

A graphic illustration featuring a blue telescope on the left, with a black curved line extending from its lens towards a stylized radiation symbol on the right. The radiation symbol is a red and white cross with green and blue accents and radiating lines. The text 'La física del siglo XXI: explorar el Universo y crear nuevas tecnologías' is positioned between the telescope and the radiation symbol.

La **física** del siglo XXI: explorar el Universo y crear nuevas tecnologías

Jesús Dorantes Dávila, Gerardo Herrera Corral y Gabriel López Castro



Este texto muestra cómo los físicos mexicanos participan al más alto nivel en colaboraciones multidisciplinarias de gran escala, haciendo contribuciones originales en el estudio de nuevos fenómenos físicos y en experimentos que exploran los confines del micro y macrocosmos.

• Para qué sirve la física? Una popular anécdota entre los físicos cuenta que en 1850 el ministro de finanzas británico William Gladstone preguntó a Michael Faraday, considerado fundador del electromagnetismo y de la electroquímica, sobre las posibles aplicaciones prácticas del entonces recién descubierto fenómeno de la electricidad, a lo cual éste replicó: “algún día, señor, incluso podrá ponerle impuestos”.

Otro ejemplo muy significativo se refiere a la utilización de la energía del calor, obtenida en la combustión, mediante la máquina de vapor de James Watt, que generó la revolución industrial en el siglo XIX y sus consecuentes efectos sociales. A partir de este momento, toda la cadena de producción y los medios de transporte se transformaron profundamente.

Otro ejemplo paradigmático de su utilidad es el de la mecánica cuántica, que nació de la necesidad de entender los fenómenos a escala atómica observados desde finales del siglo XIX, y que eventualmente dio origen a la electrónica, la imagenología médica y otras incontables aplicaciones en el siglo XX.

A pesar de las múltiples aplicaciones que se han derivado de la física, ésta sigue siendo considerada esencialmente como una ciencia básica; es decir, generadora de nuevos conocimientos. Aunque esto es cierto, en buena medida los conocimientos generados por la física siguen siendo el elemento motriz de los más espectaculares desarrollos tecnológicos en el siglo XXI.





Por otra parte, al ser la física una ciencia experimental, la exploración del Universo, desde sus escalas subatómicas a las cosmológicas, requiere cada vez más del diseño, construcción y operación de sofisticados y gigantescos aparatos cuya realización es posible solamente con la conjunción de cuantiosos recursos humanos y financieros multinacionales y del desarrollo de nuevas tecnologías de punta. Los físicos mexicanos participan activamente en el desarrollo de estas nuevas tendencias de la especialidad.

Con el propósito de ilustrar algunos de los potenciales desarrollos tecnológicos y de experimentos de la denominada "Gran Ciencia" (*Big Science*) en la investigación física del siglo XXI, la reunión general *Ciencia y humanismo* incluyó dos simposios: "La física, ajonjolí de todas las ciencias" y "La física al extremo en experimentos de Gran Ciencia".

● Experimentos de Gran Ciencia

La Gran Ciencia hizo su aparición después de la Segunda Guerra Mundial y es un término que se usa para denominar a proyectos de gran escala que requieren del apoyo de grupos de naciones. El mismo proyecto Manhattan fue un programa de investigación y desarrollo codirigido por los gobiernos de Estados Unidos, Inglaterra y Canadá, cuyo propósito era el de obtener la bomba atómica, cuyo uso eventualmente pondría fin a la guerra. En la actualidad, los proyectos de Gran Ciencia son programas de investigación y desarrollo que, por su gran envergadura, requieren no sólo del financiamiento de un grupo de países, sino también de la colaboración de especialistas de diversas disciplinas científicas y de la ingeniería para su diseño, construcción y operación.

Dentro de los ejemplos de la física podemos encontrar en la actualidad al Gran Colisionador de Hadrones (o LHC, por

sus siglas en inglés), que se localiza en la frontera franco-suiza, como se ilustra en la Figura 1. Este dispositivo consta de un túnel de 27 kilómetros de circunferencia, ubicado a 100 metros bajo la superficie terrestre, en el cual se hacen chocar frente a frente protones o núcleos pesados, moviéndose a las energías más altas alcanzadas en laboratorios terrestres.

Dado que en este texto nos estaremos refiriendo constantemente a la unidad de energía llama *electronvolt* (denotada como *eV*), a éste se le define como la energía que adquiere un electrón cuando se mueve a través de una diferencia de potencial de un volt. Los protones que circulan en el Gran Colisionador de Hadrones logran alcanzar energías de siete teraelectronvolts; es decir, de siete billones (un siete seguido de doce ceros) de electronvolts. Estas energías son tan altas que al momento de la colisión pueden recrearse las condiciones de ultra-alta temperatura y densidad que debieron existir una fracción de segundo después de la creación del Universo.

En cuatro diferentes sitios del túnel se encuentran ubicados los detectores que registran las partículas producidas en estas colisiones, y que corresponden a cuatro diferentes grupos experimentales (cuyos nombres son ALICE, ATLAS, CMS y LHCb). Cada uno de los cuatro grupos consta de entre 1000 (ALICE) y 4000



Figura 1. Fotografía aérea del CERN, que muestra la circunferencia del Gran Colisionador de Hadrones.

(ATLAS) participantes, entre físicos, técnicos e ingenieros que han contribuido en el diseño, construcción y puesta en marcha de los respectivos componentes de los detectores de partículas. Esto refleja el alto grado de coordinación y colaboración multidisciplinaria que requiere un experimento de Gran Ciencia de este tipo, que involucra expertos en aceleradores, electrónica, cómputo y física. Tratándose de una maquinaria totalmente novedosa, buena parte de la tecnología requerida y de los métodos de registro y almacenamiento de datos, así como de las técnicas de análisis de los mismos, deben generarse por primera vez, lo cual por lo general contribuye al desarrollo de nuevas tecnologías.

El programa de investigación básica de este proyecto contempla investigar el comportamiento de la materia a energías extremadamente altas, bien sea para probar la validez de la teoría existente de las partículas elementales, o para probar las predicciones de teorías alternativas que han sido elaboradas para resolver algunos de los problemas que presenta la actual teoría, y que deberían manifestarse al escudriñar profundamente en la materia.

En el LHC participan alrededor de 50 físicos de instituciones mexicanas, agrupados en los experimentos ALICE (por las siglas en inglés de *A Large Ion Collider Experiment*) y CMS (*Compact Muon Solenoid*). Nuestros colegas han intervenido tanto en el diseño de componentes del detector ALICE como en los análisis de los datos experimentales. En la ponencia “¿El experimento del fin del mundo o una nueva ventana al Universo?”, Luis Manuel Villaseñor Cendejas, investigador de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, llevó a cabo una presentación detallada del LHC, de sus propósitos, así como de las contribuciones mexicanas al mismo.

El predecesor inmediato del LHC fue el Tevatrón, un colisionador de protones y de antiprotones en el *Fermilab National Laboratory* (o simplemente Fermilab), ubicado cerca de la ciudad de Chicago, en Estados Unidos. Este acelerador, también en forma de anillo y de 6.5 kilómetros de circunferencia, aceleraba a las partículas hasta niveles muy altos de energía, aunque siete veces menores que los que se alcanzarán en el LHC. Para tener una idea de las energías que alcanzaba, baste decir que protones y antiprotones girando en di-



Acelerador de partículas Cockcroft Walton, Fermilab.

recciones opuestas en el anillo del Tevatrón, llegan a cruzarse cerca de 7.1 millones de veces por segundo. Uno de los resultados más importantes de este experimento fue el descubrimiento del quark *top*, en 1995.

El quark *top* es una de las 12 partículas que, junto con el electrón, descubierto en 1897, conforman las llamadas componentes elementales de la materia. En el descubrimiento del quark *top* figuraron investigadores y estudiantes del Departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav), quienes han tenido una presencia activa en uno de los dos experimentos (llamado D0) desde inicios de operación del Tevatrón. Cabe mencionar que dichos investigadores también participaron en el descubrimiento de otras partículas llamadas bariones, que contienen un quark llamado *bottom*, el cual es más ligero que el quark *top*. En la ponencia “Fermilab: viaje en el tiempo,



espacio y materia”, Eduard de la Cruz Burelo, investigador del Departamento de Física del Cinvestav, hizo un recuento de los principales descubrimientos obtenidos por el Tevatrón, así como una descripción de la participación mexicana en el mismo.

En 2012 se cumple un siglo del descubrimiento de Victor Hess de que la radiación ionizante observada cerca de la superficie terrestre provenía en realidad del espacio exterior, y no de los elementos radiactivos presentes en la Tierra, como hasta entonces se pensaba. Esto dio origen al estudio de los denominados *rayos cósmicos*, cuya comprensión ofrece retos en la actualidad, pues el origen y la composición de los rayos cósmicos más energéticos aún se desconoce.

Estos rayos son detectados, tanto en el aire como en la superficie de la Tierra, por medio de la cascada de partículas que producen al chocar con núcleos de los átomos que componen la atmósfera (véase la Figura 2). Así, un solo rayo cósmico de la más alta energía observada hasta ahora es capaz de generar un chubasco de 100 000 millones de partículas que alcanzan la superficie terrestre.

En la ponencia titulada “Una nueva astrofísica: develando el Universo con astropartículas”, Gustavo Medina Tanco de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), describió los objetivos científicos del observatorio Pierre Auger, ubicado en la provincia argentina de Mendoza, y que consta de detectores distribuidos en una superficie de 3 000 kilómetros cuadrados. El propósito de este experimento es observar rayos cósmicos con energías superiores a 10^{19} electronvolts (¡10 millones de veces más energéticos que los protones del LCH!) con el fin de establecer su composición y origen en el cosmos. La enorme magnitud de este observatorio es necesaria porque los rayos cósmicos más energéticos son tan raros que, en promedio, nos llega solamente uno por kilómetro cuadrado durante un siglo.

La ponencia de Medina Tanco destacó la contribución que han realizado al experimento los científicos y técnicos mexicanos de diversas disciplinas e instituciones como la UNAM, el Cinvestav, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Asimismo, presentó la participación mexicana en el observatorio JEM-EUSO,

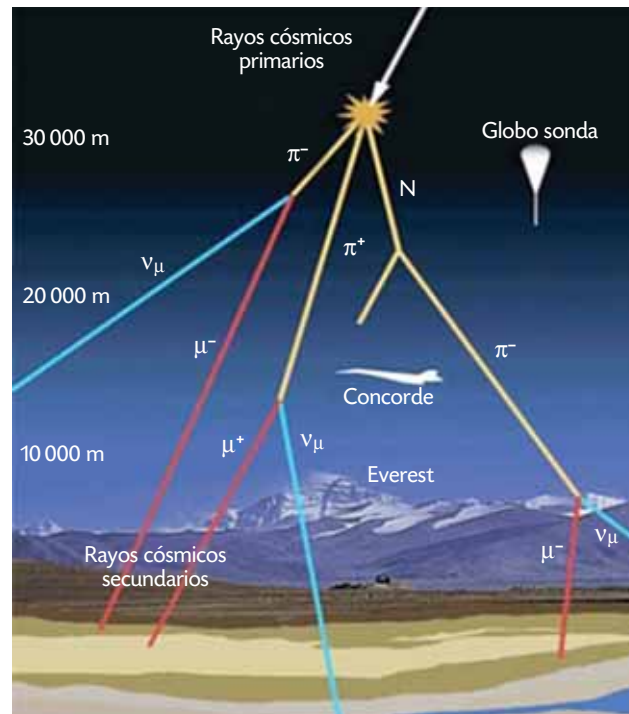


Figura 2. Cascada o chubasco generado por un rayo cósmico en la atmósfera terrestre. Las letras griegas representan las diferentes partículas que impactan en la atmósfera.

el primer experimento para detectar rayos cósmicos ultraenergéticos desde el espacio, y sus prototipos sub-orbitales. Este detector es ampliamente considerado como el sucesor del Observatorio Pierre Auger, y asegurará el papel de liderazgo de México en esta área de investigación en las próximas décadas.

Otro de los proyectos de Gran Ciencia en que están involucrados científicos de la UNAM es el experimento *Alpha Magnetic Spectrometer* o AMS, por sus siglas en inglés. El arreglo experimental del AMS, mostrado en la Figura 3, fue diseñado y construido por alrededor de 600 científicos y técnicos de 16 países, e instalado en la Estación Espacial Internacional (también conocida como estación Alpha) en mayo de 2011.

Se trata de un espectrómetro de masas que permite medir la masa y la carga eléctrica de las partículas que lo atraviesan. El propósito del experimento es tratar de detectar la presencia de *núcleos de antimateria*, los cuales son idénticos a los de la materia. Los núcleos de antimateria, sin embargo, poseen carga eléctrica negativa y son más difíciles de detectar limpiamente en la superficie terrestre.

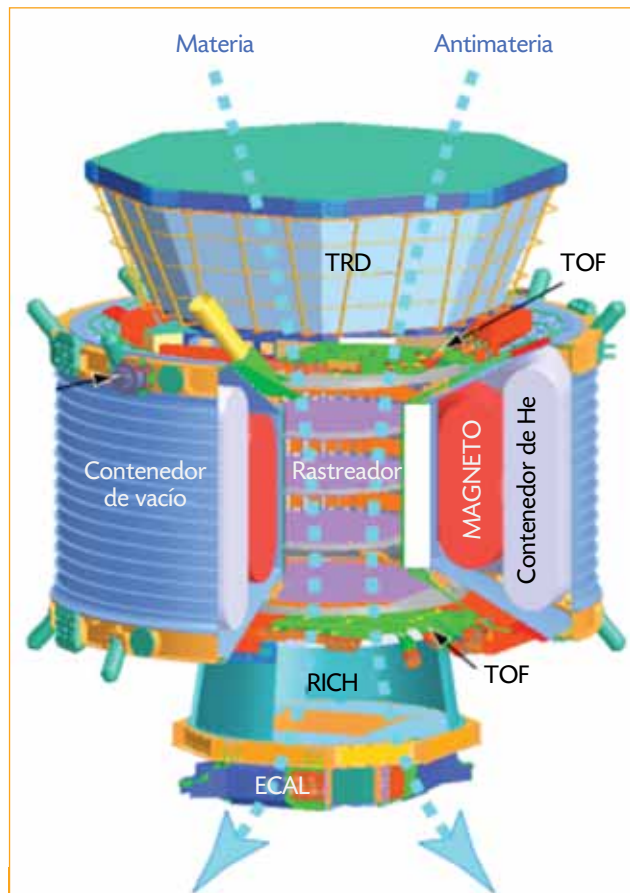


Figura 3. Arreglo experimental Alpha Magnetic Spectrometer, utilizado para medir la masa y la carga eléctrica de las partículas.

La detección de *núcleos de antimateria* es muy importante para responder a la pregunta de por qué no existe antimateria en el Universo: se sabe que, de acuerdo con las leyes físicas establecidas, materia y antimateria debieron haber sido producidas en iguales cantidades en el inicio del Universo, y sin embargo éste actualmente parece estar compuesto sólo de materia. En la ponencia “Buscando antimateria en el Universo” Arturo Menchaca Rocha, del Instituto de Física de la UNAM, describió las características del experimento y destacó la contribución de los físicos mexicanos consistente en caracterizar ópticamente el *radiador*, componente del AMS en el que se produce la radiación Cherenkov y que sirve para identificar a las partículas que atraviesan el detector. El mismo grupo de la UNAM analiza los datos que se generan en el experimento ALICE del LHC, buscando relacionar los mecanismos de producción de núcleos (y antinúcleos) que ahí ocurren

con la nucleosíntesis que tuvo lugar en los primeros instantes del *big-bang*.

Las presentaciones descritas anteriormente permitieron a los asistentes tener una idea clara de los objetivos científicos de estos grandes experimentos de frontera, al tiempo que pudieron apreciar la coordinación del trabajo multidisciplinario que requiere el involucramiento en proyectos de Gran Ciencia.

Asimismo, el público pudo apreciar las aportaciones mexicanas en materia de diseño y construcción de partes de los detectores requeridos en estos experimentos, lo cual es una muestra de la madurez que ha alcanzado el desarrollo de instrumentación de alta calidad.

● **Búsqueda de nuevas tecnologías en el siglo XXI**

El mundo microscópico, atómico y subatómico parecen muy alejados de nuestra realidad cotidiana. Y sin embargo han tenido una enorme influencia en el desarrollo de la tecnología desde principios del siglo XX. “*There’s plenty of room at the bottom*” (hay mucho espacio allá abajo), diría Richard Feynman en su conferencia ante la American Physical Society en diciembre de 1959, como una invitación a explorar un nuevo campo de la física relacionado con el problema de manipular y controlar los sistemas y fenómenos a pequeña escala.

Y en efecto, la nanociencia y la nanotecnología, los sistemas complejos, la información y computación cuánticas, y los nuevos materiales, entre otros, son campos prometedores de una nueva revolución tecnológica, como lo fueron en su momento la invención del transistor o del láser y su influencia en la industria electrónica. Difícil resulta ahora imaginar el descubrimiento del ADN, los estudios de los virus o el desciframiento del genoma humano sin los microscopios de rayos X o electrónicos, los cuales están basados a su vez en la comprensión del comportamiento ondulatorio de la materia.

Otrora campo de estudio casi exclusivamente de los ingenieros, el estudio de las propiedades de los materiales usados en la industria del petróleo, los cosméticos, los medicamentos, los plásticos, los alimentos y otros objetos que han formado parte de la vida cotidiana por siglos, pasó a ser objeto de estudio de la física. El



Materiales novedosos, como los cristales líquidos que se encuentran en una fase intermedia entre la líquida y la sólida, pueden ser entendidos mediante un autoensamblaje dictado por la Segunda Ley de la Termodinámica.

Sin embargo, materiales tan familiares como los vidrios, los geles y las espumas aún se resisten a una explicación basada en los conceptos de la mecánica estadística

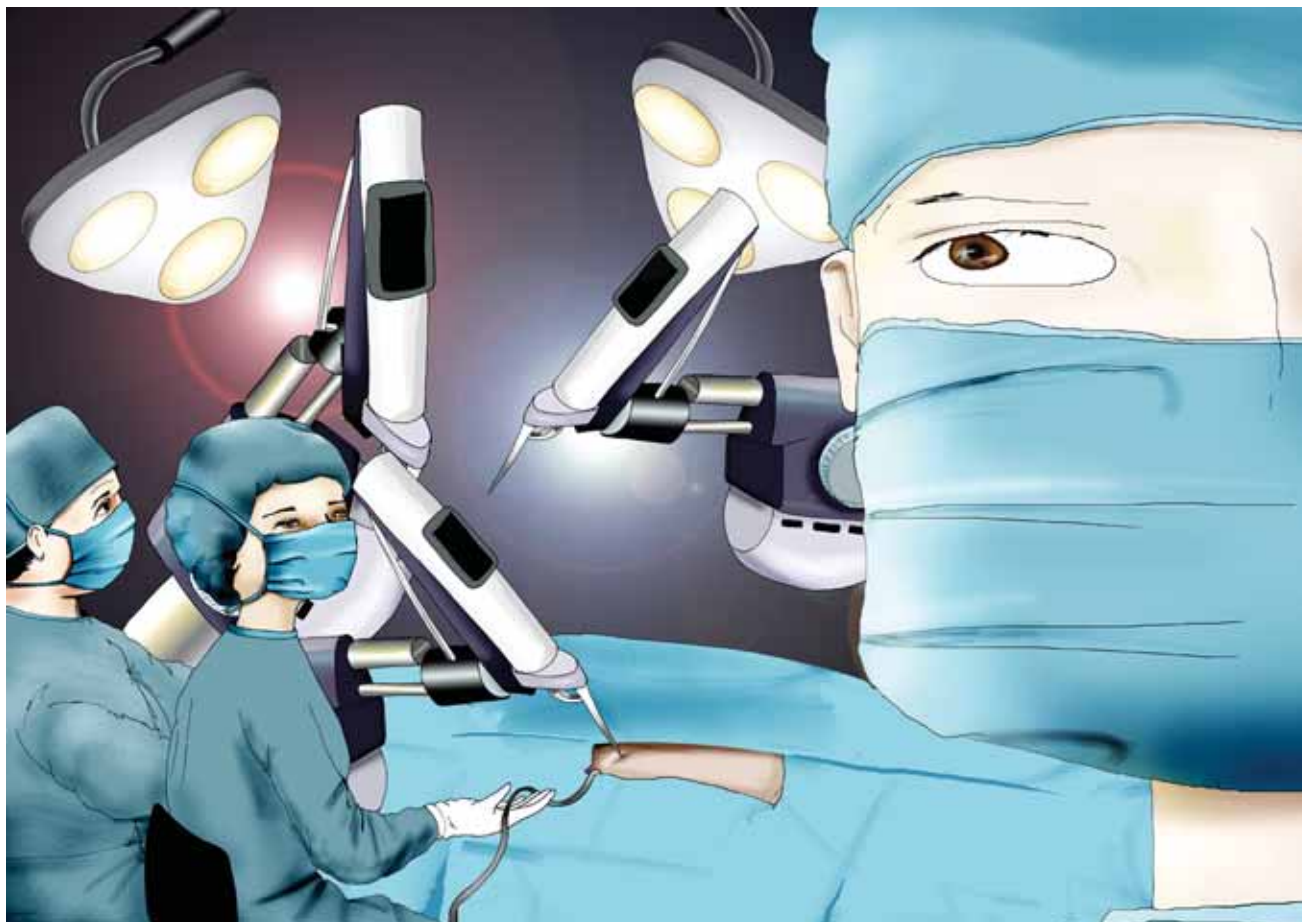


Figura 4. Ilustración de geles ordinarios: materiales que no pertenecen a ningún diagrama de fases termodinámicas.

abordaje de estos sistemas con las herramientas de la mecánica estadística ha convertido el estudio de sus propiedades en una frontera de la física. En su ponencia “Los misterios fundamentales de la materia condensada blanda: una frontera cotidiana del conocimiento”, Magdaleno Medina Noyola, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, explicó de qué manera el criterio de equilibrio contenido en la Segunda Ley de la Termodinámica puede ayudar a comprender las fases tradicionales de la materia ordenada. Materiales novedosos, como los cristales líquidos que se encuentran en una fase intermedia entre la líquida y la sólida, pueden ser entendidos mediante un *autoensamblaje* dictado también por la Segunda Ley de la Termodinámica. Sin embargo, materiales tan familiares como los vidrios, los geles y las espumas aún se resisten a una explicación basada en los conceptos de la mecánica estadística, y constituyen temas de investigación de frontera del conocimiento (véase la Figura 4).

Igualmente cotidianas, al menos desde el descubrimiento de los rayos X, hace más de un siglo, son las técnicas que nos permiten reconstruir imágenes del interior del cuerpo humano. La comprensión de los fenómenos subatómicos permitió el desarrollo de nuevas técnicas como la resonancia magnética nuclear o la tomografía por emisión de positrones, que son de gran utilidad en la imagenología médica, por sólo poner unos ejemplos.

En su ponencia “Malignidad a simple vista: resta de imágenes para visualizar cáncer en una mamografía”, María Esther Brandan, del Instituto de Física de la UNAM, presentó los resultados de una investigación multidisciplinaria que incluye a físicos y médicos, y que busca mejorar la visualización de lesiones detectadas en una mamografía digital. El objetivo planteado es establecer correlaciones entre lesiones sospechosas observadas en las mamografías y la formación de nuevos vasos sanguíneos o linfáticos (angiogénesis) propia de un proceso tumoral. El proyecto utiliza un medio de contraste basado en yodo que se administra a la paciente; al circular por la región del tumor, y de existir angiogénesis, el medio de contraste inundará la región debido a la imperfección de los vasos recién formados, y el yodo será visible en la imagen. A través de la resta de imágenes adquiridas antes y después de la adminis-



tración del yodo, o con energías diferentes, se busca mejorar la visualización del yodo y así facilitar su detección, e incluso su cuantificación. Los resultados preliminares mostrados sugieren que existe correlación entre malignidad y presencia de yodo en la imagen. Esto brindaría una herramienta de diagnóstico complementaria en aquellos casos en que la sospecha de malignidad no queda claramente establecida en la imagen mamográfica, por lo que no se justifica realizar una biopsia.

Moviéndonos hacia las escalas del átomo nos encontramos con los campos emergentes de la nanociencia y la nanotecnología, que han tenido un desarrollo vertiginoso en el mundo a lo largo de la última década. La nanociencia tiene como objetivos el estudio y control de la materia a escalas nanométricas (es decir, del tamaño de una millonésima parte de un milímetro), en las cuales pueden caber entre uno y un millón de átomos. Estas nanoestructuras tienen la característica de exhibir propiedades físicas y químicas muy

particulares, diferentes a la de pedazos más grandes del mismo material, y que llegan a depender incluso de su tamaño y de su forma. Por su parte, la nanotecnología utiliza los conocimientos generados por la nanociencia con el propósito de diseñar y fabricar dispositivos para diversas aplicaciones en química, biología, electrónica, óptica, biotecnología o medicina.

En su ponencia titulada "Cuando el futuro de la nanotecnología nos alcance", Cecilia Noguez Garrido, del Instituto de Física de la UNAM, explicó que pueden identificarse al menos cuatro etapas de la nanociencia y la nanotecnología: la primera etapa contempla la fabricación y manipulación de nanoestructuras sencillas con el fin de construir, entre otros, nuevos y mejores polímeros, cerámicas, recubrimientos y catalizadores. La segunda etapa contempla la fabricación de nanoestructuras "activas"; es decir, diseñadas para realizar funciones específicas. Una tercera etapa pretende la fabricación de nanoestructuras ensamblables y auto-



ensamblables en una o más dimensiones, creando así materiales con simetrías y propiedades únicas (véase la Figura 5).

Finalmente, una cuarta etapa pretende desarrollar dispositivos moleculares con propiedades “bajo pedido”. Cabe aclarar que la investigación en nanociencias se ha centrado principalmente en las primeras dos etapas, mientras que la tercera y cuarta prometen espectaculares realizaciones para el futuro.

Se pueden mencionar los siguientes ejemplos como aplicaciones de las diversas etapas: en la segunda ya existe la funcionalización de nanopartículas para realizar reconocimiento celular mediante la detección de ciertas biomoléculas con la finalidad de hacer llegar nanopartículas metálicas al interior de células cancerosas, las cuales mediante una onda electromagnética se calientan y hacen que la célula muera. Alternativamente, se pueden suministrar fármacos de manera controlada y localizada. En la tercera etapa se pretende crear estructuras de arreglos de nanopartículas con propiedades bien definidas que puedan controlar la captación y flujo de energía, de luz, de electrones, etcétera. Estos dispositivos permitirían ahorrar energía y cambiar las propiedades de los materiales (dureza, térmicas, etcétera) para crear otros diferentes llamados “inteligentes”. Finalmente, el ejemplo más espectacular y prometedor para las aplicaciones en la cuarta etapa es el de la computación cuántica, donde el control de dispositivos se realizará a escala molecular.

Otra propiedad interesante que exhiben las nanoestructuras es la *quiralidad*, que consiste en que la imagen especular de estos materiales no puede hacerse coinci-

dir con la del objeto original. Es ampliamente conocido que esta propiedad es fundamental en química, biología y medicina, por lo que la posibilidad de diseñar de manera selectiva moléculas de una cierta quiralidad usando nanotecnología tendría un gran impacto en estas disciplinas.

Uno de los últimos temas tratados en la sección de física de esta reunión general fue el de la información cuántica. En la ponencia titulada “De los experimentos imaginarios a la información cuántica”, Luis Orozco, del *Joint Quantum Institute* de la Universidad de Maryland y del *National Institute of Standards and Technology* de Estados Unidos, abordó el fenómeno del *enredamiento cuántico* y sus posibles aplicaciones en la transmisión y procesamiento de la información. La consideración de las propiedades cuánticas de los electrones parece inevitable con la tendencia a la miniaturización de los componentes de los circuitos electrónicos usados para transmitir la información.

Orozco explicó cómo el desarrollo de las técnicas para atrapar y controlar partículas individuales hizo posible que las correlaciones existentes entre las partes de un sistema cuántico (fenómeno de enredamiento) pasaran de ser experimentos imaginarios de los años treinta a realidades en el laboratorio desde los años ochenta del siglo XX. Estas correlaciones o enredamientos son un fenómeno que contradice la intuición humana (como otras tantas propiedades de los sistemas subatómicos), ya que implica que una parte de un sistema enredado (como el electrón y el protón en el átomo de hidrógeno) no puede ser descrito *completamente* sin considerar a la otra parte. Así, si ambas componentes

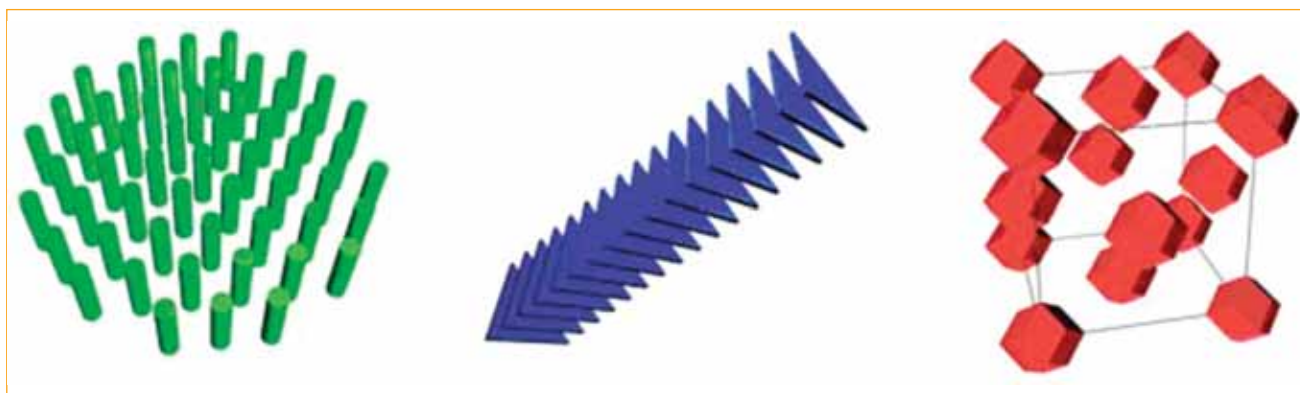
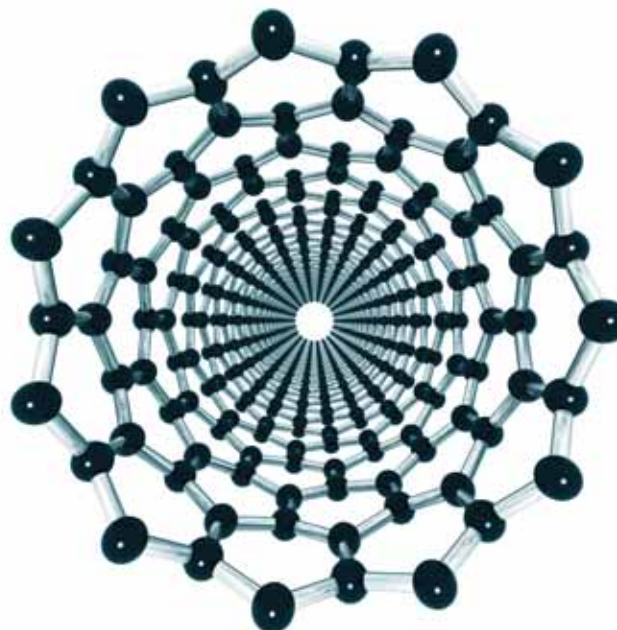
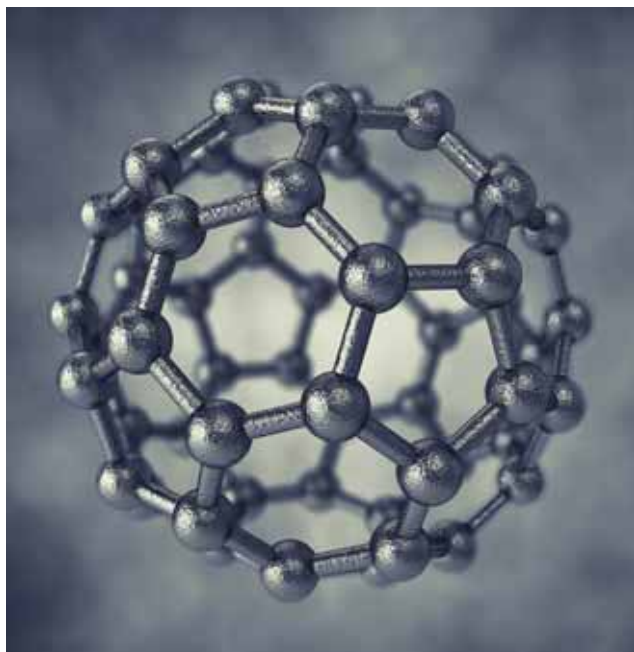


Figura 5. Superestructuras autoensambladas utilizando nanopartículas de oro y ligandos de ADN.



se separan a una distancia arbitraria, se puede conocer el estado de uno de ellos simplemente midiendo las propiedades del otro. Hoy en día, el enredamiento cuántico es usado para encriptar y transmitir información, como la de transacciones bancarias, y se prevé, aunque aún está sujeta a debate, la posibilidad de construir computadoras cuánticas que ejecuten algoritmos de manera mucho más rápida y eficiente.

Las ponencias presentadas mostraron cómo los físicos mexicanos participan al más alto nivel en colaboraciones multidisciplinarias de gran escala, haciendo contribuciones originales en experimentos que exploran los confines del micro y macrocosmos con el fin de probar las teorías existentes y descubrir nuevas leyes y fenómenos físicos. Los participantes mostraron también que el estudio de nuevos fenómenos físicos y el control y manipulación que pueda lograrse de ellos permitirá, de contarse con el apoyo necesario, tener un impacto en el desarrollo de nuevas tecnologías en el siglo XXI.

Para mayor información y detalles de los temas reseñados en este artículo, el lector puede consultar las memorias de la reunión general *Ciencia y humanismo*, disponibles en la página www.amc.unam.mx de la Aca-

demía Mexicana de Ciencias. Agradecemos a todos los ponentes de esta reunión sus sugerencias a una versión preliminar de este texto.

Jesús Gerardo Dorantes Ávila es profesor investigador del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Su campo de investigación es la teoría de sistemas de baja dimensionalidad y materiales nanoestructurados.
jdd@ifisica.uaslp.mx

Gerardo Antonio Herrera Corral es investigador del Departamento de Física del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav). Trabaja en la física experimental de altas energías en el Proyecto del Gran Acelerador de Hadrones del (LHC) del CERN.
gherrera@fis.cinvestav.mx

Gabriel López Castro es investigador del Departamento de Física del Cinvestav. Su campo de investigación se centra en los diversos aspectos fenomenológicos de la física de partículas elementales.
glopez@fis.cinvestav.mx