (Xim Bokhimi).
- Películas delgadas nanoestructuradas (Dwight R. Acosta, Arturo Rodríguez).
- Propiedades ópticas de nanocompositos (Rubén Barrera, Cecilia Noguez).

- Propiedades ópticas de nanoestructuras de impurezas en cristales inorgánicos (Héctor Murrieta, José M. Hernández, Enrique Camarillo).
- Propiedades ópticas de nanomateriales (Raúl Herrera).
- Síntesis y caracterización de grafeno (Laura Serkovic, Dwight R. Acosta).
- Sistemas nanoestructurados con aplicación en catálisis (Gabriela Díaz).

## Laboratorios del IF que realizan investigación en NyN

A lo largo de más de 70 años de sostenido y arduo trabajo, el Instituto de Física ha desarrollado una importante infraestructura de laboratorios en los cuales se cultivan una gran diversidad de técnicas experimentales. A continuación se presenta una lista de los laboratorios que realizan investigación en NyN.

- Acelerador Pelletron.
- Espectroscopía Óptica de Átomos y Moléculas Individuales en Superficies.
- Física Médica e Imagen Molecular, Unidad de Investigación Biomédica en Cáncer INCan/IF.
- Fotónica de Geles.
- Laboratorio Central de Microscopía.
- Laboratorio Experimental de Grafeno.
- Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC).
- Magnetómetro SQUID.
- Materiales Avanzados.
- Materiales Nanoestructurados.
- Nanociencia Computacional.
- Nanoestructuras Fotónicas y Fotoeléctricas.
- Nanoestructuras Ordenadas.
- Nanofotónica Avanzada.
- Nanomateriales Magnéticos.
- Óptica de Superficies.
- Óptica Lineal.
- Películas Delgadas y Recubrimientos.
- Propiedades Catalíticas de Nanomateriales.
- Refinamiento de Estructuras Cristalinas (LAREC).
- Síntesis de Nanoestructuras.
- Síntesis Virtual.

Algunos de estos laboratorios se han ido mejorando y fortaleciendo con tecnología de punta. Otros son de muy reciente creación, teniendo como

responsables a investigadores jóvenes que ingresaron a través del Programa de Renovación de la Planta Académica de la UNAM, o bien, a través de Cátedras CONACyT.

## Líneas de investigación

Las líneas de investigación cultivadas en el IF en NyN son muy diversas y se pueden agrupar en dos grandes rubros: modelos teóricos y desarrollos experimentales. Para el desarrollo del trabajo experimental se cuenta con técnicas y equipamiento especializado para la síntesis de nanomateriales y su caracterización.

### Modelos teóricos

Dentro de los desarrollos teóricos que realizan nuestros investigadores se pueden mencionar los siguientes:

- Acoplamiento fuerte entre luz y materia.
- Dinámica molecular clásica.
- Estudio de la forma, tamaño, medio ambiente, composición, e interacción de nanopartículas, nanotubos y superficies, con el fin de entender y predecir sus propiedades electrónicas, ópticas, entre otras propiedades físicas y químicas, combinando teorías de primeros principios, semiempíricas y de la electrodinámica, así como desarrollando e implementando nuevos métodos computacionales para este fin.
- Estudio de la modificación de la emisión de moléculas acopladas a nanoestructuras fotónicas resonantes.
- Estudio de la transferencia de calor en nanoestructuras.
- Estudio de las propiedades ópticas de nanoestructuras a través de simulaciones a elementos finitos, *discrete dipole approximation* y representación espectral.
- Fenómenos de emisión de luz por las transiciones electrónicas en capas atómicas inducidos por los procesos en colisiones ion-átomo así como ion-sólido.
- Fenómenos físicos en la creación de defectos y daños en matrices dieléctricas y semiconductoras debido a los procesos de colisiones ion-sólido en materiales bajo la irradiación con iones.
- Métodos de búsqueda de estados de transición (Nudge Elastic Band, NEB).
- Métodos de optimización: Basin-Hopping Monte Carlo y Algoritmos Genéticos.
- Microfluídica y biosistemas a nanoescala.
- Modelado de cúmulos atómicos de superconductores de H<sub>2</sub>S.

- Modelado de cúmulos de clatrato de metano.
- Modelado de la distribución atómica de soportes catalíticos: alúmina, titania y grafeno.
- Modelados de cúmulos atómicos soportados en titania, alúmina y grafeno.
- Modelo para la generación de segundo armónico en películas sol-gel de  $\text{SiO}_2$  con cromóforos.
- Modelos de nanoalambres y transistores de materiales bidimensionales como grafeno, disulfuro de molibdeno, nitruro de boro y fosforeno.
- Nanoestructuras metálicas quirales.
- Refinamiento de estructuras cristalinas por el método de Rietveld de sistemas nanoestructurados, principalmente catalizadores soportados.
- Técnicas de inteligencia artificial en problemas de la física y la química. Por ejemplo, para reducir los tiempos empleados en los cálculos moleculares, o para validar el significado físico de algunos de los parámetros que se emplean en el refinamiento de las estructuras cristalinas.
- Teoría del funcional de la densidad dependiente del tiempo (DFT).

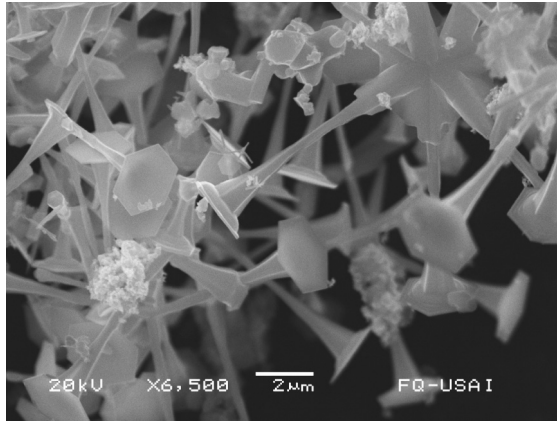
## Síntesis de nanomateriales

Un número importante de laboratorios del IF realizan síntesis de nanomateriales a través de las siguientes técnicas: rociado químico neumático y ultrasónico, erosión catódica (magnetron sputtering DC y RF), sol-gel y en sus modalidades *dip coating* y *spin coating*, electro-depósito, baño químico, pulverización catódica, reducción química, métodos utilizando tensoactivos, implantación de iones y, en los próximos meses, también contaremos con litografía electrónica y depósito químico en fase vapor (CVD).

En este rubro se desarrollan las siguientes líneas de investigación:

- Arreglos ordenados de nanoestructuras metálicas con propiedades plasmónicas mediante la técnica de litografía por nanoesferas (NSL), basada en el uso de monocapas autoensambladas de partículas esféricas de sílice usadas como máscaras litográficas.
- Au, Pt, Rh, Re soportados en rutilo.
- Confinamiento 2D: películas delgadas metálicas normales y percoladas. Contactos conductores transparentes basados en óxido de zinc. Películas delgadas de materiales orgánicos y pigmentos con alta deslocalización electrónica.
- Confinamiento 3D: puntos cuánticos de silicio embebidos dieléctricos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ). Nanocúmulos de oro ( $\text{Ø} \approx 5\text{nm}$ ) uniformemente distribuidos sobre sustratos transparentes.

**FIGURA 2.** Microestructuras de ZnO crecidas sobre grafito para aplicaciones en sistemas semiconductores. (Cortesía de Patricia Santiago).



- Construcción de microcanales nanoestructurados.
- Deformación de partículas coloidales mediante la irradiación iónica, principalmente para desarrollar modificar las características de las máscaras para litografía.
- Esferas de Bi metálico con aplicaciones en la liberación de fármacos.
- Grafeno por depósito químico en fase vapor (CVD).
- Materiales conductores transparentes (óxidos metálicos, grafeno, polímeros) en configuración de películas delgadas (figura 2).
- Nanoestructuras de alúmina.
- Nanomateriales con morfología definida a base de  $\text{CeO}_2$ .
- Nanopartículas metálicas por métodos físicos (pulverización catódica) y químicos (reducción química).
- Óxido de grafeno.
- Óxidos de metales nobles, hierro y tierras raras.
- Óxidos nanoestructurados como soportes catalíticos.
- Películas de polímeros y de óxidos metálicos mesoestructurados empleando tensoactivos.
- Películas orgánicas conductoras.
- Perovskitas híbridas nanoestructuradas.
- Síntesis controlada de estructuras micro y nanométricas por medio de la implantación de diversos tipos de iones (metales, semiconductores) en matrices dieléctricas.
- Síntesis de materiales mediante la difusión asistida bajo irradiación con iones de alta energía.
- Sistemas unidimensionales basados en Pentóxido de Vanadio con aplicaciones a baterías recargables.
- Titania nanoestructurada.

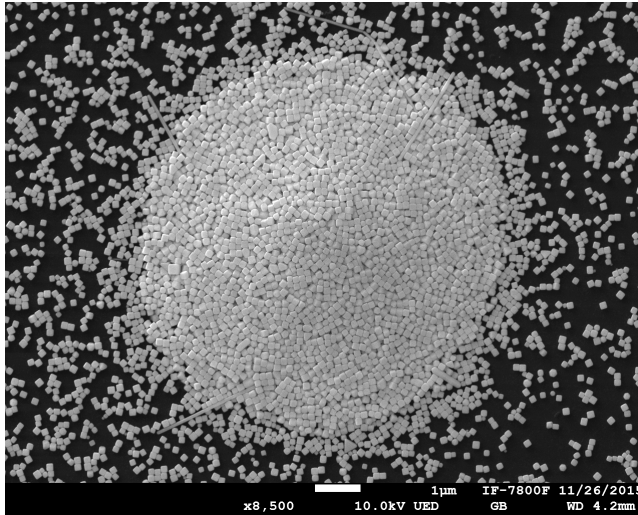
## Caracterización de nanomateriales

Las líneas de investigación desarrolladas en el IF para la caracterización de nanomateriales son las siguientes:

- Acoplamiento de dos y cuatro ondas.
- Birrefringencia.
- Caracterización eléctrica y magnética de estructuras 1D, 2D y 3D mediante:
  - Mediciones de Efecto Hall.
  - Mediciones de voltaje-corriente mediante métodos de 2 y 4 puntas.
- Caracterización espectroscópica de la reactividad de nanopartículas metálicas soportadas.
- Caracterización microestructural de estructuras 1D, 2D y 3D mediante:
  - Difracción de rayos X.
  - Microscopía electrónica de transmisión en sus diversas modalidades de operación (TEM campo claro, HRTEM, difracción electrónica, HAADF, EELS, entre otras).
- Caracterización morfológica de estructuras 1D, 2D y 3D mediante:
  - Microscopía electrónica de barrido (SEM).
  - Microscopía de fuerza atómica (AFM).
- Caracterización óptica de estructuras 1D, 2D y 3D mediante:
  - Espectroscopía ultravioleta y visible.
  - Espectroscopía de fluorescencia con excitación láser.
- Caracterización química de estructuras 1D, 2D y 3D mediante:
  - Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS).
  - Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS).
- Caracterización química de materiales orgánicos naturales y sintéticos en bienes culturales.
- Corrientes termo-estimuladas (ITC).
- Elipsometría para determinar índice de refracción complejo y espesor de películas delgadas; medición de la extinción, reflexión, emisión luminiscente de muestras nanoestructuradas.
- Espectroscopía óptica de átomos y moléculas individuales en superficies por medio del microscopio de efecto túnel y fuerza atómica no contacto (STM/AFM-NC).
- Estructura cristalina de materiales a la nanoescala, nanopartículas bimetalicas, catalizadores heterogéneos, películas delgadas (figura 3).
- Espectroscopías por:
  - Absorción óptica.
  - De electrones por pérdida de energía.
  - Raman.
  - UV-Vis-IR.



**FIGURA 3.** Nanopartículas cúbicas de Ag, sintetizadas por métodos químicos y observada en el SEM 7800 FEG. (Cortesía de Gabriela Díaz).



- Fotoconductividad.
- Fotoluminiscencia y fluorescencia.
- Generación de segundo armónico.
- Medición de vidas medias de estados excitados.
- Parámetro de orden.
- Propiedades electrocromáticas y termocromáticas.
- Propiedades fotoquímicas de películas delgadas ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$ , entre otras).
- Propiedades magnéticas de nanomateriales.
- Propiedades ópticas (lineales y no lineales), plasmónicas (absorción óptica, Raman-SERS), electrónicas y estructurales de nanopartículas metálicas y semiconductoras en matrices dieléctricas.
- Termoluminiscencia (TL).
- Z-scan.

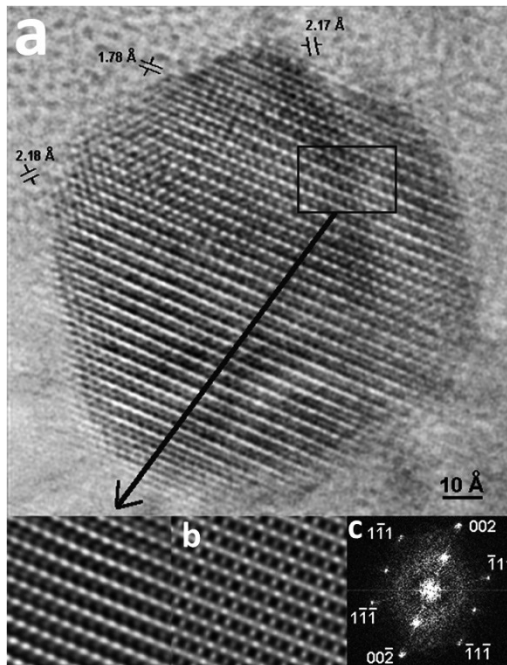
## Aplicaciones

Las líneas de investigación tanto teóricas como experimentales mencionadas previamente tienen como objetivo su aplicación en las siguientes áreas:

- Electrónica y nuevos materiales usando sistemas atómicos bidimensionales.
- Apoyar y proponer medidas para la prevención, preservación, intervención y mantenimiento del patrimonio cultural mediante el desarrollo de nuevos materiales nanoestructurados.

- Catálisis heterogénea, celdas de combustible, sistemas de control de emisiones (figura 4).
- Catalizadores para mejoramiento del ambiente.
- Celdas solares orgánicas.
- Convertidores ópticos.
- Desarrollo de estructuras y/o dispositivos basados en arreglos ordenados de estructuras metálicas a escala nanométrica mediante la técnica de litografía por nanoesferas (NSL). Explorar las posibles aplicaciones de estos arreglos ordenados como dispositivos plasmónicos o como sustratos para la espectroscopía Raman-SERS a la escala nanométrica.
- Desarrollo de dispositivos plasmónicos a partir de nanopartículas metálicas embebidas en matrices dieléctricas como sílice y zafiro.
- Desarrollo de guías de onda activas con respuesta a la longitud de onda y estado de polarización de la luz.
- Detección de mínima concentración de moléculas mediante SERS.
- Dispositivos de almacenamiento de información (CDs, DVDs, etc.).
- Dispositivos fotovoltaicos y sensores (químicos, físicos y biológicos).
- Fabricación de láminas de iluminación artificial basadas en silicio nanoestructurado.
- Fabricación de sensores ópticos (basados en estructuras plasmónicas).
- Flujos en capilares biológicos, estudio de propiedades mecánicas de membranas, liposomas y bacterias.
- Funcionalización de nanopartículas de oro (AuNP) para reconocimiento específico de receptores de células tumorales.
- Iluminación de estado sólido, fotodetectores basados en grafeno.
- Implementación de capas *down-conversion* para la mejora en eficiencia de celdas solares (orgánicas y silicio nanoestructurado).
- Lentes dinámicas.
- Limitadores ópticos.
- Liposomas como vectores de transporte de nanopartículas de magnetita para estudios de hipertermia en modelos tumorales.
- Materiales para teranóstica.
- Nanocatalizadores para control de contaminación ambiental (NO, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>), producción de hidrógeno (a partir de alcoholes) y purificación de hidrógeno (reacción PROX).
- Nano-óptica y nano-electrónica.
- Nanopartículas mono y bimetálicas con aplicación en química fina.
- Producir materiales cromogénicos para ahorro y producción de energía (ventanas inteligentes electrocrómicas y termocrómicas).
- Remediación ambiental (fotodegradación de contaminantes orgánicos).

**FIGURA 4.** a) Imagen obtenida por HRTEM de una nanopartícula bimetálica de NiPt; b) simulación de imagen con software simulaTEM, y, c) transformada de Fourier. Aplicación en catálisis heterógena. (Cortesía de Jesús Arenas).



- Semiconductores, baterías recargables y liberación de fármacos (funcionalización de proteínas).
- Transistores orgánicos.

## Financiamiento de la investigación en NyN

Existen diferentes fuentes para el financiamiento de la investigación en NyN a las cuales recurren nuestros académicos, las más importantes de los últimos cinco años se listan a continuación:

- Financiamiento de la UNAM
- Instituto de Física.
- Coordinación de la Investigación Científica.
- Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM.
- Convenio de Colaboración Académica, Científica y Cultural entre la UNAM y la Università degli Studi di Padova, Italia.
- Financiamiento – Nacional

- Centro de Investigación en Polímeros.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), convocatorias de:
  - Apoyo al Fortalecimiento y Desarrollo de la Infraestructura Científica y Tecnológica.
  - Apoyos Complementarios para el Establecimiento y Consolidación de Laboratorios Nacionales.
  - Apoyos Complementarios para la Adquisición de Equipo Científico.
  - Cátedras CONACyT para Jóvenes Investigadores.
  - Ciencia y Tecnología para la Capital del Conocimiento.
  - Colaboración Científica Internacional en Investigación en la Ciencia de Materiales.
  - Desarrollo Tecnológico e Innovación.
  - Fondo Sectorial CONACyT SENER Sustentabilidad Energética.
  - Fondo Sectorial de Investigación en Salud y Seguridad Social SS-IMSS-ISSSTE-CONACyT.
  - Integración de Redes Temáticas CONACyT de Investigación.
  - Investigación Ciencia Básica.
  - Investigación en Fronteras de la Ciencia.
  - Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica.
  - Programa de Estímulos a la Investigación.
  - Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales.
  - Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal.
  - Fondo de Fomento al uso de Tecnologías de Punta en la Investigación Científica y Tecnológica del D. F.
  - Secretaría de Relaciones Exteriores.
  - Financiamiento – Internacional
  - Air Force Office of Scientific Research (AFOSR), EUA.
  - Conjunta ANR – CONACyT.
  - Conjunta CONACyT – CNPq México Brasil en Nanotecnología.
  - Conjunta México – Comisión Europea de Proyectos de Nanociencias como Nanomateriales.
  - Cooperación Bilateral Científica y Tecnológica (Argentina, Alemania, Italia).
  - University of California Institute for Mexico and the United States (UCMEXUS) – CONACyT.

Adicionalmente, también se cuenta con recursos extraordinarios provenientes de la prestación de servicios, por ejemplo del LCM, LAREC y LANCIC.

## Colaboraciones

Las colaboraciones de nuestros académicos son muy dinámicas y se realizan con investigadores de universidades y centros de investigación nacionales e internacionales.

### Nacionales - Dependencias de la UNAM

- Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.
- Centro de Nanociencias y Nanotecnología.
- Facultad de Ciencias.
- Facultad de Química.
- Instituto de Ciencias Nucleares.
- Instituto de Geofísica.
- Instituto de Investigaciones en Materiales.
- Instituto de Química.

### Nacionales – Externas a la UNAM

- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional.
- Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional
- Centro de Investigaciones en Óptica, CONACyT.
- Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional.
- Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Instituto Nacional de Bellas Artes.
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Universidad Autónoma de Morelos.
- Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa y Azcapotzalco.
- Universidad de Sonora.

## Internacionales

- Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales, Francia.
- Centro Atómico Bariloche, Argentina.

- Chalmers University of Technology, Suecia.
- Commisariat d'Énergie Atomique, Francia.
- Cooperación Latino Americana de Redes Avanzadas (Red Clara).
- Dutch Institute for Fundamental Energy Research DIFFER, Holanda.
- Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes, Venezuela.
- Facultad de Física, Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima, Perú.
- Harvard University, EUA.
- Institut Jean Lamour, Francia.
- Instituto de Tecnología en Química, Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- Kings College London, Reino Unido.
- Penn State University, EUA.
- Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPiQUI, Argentina.
- Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, EUA.
- Universidad de Arkansas, EUA.
- Universidad de Barcelona, España.
- Universidad de California, EUA.
- Universidad de la Habana, Cuba.
- Universidad de Padua, Italia.
- Universidad de Sevilla, España.
- Universidad de Texas, San Antonio, EUA.
- Universidad George Mason, EUA.
- Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú.
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.
- Universidad Pierre et Marie Curie - Paris VI, Francia.
- Universidad Técnica del Altiplano de Puno, Perú.
- University College London, Reino Unido.
- University of British Columbia, Canadá.
- University of North Carolina, EUA.

## Infraestructura

Los laboratorios del IF cuentan con equipos muy diversos para realizar tanto la síntesis como la caracterización y sus aplicaciones de los nanomateriales listados en este documento. En esta sección se menciona la infraestructura que, por su costo y complejidad, se considera de mayor relevancia.

El Laboratorio Central de Microscopía (LCM) del IF es una unidad de servicios que apoya proyectos de investigación (internos y externos) en el estudio de nanomateriales, empleando diversas técnicas de microscopía de alta resolución. El LCM tiene actualmente en operación los microscopios listados en la tabla 1.

**TABLA 1.** Microscopios en operación en el Laboratorio Central de Microscopía del IF .

DESCRIPCIÓN	RESOLUCIÓN ESPACIAL	ACCESORIOS
Microscopio electrónico de transmisión JEOL TEM JEM-2010FEG	0.19 nm	Microsonda para realizar análisis por (espectroscopía de energía dispersiva) EDS y cámara para capturar patrones de difracción.
Microscopio de fuerza atómica JEOL JSPM4210	0.01 Å vertical 0.1 Å horizontal	Las muestras se pueden trabajar a presión atmosférica y hasta una presión de $10^{-6}$ torr.
Microscopio electrónico de barrido JEOL FE SEM 7800F	0.7 nm	Detectores de electrones secundarios y retrodispersados, además de una microsonda para realizar análisis por EDS.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el LCM cuenta con una área exclusiva para preparación de muestras en donde, en años recientes, se realizó una inversión importante para la compra de equipo que incluye un micrótopo, un desecador de punto crítico, un limpiador de plasma e instrumental menor.

La infraestructura más relevante para la implantación de iones con la que cuenta nuestro instituto es el acelerador Tandem Pelletron modelo 9SDH-2 de la National Electrostatics Corporation, el cual inició operaciones en 1995. Se trata de un acelerador electrostático de 3 MV capaz de acelerar una gran variedad de iones (con energías entre 2 y 30 MeV dependiendo del tipo de ion y de su carga) para la formación de nanopartículas en atmósferas limpias.

El Laboratorio de Refinamiento de Estructuras Cristalinas (LAREC) se especializa en el análisis de la distribución atómica de los materiales. LAREC cuenta con un difractor de rayos X modelo D8-Discovery de la marca Bruker, con blancos de molibdeno y cobre. Además, tiene configuraciones de medición en reflexión y transmisión con haz monocromático de molibdeno. En ambas configuraciones la muestra puede estar a temperaturas entre la ambiente y los 1000 °C.

El Laboratorio de Propiedades Catalíticas de Nanomateriales cuenta con espectrofotómetros FTIR (infrarrojo medio), Nicolet Nexus 470 y Nicolet-Thermo i50 con detector MTC-A; celda DRIFT para el seguimiento de reacciones heterogéneas gas-sólido, atmósfera controlada y posibilidad de calentamiento; un espectrómetro de masas (tipo cuadrupolo) Hiden-HPR 20; un analizador Autosorb 1MP Quantachrome para determinación de área específica, volumen y distribución de tamaño de poro.

El Instituto de Física instaló, desde hace varios años, una unidad para el desarrollo de proyectos relacionados con la física médica en las instalaciones del Instituto Nacional de Cancerología (INCan). En dicha unidad se desarrollan nanoesferas lipídicas para terapia de cáncer, con equipamiento

sofisticado que incluye un sistema trimodal de imagen microPET/SPECT/CT (Albira, Oncovisión).

El Laboratorio de Materiales Avanzados tiene un microscopio confocal con micro Raman, que cuenta con tres láseres con longitudes de onda de 520, 630 y 720 nm, además de un nano Zetasizer NZ 3600 marca Malvern, con resolución en tamaño de partícula de 0.6 nm.

En los últimos 5 años el Laboratorio de Espectroscopía Óptica de Átomos y Moléculas Individuales en Superficies ha venido diseñando y desarrollando un microscopio de efecto túnel y de fuerza atómica de no contacto que opere en condiciones de ultra alto vacío y a baja temperatura, y que además esté acoplado a un sistema de espectroscopía Raman. El sistema permitirá, en un futuro cercano, el control a nivel de un sólo átomo o molécula, con lo que será posible investigar y experimentar con átomos y moléculas individuales adsorbidos en superficies atómicamente planas metálicas, semiconductoras y aislantes.

El Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC) es un nuevo laboratorio interdisciplinario multisede inaugurado en 2015 en el cual se cuenta con un espacio específico dotado de más de quince espectrómetros especializados para la caracterización no destructiva *insitu* poner cursiva mediante técnicas espectroscópicas portátiles y novedosos métodos de imagen multiespectral.

Por último, en el 2015 se inició la instalación de Magnetómetro tipo SQUID (*Superconducting quantum interference device*) MPMS3 de la marca Quantum Design con sensibilidad  $\leq 10^{-8}$  emu y un licuefactor de He, los cuales permitirán realizar investigación de frontera en materiales magnéticos.

Desde el punto de vista de infraestructura para desarrollar modelos computacionales, es importante mencionar que el IF cuenta con laboratorios de supercómputo que incluyen cuatro clústers y dos estaciones de trabajo con GPU's, cuyas características se presentan a continuación:

Mingus: 5 nodos, 1 maestro y 4 esclavos, 176 núcleos en total, 360 GB de RAM, 20 TB de almacenamiento y GPU Tesla M2090.

Ellington: 32 cores en total, 64 GB de RAM, 0.5 TB de almacenamiento y 2 GPU Tesla C2075.

Coltrane: 8 núcleos en total, 6 GB de RAM y 0.5 TB de almacenamiento.

Baktum: 5 nodos, 1 maestro y 4 esclavos, 128 núcleos en total, 2 TB de RAM y 2 TB de almacenamiento.

Estos clústers usan en su mayoría las siguientes aplicaciones: Matlab, Mathematica, Maple, NwChem, BLACS, Scalapack, COMSOL y SIESTA. Adicionalmente, un número importante de nuestros investigadores que trabajan en NyN tiene acceso a los recursos de la supercomputadora HP Cluster Plataform 3000SL "Miztli" de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, UNAM, la cual cuenta con 5,312 núcleos de procesamiento, 23,000 GB de RAM y 225 TB de almacenamiento.



## Instrumentos de protección intelectual

Al momento de elaborar este documento se tiene solicitada la patente “Proceso para la preparación de catalizadores de paladio y platino soportados en óxidos nano-estructurados para convertidores catalíticos”, con identificador MX/a/2010/012921, la cual se elaboró en colaboración con el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM. Se ha dado respuesta al primer requerimiento.

## Docencia y formación de recursos humanos

Los académicos del IF que realizan investigación en NyN tienen una participación destacada en la licenciatura en física de la Facultad de Ciencias, así como en los posgrados en ciencias físicas y en el de ciencias e ingeniería de materiales de la UNAM. Esta labor se ha ampliado en los últimos años con la participación activa de nuestros académicos en otras facultades (por ejemplo de Ingeniería o Química) y otros posgrados (ingeniería, ciencias químicas, etc.). Estas actividades involucran clases frente a grupo, supervisión de servicios sociales, dirección de tesis de licenciatura y posgrado. También supervisan a investigadores posdoctorales.

La alta calidad de las tesis dirigidas ha producido una cantidad importante de premios otorgados a nuestros graduados que incluyen: la Medalla Alfonso Caso, UNAM; los Premios Weizmann a las mejores tesis doctorales en el área de Ciencias Exactas de la Academia Mexicana de Ciencias, así como el Premio IIM-UNAM a la Mejor Tesis Doctoral en el Área de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

## Principales logros

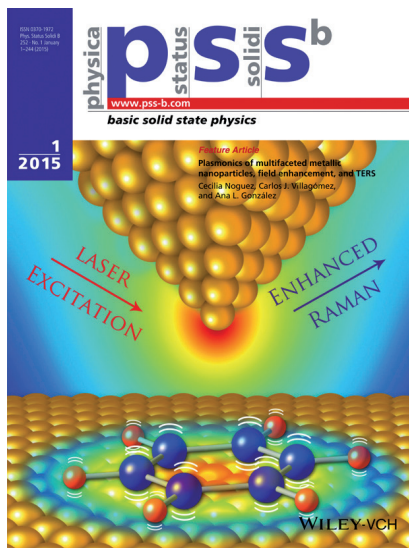
Los logros obtenidos por nuestros académicos en el área de NyN son muy amplios, pues no sólo involucran la publicación de artículos científicos en revistas de alto prestigio internacional (figura 5), sino también aportaciones significativas en el área de formación de recursos humanos, difusión y divulgación de la ciencia.

A continuación se mencionan algunas de las publicaciones más relevantes en NyN de los últimos cinco años. Destacan publicaciones en prestigiosas revistas como *Nano Letters*, *ACS Nano*, *Nanoscale*, *Journal of Physical Chemistry Letters* y *Fuel*, con factores de impacto de 13.6, 12.1, 7.4, 7.29, 3.9, respectivamente.

“Plasmonic nanobilliards: Controlling nanoparticle movement”, publicado en *Nano Letters* (11-8, 3398, 2011), discute la posibilidad de manipular a voluntad la agregación o segregación de nanopartículas utilizando fuerzas inducidas por un haz de electrones.

En “Electromagnetic field enhancement for wedge-shaped metal nanos-

FIGURA 5. Portada en la revista *Physica Status Solidi B* tomada del artículo “Plasmonics of multifaceted metallic nanoparticles, field enhancement and TERS” (252-1, 56–71, 2015).



estructuras” se demuestra, utilizando una teoría cuasiestática, la importancia de las resonancias de plasmones superficiales localizadas cerca de la superficie de una cuña de plata o de oro (*J. Phys. Chem. Letters*, 2-16, 1978, 2011).

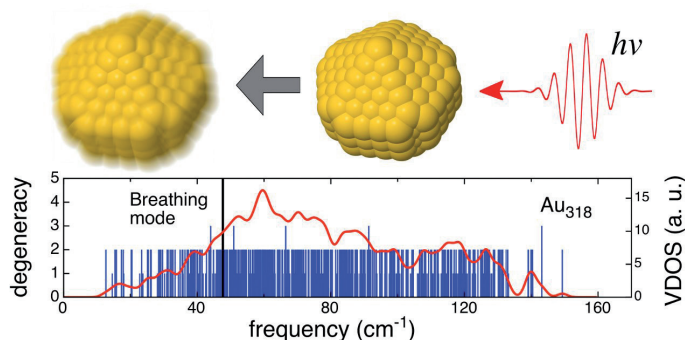
El artículo “Methane oxidation over Pd catalysts supported on binary  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  oxides prepared by sol-gel method” reporta el efecto del contenido de lantana en las propiedades del paladio soportado en óxidos mixtos alumina-lantana para la oxidación de metano (*Fuel*, 93, 136-41, 2012).

En “Propagation of electromagnetic waves in stochastic helical media” se propone una descripción estocástica de medios quirales electromagnéticos (*Phys. Rev. E* 86(3-1), 031702, 2012).

En otra colaboración teórico-experimental internacional (“Vibrational properties of metal nanoparticles: Atomistic simulation and comparison with time-resolved investigation”, *J. Phys. Chem.* 116, 25147, 2012) se presentan varios resultados teóricos novedosos de las propiedades vibracionales de nanopartículas metálicas de hasta 4 nm obtenidos con métodos de simulación atomísticos que se comparan de forma excelente tanto con datos experimentales como con resultados de un modelo de medio continuo.

El trabajo publicado en la prestigiosa revista *ACS Nano*, “Optical activity of achiral ligand SCH3 adsorbed on achiral Ag-55 clusters: Relationship between adsorption site and circular dichroism”, (7-1, 513, 2013) reporta el espectro del dichroismo circular electrónico de una molécula de  $\text{SCH}_4$  en diferentes sitios de una nanopartícula formada con 55 átomos de plata con simetría icosaédrica utilizando la teoría del funcional de la densidad dependiente del tiempo.

**FIGURA 6.** Cálculos teóricos y experimentos recientes confirman la existencia y activación del modo de vibración radial (respiración) en nanopartículas de oro de tamaño 2-4 nm. (Cortesía de Ignacio Garzón).



Otro artículo en una revista de muy alto impacto fue el trabajo en *Nanoscale*, “Metallic influence on the atomic structure and optical activity of ligand-protected nanoparticles: A comparison between Ag and Au” (6-6, 3325-34, 2014). Recientemente también se publicó un reporte invitado en *Physica Status Solidi B* al cual se le concedió la portada de la revista (“Plasmonics of multifaceted metallic nanoparticles, field enhancement and TERS”, 252-1, 56-71, 2015).

El grupo de Propiedades Ópticas de Nanomateriales publicó recientemente en *Nano Letters* (16-3,1568-73, 2016) y *Nanoscale* (7, 20734-42, 2015). En la primera de ellas se reporta la síntesis y caracterización estructural de nanoalambres helicoidales de oro-cobre con diámetros menores de 10 nm, mientras que en la segunda se reporta la producción eficiente y caracterización de nanoestrellas pentagonales de oro-cobre, con aplicaciones potenciales en biomedicina y catálisis.

Con respecto a investigaciones sobre grafeno deformado, se han propuesto ecuaciones correctas que describen sus propiedades electrónicas y se han calculado sus propiedades ópticas. Por otro lado, se ha utilizado simetría subyacente para explicar las propiedades del grafeno dopado y se ha demostrado la existencia de una pseudobrecha así como de modos fractales. Estos estudios han logrado varios reconocimientos a nivel internacional, como la reciente invitación a escribir un artículo de revisión sobre grafeno deformado en la prestigiosa revista *Reports in Progress Physics* con factor de impacto de 15.6.

A lo largo de los años se ha hecho un avance sistemático en el entendimiento y explicación del origen de la quiralidad en cúmulos metálicos con y sin protección de ligandos orgánicos. Asimismo, se han realizado descubrimientos y predicciones de nuevas propiedades vibracionales en nanopartículas metálicas (figura 6).

También se han hecho aportaciones científicas en el área de propiedades ópticas lineales y no lineales de nanopartículas metálicas y semiconductoras

de diferentes formas y tamaños, y en diferentes medios, así como en el tema emergente de plasmónica y su uso en óptica cuántica.

Como prueba de la alta calidad del trabajo realizado en el IF en las áreas de NyN, es importante mencionar que la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM ha publicado por dos años consecutivos (2013 y 2014) en *Gaceta UNAM* la lista de los investigadores más citados de la UNAM. De acuerdo con estadísticas realizadas por Elsevier, México, investigadores del IF aparecen entre los 10 autores más citados durante los años 2012 y 2013, y entre ellos destacan quienes trabajan en NyN: Rubén Barrera, Cecilia Noguez, Dwight R. Acosta, Ignacio Garzón y Patricia Santiago.

Nuestros académicos son ampliamente reconocidos a nivel mundial y participan frecuentemente como conferencistas invitados, árbitros de revistas indizadas de circulación internacional, son evaluadores de proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales y miembros de comités (consultivo internacional, científico o de organización) de congresos de gran prestigio como: el “International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters”, el “International Conference on Nanostructured Materials”, el “International Materials Research Congress”, así como el “International Microscopy Congress”.

## Perspectivas sobre el estudio de la NyN

Aunque a la fecha se han alcanzado varios logros importantes en la investigación en NyN realizada en el IFUNAM, en los próximos años se promoverá la ejecución de proyectos de mayor alcance tanto en temas de frontera de la nanociencia, como en investigación aplicada que contribuya a generar información útil para desarrollos en nanotecnología. Para ello se fomentará un mayor grado de colaboración entre los grupos de investigación teóricos y experimentales tanto del IF como con grupos de otras instituciones nacionales y del extranjero.

## Sitios de interés relacionados con el IF

- Página del Instituto de Física: <[www.fisica.unam.mx](http://www.fisica.unam.mx)>.
- Acelerador Pelletron: <<http://www.fisica.unam.mx/laboratorios/peletron/>>.
- Laboratorio Central de Microscopía: <<http://www.fisica.unam.mx/laboratorios/lcm/>>.
- Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC): <<http://www.fisica.unam.mx/laboratorios/lancic/>>.