

EDICIÓN
ESPECIAL

Innovación y Ciencia

VOLUMEN XII, No. 4

Año Mundial
de la Física

TARIFA POSTAL REDUCIDA 769 COLOMBIA \$12.500



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA



[*áce-áce*]

Es una entidad sin ánimo de lucro,
fundada el 9 de octubre de 1970,
que trabaja por el fomento de la
Ciencia y la Tecnología como base
del desarrollo social.

ACAC desarrolla diversos programas
cuyos fines son

integrar a la comunidad científica

y reforzar su compromiso con el

estudio de los problemas del país,

difundir el conocimiento científico

promover y apoyar la

investigación Científica y Tecnológica

e impulsar programas de apropiación social

de Ciencia y tecnología.

Correo electrónico acac@acac.org.co

www.acac.org.co

XVI Convención Científica Nacional

“CIENCIA, TECNOLOGÍA Y
COMPETITIVIDAD: PRIORIDAD PARA
COLOMBIA”

Este programa se realiza cada dos años en las diferentes regiones del país, en búsqueda de la apropiación social de la ciencia, y representa un espacio de **diálogo, reflexión y análisis** constructivo.

- En esta oportunidad, la Convención busca generar procesos que favorezcan la modernización tecnológica del sector productivo para permitirle afrontar con éxito la inminente apertura económica.

Septiembre 21, 22 y 23 de 2006
Bogotá - Colombia

Sumario

Vol. XII No. 4 - EDICIÓN ESPECIAL - AÑO MUNDIAL DE LA FÍSICA



Asociación Colombiana
para el Avance de la
Ciencia - A.C.A.C.

Junta Directiva ACAC
Eduardo Posada Flórez
Guillermo Hoyos V.
Carlos Corredor P.
Marcelo Riveros R.
Edgar Alberto Paéz
Rubén Ardila
Horacio Torres S.
Raúl Joya O.
Helena Groot
Walter Ocampo
Jairo Giraldo
CIDEIM - Francisco Miranda
MALOKA - Nohora
Elizabeth Hoyos
ACCEFYN - Moisés Wasserman

Presidente
Eduardo Posada Flórez

Directora Ejecutiva
Carmen H. Carvajal López

Editor
Mauricio Pérez Gil

Coordinación Editorial
Lorena Ruiz Serna

Asesor Académico
Eduardo Posada Flórez

Comité Editorial
Carlos Corredor
Guillermo Hoyos
Moisés Wasserman
Horacio Torres

Consejo Editorial Internacional
León Lederman
Isabel Uliano
Rodolfo Llinás

Producción Editorial y Diseño
Vesalius, Arte y Ciencia Ltda

Asistente Coordinación
Editorial
Yuliett Arias

Corrección de Estilo
Luis Hernando Neme Pérez

Fotografía
Photodisc, ABC Stock,
Imagebank,
IBM Research, Almaden
Research Center,
Laboratorios Fermilab y CERN,
Centro Internacional de Física.

Impresión
Panamericana Formas
e Impresos S.A.

Distribución

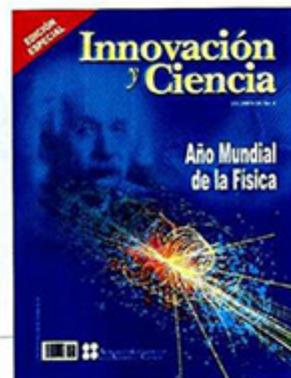
Innovación y ciencia es la revista de divulgación científica y tecnológica de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC. DERECHOS RESERVADOS. Prohibida su reproducción parcial o total sin autorización expresa del Comité Editorial. La publicación no es responsable legal del contenido de la publicación de cada edición. Los conceptos expresados en los artículos no reflejan necesariamente la opinión de los editores.

Resolución Ministerio de Gobierno No. 5447 del 9 de octubre de 1992. ISSN 0121-5140

Tarifa postal reducida No. 769 de Adpostal. Vence Diciembre de 2005

ACAC Cra. 50 No. 27-70
Unidad Camilo Torres
Bloque C Modulo 3
Teléfonos: 3150734
- 3155898 - 3155900
Fax: 2216950
Email:
innovacionciencia@acac.org.co
Bogotá, D.C. - Colombia

Precio Venta al público: \$ 12.500
Suscripción (4 números



Portada.

Editorial

Física y sociedad.

Introducción

Albert Einstein 1905: 100 años después.

Juan Manuel Tejeiro Sarmiento.

El año 2005 ha sido declarado como el año de la física. La razón para esta declaración está plenamente justificada como un reconocimiento no sólo por el desarrollo tecnológico actual, sino también por las perspectivas tecnológicas que se vislumbran, las cuales están sustentadas en buena parte sobre los desarrollos de la física en el siglo XX. Aún cuando en este sentido se hubiera podido declarar cualquier año como el "año de la física", la comunidad de físicos decide escoger el 2005 como homenaje y reconocimiento a la figura de Albert Einstein.

Física: Pasado y presente

Isaac Newton: científico y alquimista

José Granés S.

Isaac Newton (1642-1727) es universalmente reconocido como uno de los fundadores de la ciencia moderna. Es el autor del primer sistema de la física teórica—la mecánica—desarrollado sobre la base de una concepción grandiosa y unificada del universo que toma forma en las ideas de espacio y tiempo absoluto, en las tres leyes del movimiento de los cuerpos—conocidas como las tres leyes de Newton—y en la ley de la gravitación universal.

El cosmos, ayer y hoy

Sergio Torres Arzayú

El conocimiento que hemos ganado sobre el universo ha seguido un crecimiento no lineal. Mucho ha ocurrido desde la primera observación de una supernova por los chinos hace más de 200 años, a las observaciones del cielo profundo realizadas por el telescopio espacial Hubble, pasando por las cenizas de Giordano Bruno, quemado vivo por la inquisición de la iglesia católica por haber propuesto conceptos avanzados sobre el universo. Por cientos de años este tema era del dominio de pensadores que no tenían acceso a datos experimentales más allá de la observación del cielo estrellado con sus propios ojos. En contraste, los investigadores que actualmente trabajan en cosmología tienen el privilegio de tener a disposición la tecnología y las observaciones directas que permiten probar la validez de sus teorías.

El nacimiento de una galaxia

Pedro Ignacio Deaza Rincón

El panorama global del nacimiento de una galaxia está sujeto a la delicada relación existente entre la presión externa necesaria para el colapso gravitacional de la nube inicial, su geometría y el campo magnético en la cual esta se halla inmersa.

Mecánica cuántica, presente y futuro

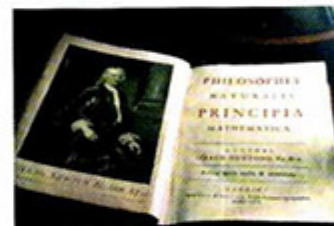
J. Virgilio Niño C.

La mecánica cuántica es una teoría fundamental que incorpora al menos cuatro tipos de fenómenos que no pueden ser comprendidos mediante la física clásica, estos se refieren a los efectos cuánticos que se presentan en ciertos sistemas a nivel macroscópico como los que ocurren en los llamados superconductores, a la discretización o cuantización de algunas cantidades físicas, al comportamiento corpuscular u ondulatorio tanto de partículas como de ondas bajo ciertas circunstancias y al llamado entrelazamiento cuántico. En este artículo damos unas ideas básicas en forma descriptiva, de algunas implicaciones conceptuales que surgieron con la nueva teoría y mencionamos resultados aplicados a nuestra vida diaria, así como ciertas tendencias de desarrollo que se prevén para el próximo futuro.

La frontera de las altas energías: actualidad y perspectivas

Bernardo Gómez

La frontera de las altas energías en el estudio de la naturaleza reboza de vitalidad, en especial ahora cuando la materia oscura y la energía oscura hacen de la conexión cósmica de la física de partículas una enorme fuerza motriz; vemos a los físicos de altas energías en grandes colaboraciones internacionales en todo el planeta buscando comprender



7

8

13

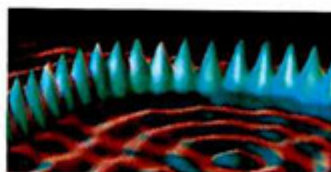
22

30

38

46

Innovación y Ciencia



Física: Nuevos avances y aplicaciones

Nanotecnología: significado, usos, beneficios y riesgos

Andrés E. Zúñiga B. y Juan-Fernando Duque-Osorio.

La nanotecnología se empieza a perfilar como una importante revolución tecnológica de finales del siglo XX y principios del XXI. Sus grandes potencialidades compiten con los grandes riesgos que a futuro, el uso malintencionado e indiscriminado de esta tecnología, pueden suponer. En este artículo se hace una revisión general de qué es nanotecnología, sus usos y beneficios y los aspectos ambientales, éticos y legales que deben ser tenidos en cuenta para el desarrollo y uso de esta tecnología. El principal de estos riesgos es la proliferación de nano-dispositivos autoreplicantes que, en un escenario un poco extremo, puedan llegar a invadir el planeta y reemplazar la vida orgánica por vida artificial de origen nanotecnológico.

52

Colombia avanzando en nanotecnología

Alba Avila y Johann Osma y Yenny Hernández

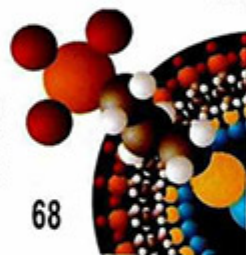
Los últimos avances tecnológicos y científicos han introducido en nuestro lenguaje nuevas palabras con grandes impactos y con connotaciones contextuales muy pequeñas como es el caso de la micro y la nanotecnología. Tecnologías emergentes que rápidamente avanzan de la especulación a un mercado comercial, por lo que no es raro encontrarlos con aplicaciones como: depiladores ópticos, píldoras inteligentes, micro espejos, micropulsores de tinta y sistemas de posicionamiento global (GPS) directamente ubicados en el cuerpo; micro y nano-agujas para la inyección de medicamentos y diagnóstico. La idea de tener nanosistemas inteligentes que localmente realicen funciones específicas en el cuerpo es cada vez más cercana. Estos dispositivos son conocidos como nanobots y fueron propuestos por E. Drexler en los años cincuenta.

62

De los materiales artificiales a la economía de los nanomateriales

Aminta Mendoza

Desde la invención del bronce hasta nuestros días, los materiales artificiales han permitido logros para el mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano. En la actualidad, la ciencia de los Nuevos Materiales no solamente busca el desarrollo de materiales artificiales, sino también la posibilidad de manejarlos a escalas nanoscópicas, para aplicaciones tecnológicas que hacen de la vida moderna lo que hoy conocemos. En el caso de las nanopartículas, estos materiales han venido acompañando a la humanidad desde tiempos inmemorables y son ahora la posible solución a problemas ecológicos, médicos, y tecnológicos con repercusiones económicas y culturales durante el siglo XXI.



68

La óptica experimental

Jáder Guerrero Bermúdez, María del Carmen Lasprilla Álvarez, Arturo Piata Gómez, Jaime Meneses Fonseca y Yezid Torres Moreno.

Desde el principio la luz ha desempeñado un papel fundamental en la dinámica del Universo. En sentido amplio: luz es toda forma de radiación electromagnética, lo que incluye los rayos gamma, los rayos X y las ondas de radio. Sin embargo, estrictamente hablando el término luz, designa la radiación electromagnética correspondiente a parte de la radiación ultravioleta próxima a la región visible del espectro, la luz visible y la radiación infrarroja cercana a la visible. En ambas acepciones encontramos un vasto escenario para verificar el papel protagónico de la interacción de la radiación y la materia en la evolución cósmica y en particular en la formación de la vida.

76



Caos y complejidad: historia y aplicaciones

Diógenes Campos Romero

La ciencia del caos y la complejidad, que carece aún de una definición simple y universal, pero que es una área del conocimiento que está en un rápido proceso de evolución, la entendemos como la ciencia dedicada al estudio de los sistemas complejos. Un sistema de esta naturaleza es aquel que está compuesto por gran número de partes o elementos que interactúan de manera no lineal y entre los cuales existen fuertes interdependencias. El carácter no lineal de las interacciones conlleva a que el caos —es decir, el comportamiento caótico— sea un ingrediente fundamental de los sistemas complejos. En este trabajo sólo se presentan elementos históricos, se describen conceptos básicos y se ilustra la teoría con aplicaciones en unas pocas disciplinas.

82

Física médica: más de un siglo

María Cristina Plazas y Harold Machado

La Física Médica aparece como una rama del conocimiento con más de un siglo de historia para prestar apoyo a las ciencias de la salud en las áreas de radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear y protección radiológica. El Instituto Nacional de Cancerología y la Universidad Nacional de Colombia, a través de su proyecto de Maestría en Física Médica, avanzan en la consolidación de las acciones conjuntas que desde la década de 1980 han permitido formar profesionales que integran la necesaria "masa crítica" que requiere Colombia en esta área para enfrentar el diagnóstico y tratamiento del cáncer, tercera causa de mortalidad en el país, de manera eficaz y segura.

92



Física e industria

Jorge Hernando Panqueva A.

El tema de la Física y su relación con la industria, en particular en aquellos países como Colombia, cuyo desarrollo tecnológico se encuentra muy lejos del nivel que profesan las naciones industrializadas, ha sido en múltiples oportunidades, durante las últimas tres décadas, objeto de muchos análisis, foros, seminarios, congresos, etc. La disyunción entre la Física y la Industria tiene lugar debido a la baja capacidad que posee el sector industrial para absorber los conocimientos y resultados frutos de su labor investigativa.

98

¿Es la física que se aprende una contribución para comprender el mundo?

Dino Segura R.

La manera como funciona nuestra escuela es una herencia de hace siglos y comparte los mismos problemas que vive en todas partes la escuela occidental. Los fracasos universales de la escuela en cuanto a que no es un lugar para el conocimiento, ni para la convivencia, ni es tampoco un lugar para el desarrollo humano, han llevado a muchos a anotar que la escuela es anacrónica. Si logramos evadirnos de paradigmas limitantes y construir nuestras propias opciones de escuela, con sus metas, formas de trabajo y

ESPECIFICACIONES PARA LA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

Innovación y Ciencia

TEMAS

Ciencias Naturales, físicas y sociales, tecnología, política científica y tecnológica, historia de la ciencia.

LENGUAJE

- Claro, ágil y de fácil comprensión para el lector no especializado. Es importante que el título sea atractivo y breve además de significativo.
- Los términos técnicos deben ir seguidos de una definición sencilla en paréntesis o entre comas; ejemplo: "...en general se registra taquipnea (respiración rápida), cianosis (coloración azulosa de mucosas y partes más claras de piel)...".
- Cuando se incluyan siglas o símbolos, la primera mención debe decodificarse; ejemplo: "En medicina humana se ha acuñado la expresión ARDS (del inglés: *Adult Respiratory Distress Syndrome*)".
- Sólo deben usarse abreviaturas y expresiones matemáticas en casos estrictamente necesarios.

EXTENSIÓN

Máximo 10 páginas tamaño carta en letra Arial 12, a doble espacio (excluyendo ilustraciones y cuadros).

FORMATO

Texto impreso y copia digital en diskette o CDrom, preferiblemente en formato Word.

MATERIAL GRAFICO

Es importante anexar la mayor cantidad posible de material gráfico acompañado de notas explicativas (pie de fotos) y sugerencias de ubicación dentro del texto. Este material puede incluir:

- Fotografías originales en papel fotográfico o diapositiva.
- Fotografías en versión digital de alta resolución (300 dpi) en formato tif, jpg o eps.
- Esquemas gráficos explicativos (versión impresa y/o digital).

- Tablas o cuadros sin demasiado texto o columnas.

El material fotográfico no debe ser tomado de libros o revistas y debe indicarse su autoría o fuente si es necesario.

Del material recibido se seleccionará el de mayor calidad para su publicación y una vez editada la revista el material será devuelto al autor.

REFERENCIAS

Para las referencias se usarán las siguientes normas:

a) *Artículo de revista científica:*

1. **Lee, M.R.; Ho, D.D.; Gurney, M.E.:** Functional interaction and partial homology between human immunodeficiency virus and neuroleukin. *Science* 237: 1047-1051, 1987.

b) *Artículo de libro:*

1. **Day, R.A.:** Cómo escribir y publicar trabajos científicos. Organización Panamericana de la Salud. Washington DC., p.242, 1990.

RESUMEN

Descripción breve (5 oraciones cortas) del tópico central del artículo, para su inclusión en la página de contenido de la edición.

IDENTIFICACION DEL AUTOR

Nombre y títulos,
Cargo actual,
Entidad,
Ciudad, país.
E-mail:
Dirección postal

RECOMENDACIONES

Los artículos que hayan aparecido en otras publicaciones, los informes de investigación en curso y aquellos textos cuyos temas sean muy especializados y de interés exclusivamente local no serán considerados para publicación.

Física y sociedad

Para Innovación y Ciencia es muy grato presentar a sus lectores este número especial como contribución a la conmemoración del Año Mundial de la Física, homenaje más que merecido al gran Albert Einstein.

El siglo XVI constituye para muchos el punto de partida de la ciencia moderna; los trabajos de Copérnico, Kepler y Galileo, dieron un vuelco radical a la concepción que hasta el momento se tenía acerca de la conformación del universo y de la manera de abordar su estudio. Todos sabemos lo difícil que fue para la sociedad de la época aceptar la idea del heliocentrismo, la cual, además de su enorme interés científico, tendría claras repercusiones políticas y religiosas. Las nuevas ideas terminaron por imponerse y, gracias al trabajo tesonero de grandes figuras de la historia, se sentaron las bases de la construcción del mundo contemporáneo.

Los trabajos de aquellos pioneros que han permitido comprender el movimiento de los planetas, impulsar trenes o colocar satélites en órbita, los de Gauss, Ampere o Faraday que han hecho posibles las innumerables aplicaciones de la electricidad, los de von Meyer o Carnot, gracias a los cuales funcionan, entre otros, la máquina de vapor o las neveras y los de Hertz o Maxwell que hicieron posibles todos los logros de las modernas telecomunicaciones. Ellos han sentado las bases reales de la revolución tecnológica que culminó a finales del siglo XIX, hasta el punto de que hace un poco más de cien años muchos pensaban que la ciencia estaba terminada y que tan sólo quedaban unas pequeñas cosas por aclarar para conocer a fondo el universo, entender su pasado y predecir su futuro.

Sin embargo, en apenas una década, que bien podríamos calificar de maravillosa, se logró una serie excepcional de descubrimientos iniciada por el de los rayos X en 1895, seguida por el de la radioactividad en 1896, el electrón en 1897, el radio en 1888, la hipótesis de los cuantos en 1900, la válvula termoiónica en 1904 y, para culminar, los tres famosos artículos de Einstein en 1905. Todo esto le dió una vuelta radical a nuestra visión del mundo y

fue el punto de partida del vertiginoso crecimiento científico y tecnológico del siglo XX y de los albores del XXI.

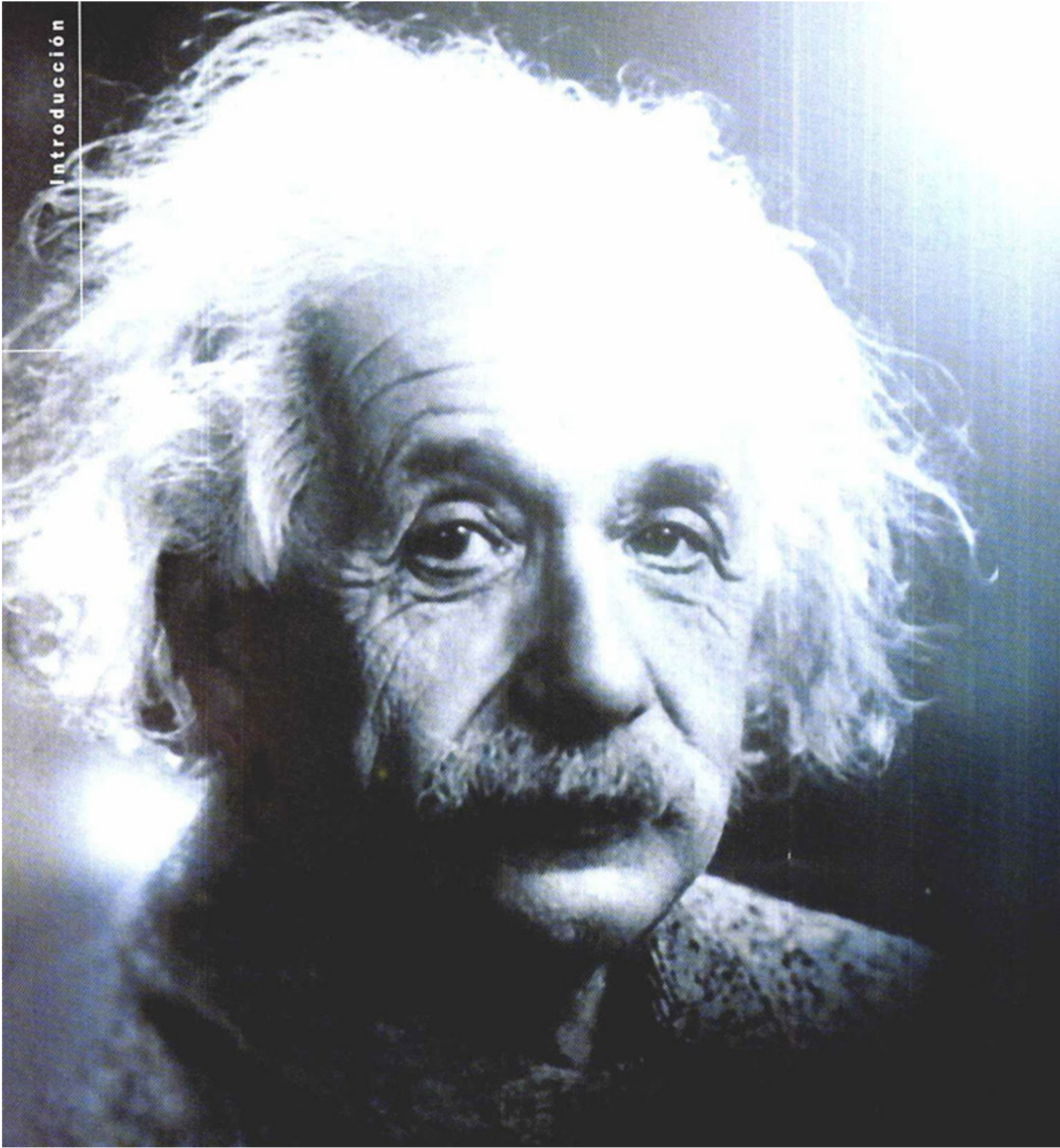
Muy rápidamente se dispuso del primer modelo consistente del átomo —el de Bohr— que permitió entender de manera completa la estructura de la tabla periódica de Mendeleev y los espectros ópticos de los elementos, sentando así las bases de la química moderna y de sus extraordinarias aplicaciones en los más diversos sectores de la vida cotidiana, desde la agricultura hasta la salud, pasando por los plásticos, los colorantes, los textiles, y más recientemente, la bioquímica y la biotecnología.

Paralelamente, los trabajos de Sommerfeld o de Bloch, condujeron a una teoría detallada del comportamiento de los sólidos, la cual hizo posible, entre muchos logros, el invento del transistor en 1947, abriendo así el paso a la moderna microelectrónica y, de la mano con ella, a la informática, cuyo impacto en la vida moderna es cada vez más importante. Es evidente que sin la mecánica cuántica no existirían los computadores personales, los teléfonos celulares o la internet, cuya omnipresencia en nuestra vida cotidiana nos hace olvidar que muchos de ellos no tienen más de 10 años de existencia.

Los aportes de la física moderna en muchos otros campos han sido innumerables y detallarlos todos ocuparía mucho más que un número de la revista. Sin embargo, Innovación y Ciencia ha querido asociarse a la celebración del Año Mundial de la Física presentando, con el apoyo de connotados especialistas, un amplio panorama de la fascinante historia de estos cien años, probablemente los más trascendentales de la historia humana, aunque debemos esperar que el siglo XXI traiga consigo desarrollos aún más importantes que los que hemos vivido hasta ahora.

EDUARDO POSADA FLÓREZ
Presidente.

CARMEN HELENA CARVAJAL
Directora Ejecutiva.



1905

Albert Einstein

Cien años después

Juan Manuel Tejeiro Sarmiento

*Profesor Titular,
Observatorio Astronómico Nacional,
Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C., Colombia.
E-mail: jntejeiros@unal.edu.co*



El año 2005 ha sido declarado como “el año de la física”. La razón para esta declaración está plenamente justificada como un reconocimiento no sólo por el desarrollo tecnológico actual, sino también por las perspectivas tecnológicas que se vislumbran, las cuales están sustentadas en buena parte sobre los desarrollos de la física en el siglo XX. Aunque en este sentido se hubiera podido declarar cualquier año como “el año de la física”, la comunidad de físicos decide escoger el 2005 como homenaje y reconocimiento a la figura de Albert Einstein.

En el año de 1905 Einstein publica cuatro trabajos: su primer artículo, titulado “Sobre la determinación de las dimensiones moleculares”, resultado de su tesis doctoral, propone por primera vez un método para determinar las dimensiones moleculares, problema fundamental de la física en

esa época, el cual se basa en la teoría de fluidos, a diferencia de otras técnicas basadas en la teoría cinética de los gases.

En su segundo artículo generaliza la hipótesis de Planck de la cuantización de la energía para la radiación electromagnética, por el cual recibió el premio Nobel en 1921, trabajo considerado como uno de los pilares de la física cuántica.

En los dos artículos siguientes Einstein establece los principios fundamentales de la teoría de la relatividad: el primero de ellos, titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, sienta las bases de los conceptos fundamentales de espacio y tiempo, conceptos que están en la base de todas las teorías físicas. En el segundo artículo, “¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?”, desarrolla la dinámica relativista y en particular postula la equivalencia entre la masa y la energía, $E=Mc^2$.

Estos dos últimos artículos hubieran bastado para reconocer en Einstein la figura que hoy representa y conmemorar en este año los 100 años de la teoría de la relatividad.

Es por esta razón que el año de 1905 se conoce también como “el año milagroso de Einstein”, término originalmente acuñado por el poeta John Dryden en 1666 en su poema “Annus Mirabilis: Year of Wonders” para referirse a la derrota de la Armada Holandesa a manos de la flota inglesa y al hecho de que Londres se salvara del Gran Incendio.

El término “Annus Mirabilis” fue utilizado también para referirse al año en el cual Newton sienta las bases del cálculo infinitesimal y desarrolla las teorías de la gravitación universal y de los colores de la luz.

Aunque Einstein realizó grandes contribuciones a la física a lo largo de su vida, es reconocido como el padre de la teoría de la relatividad, la cual revolucionó no sólo los fundamentos de la física sino que tocó también nuestra concepción del mundo en cuanto a los conceptos fundamentales de espacio, tiempo y energía.

La teoría de la relatividad modificó profundamente la física y abrió nuevos caminos que aún hoy están por explorarse. Podemos citar trabajos que, basados en los principios de la física relativista, recibieron el premio Nobel: efecto Compton (1927), efecto Mossbauer (1961) y la formulación de la mecánica cuántica relativista de Dirac (1933).



con consecuencias como la existencia del positrón detectado por primera vez por Anderson (1936).

Sin embargo, el impacto de la teoría de la relatividad va más allá del área de la física, trasciende otros campos como el filosófico y por ende modifica nuestra concepción del mundo, en particular en lo referente a nuestros conceptos de espacio y tiempo. Pero ¿cómo podemos explicar este impacto de la relatividad en nuestra concepción del mundo, si en últimas nuestra percepción cotidiana del espacio, que es “lo que queda cuando no queda nada” y del tiempo que es “lo que pasa cuando no pasa nada”, no se han visto modificadas?

La teoría de la relatividad especial se basa en dos postulados fundamentales: el principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz en el vacío.

El primer postulado fue enunciado por primera vez por Galileo y en esencia lo que establece es la imposibilidad de medir el movimiento absoluto. ¿Qué significa este postulado? Uno de los argumentos aristotélicos que se esgrimía para sustentar que la tierra no podía estar moviéndose en torno al sol era que si la tierra se estuviera moviendo entonces nosotros lo deberíamos sentir (medir). Por ejemplo, los pájaros tendrían problemas cuando volaran de un árbol a otro, pues si el ave volara hacia un árbol que estuviera en la dirección del movimiento de la tierra, éste se alejaría y el ave en vuelo no podría alcanzarlo. El principio de relatividad resuelve este problema: la tierra se mueve pero ningún fenómeno físico sobre la tierra se ve afectado por este movimiento.

El segundo postulado, sobre la constancia de la velocidad de la luz, establece que la velocidad que medimos de un rayo de luz en el vacío es siempre la misma, 300.000 km/sg independientemente de la velocidad de la fuente.

Dos consecuencias fundamentales se desprenden de estos postulados: los efectos de la dilatación temporal y la contracción de longitudes. De estos dos efectos, el primero ha sido de mayor

resonancia e impacto pues toca una de nuestras percepciones más sensibles: el paso del tiempo. Cuando dormimos profundamente, el tiempo pasa sin percibirlo, pero si nos desvelamos, éste pasa lentamente. Nosotros, como todos los organismos estamos sujetos al tiempo cuya medida natural está determinada por el movimiento de la tierra: su rotación nos determina el día y su translación, el año. Los ciclos biológicos están determinados por este reloj. Todos los días y los años duran lo mismo independientemente de nuestra percepción del tiempo. La dilatación temporal plantea, a nuestra escala, una “paradoja” que ha sido el caballito

de batalla desde el mismo momento en que la teoría de la relatividad se formuló. En tal teoría y en general en la física, no se define qué es el tiempo, lo que se define es cómo medirlo y más específicamente cómo se mide un intervalo de tiempo.

Lo primero que se requiere es un aparato o sistema que posea un movimiento periódico con el cual pueda compararse otros intervalos de tiempo en unidades de ese período dado. Por ejemplo, Galileo utilizó inicialmente su pulso para medir en los experimentos los intervalos de tiempo y luego desarrolló sistemas más precisos para este fin como el péndulo.

Cualquier sistema físico que nos permita medir intervalos de tiempo lo llamamos en física un reloj. Así,

el tiempo en física es el intervalo de tiempo medido por un reloj referido a un instante arbitrario, que lo podemos llamar $t=0$ el cual nos permite comparar las medidas de tiempo que se hacen de diferentes fenómenos y por diferentes observadores.

En la física newtoniana el intervalo de tiempo entre dos eventos (por ejemplo, se emite una señal desde la tierra y un tiempo después esta señal alcanza la estación espacial) es independiente del estado de movimiento del observador, es decir, es absoluto, mientras que la teoría de la relatividad predice que el intervalo de tiempo entre los eventos medidos

El impacto de la teoría de la relatividad va más allá del área de la física, trasciende otros campos como el filosófico y por ende, modifica nuestra concepción del mundo, en particular en lo referente a nuestros conceptos de espacio y tiempo.



por los diferentes observadores puede cambiar dependiendo de sus velocidades relativas. Este efecto de la relatividad del tiempo se ha medido.

Los relojes atómicos son los dispositivos más precisos con los que contamos hoy para medir intervalos de tiempo muy pequeños, del orden de las milésimas de millonésimas de segundo. Si tomamos dos relojes idénticos y dejamos uno de ellos en la tierra y el otro lo enviamos en un avión alrededor de la tierra, cuando regrese el reloj viajero a su punto de partida y lo comparemos con el que quedó en la tierra, el viajero llegará atrasado unas fracciones de segundo con respecto al otro. Esta diferencia de tiempo medida está de acuerdo con las predicciones de la teoría de la relatividad.

Es importante anotar en este punto que el efecto del retraso temporal debe ser calculado según la teoría general de la relatividad, pues se involucran los efectos del campo gravitacional de la tierra, aunque esta circunstancia no cambia la esencia de la presente discusión.

Esta situación implicaría que para los pilotos de avión también transcurriría un tiempo menor

comparado con las personas que permanecieron en Tierra. ¿Estaríamos entonces frente al elixir de la eterna juventud? Es evidente que frente a los tiempos de los procesos biológicos de un ser vivo, unas fracciones de segundo carecen de significado.

¿Qué sucedería si en un futuro no muy lejano pudiéramos disponer de medios de transporte veloces y capaces de alcanzar velocidades cercanas a la de la luz? Así podríamos hacer un viaje de ida y regreso hacia el grupo de estrellas de las pléyades, el cual dista de nosotros unos cuatrocientos veinticinco años luz. La relatividad nos permite predecir que para los astronautas, el tiempo del viaje, que depende de la velocidad del mismo, puede ser un par de años, mientras que para la tierra la nave tardaría algo más de novecientos.

Como fenómeno físico de la dilatación temporal, el viaje interestelar de los astronautas y el viaje en avión del reloj atómico es lo mismo, pero para nuestro sentido común surge una pregunta: ¿el efecto de la dilatación temporal que afecta a un aparato de medida del tiempo, tal como un reloj atómico, también afecta el tiempo y los procesos



Con la tecnología adecuada podríamos ir a la galaxia Andrómeda, que se encuentra a unos dos millones de años luz, en unos pocos años e incluso días o minutos, pero al regresar a la Tierra encontraríamos que han pasado más de dos millones de años.

biológicos de los seres vivos? La respuesta es sí. El fenómeno de dilatación temporal

no depende del aparato de medida con que se realice el experimento, es decir, el viaje en la nave espacial no afecta los tiempos de nuestros procesos biológicos; esto significa que los astronautas durante su viaje viven en forma idéntica como si se encontraran en la tierra, sienten hambre cada cuatro horas, duermen ocho horas al día, en los dos años del viaje tendrán dos cumpleaños y su cuerpo envejecerá dos años.

Para la tierra el tiempo transcurre también como lo percibimos, pero pasarán novecientos años antes de que la nave regrese a la tierra de su viaje a las pléyades. Los viajes interestelares e intergalácticos son posibles en tiempos humanos. Con la tecnología adecuada podríamos ir a la galaxia Andrómeda, que se encuentra a unos dos millones de años luz, en unos pocos años e incluso días o minutos, pero al regresar a la Tierra encontraríamos que han pasado más de dos millones de años.

La teoría de la relatividad va mucho más allá de este resultado. Sus predicciones, tales como la equivalencia entre la masa y la energía que están en

la base de la tecnología nuclear, han tenido un impacto sobre nuestra vida cotidiana aun más significativo. Sin embargo, es evidente que el efecto de la dilatación temporal es el legado de la teoría especial de la relatividad de Einstein que ha trascendido la ciencia y la técnica y le abre un camino al hombre, o por lo menos una esperanza, para derrotar el ineludible paso del tiempo.

CAMBIAMOS!



Pensando en ofrecerle el mejor servicio

Nuestras Líneas de Atención al Cliente

429 8487 - 263 3484 - 295 6896

018000 111210 / 111313

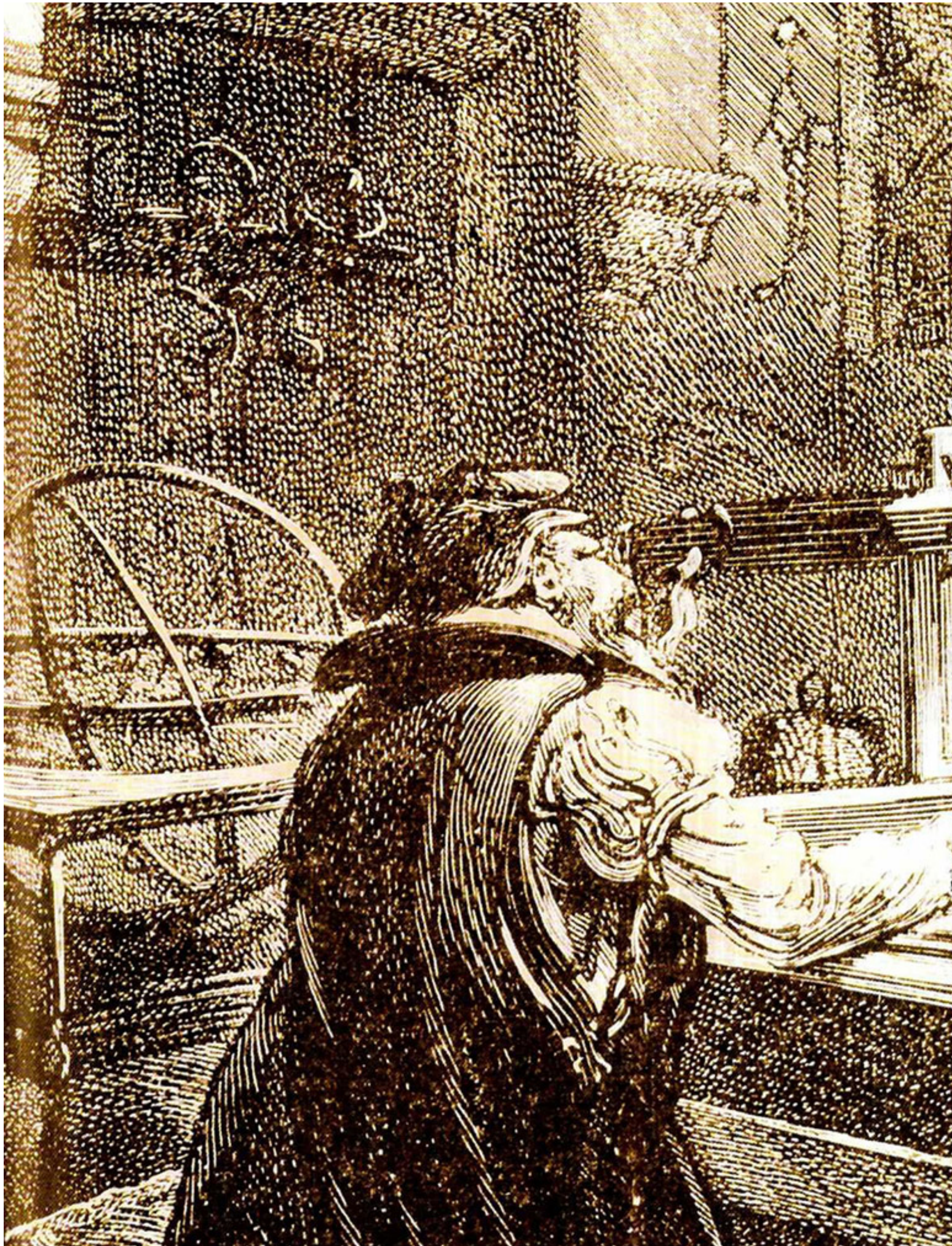
Fax: 416 3026

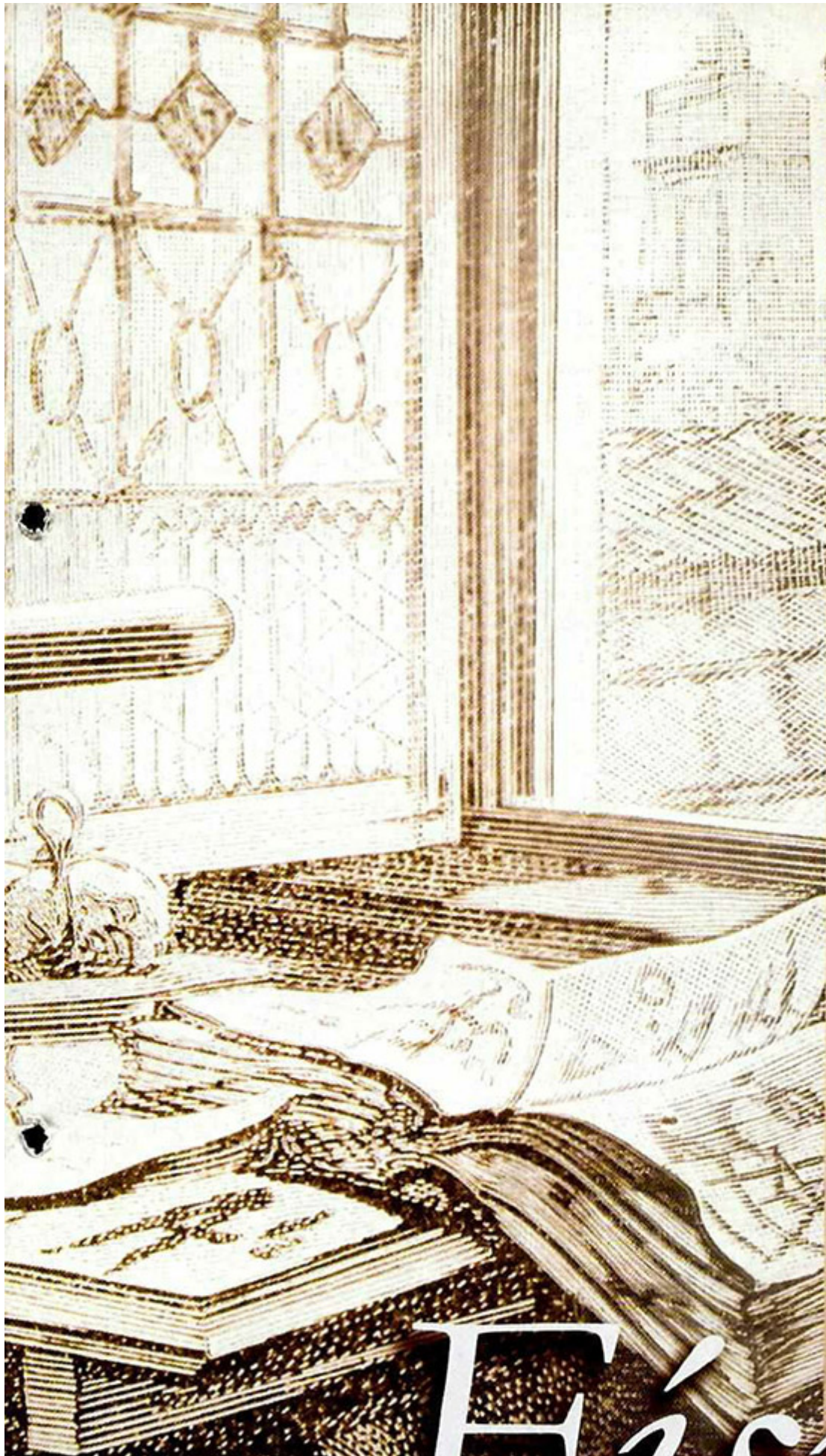
Subgerencia de Mercadeo

334 0304

División de Mercadeo Regional D.C.

4297320





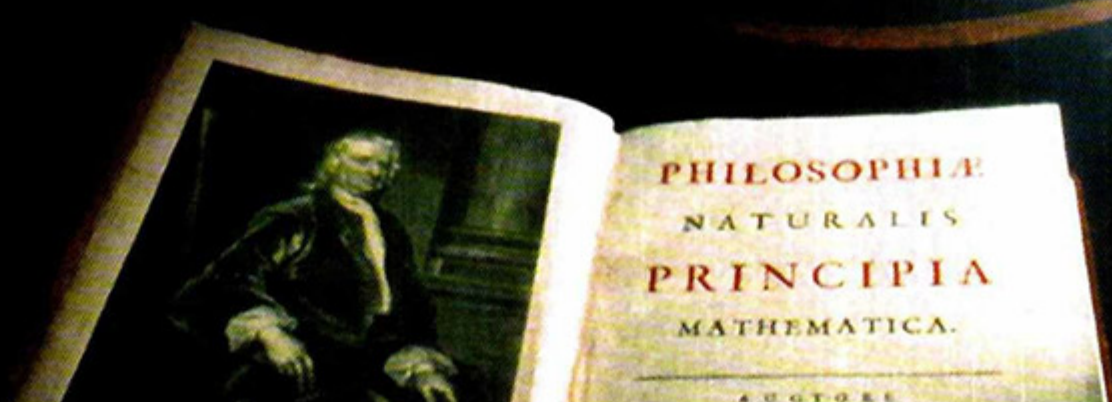
Física

Isaac Newton

científico y alquimista

José Granés S.

*Profesor Titular,
Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C., Colombia.
E-mail: jgranés@col-online.com*



Isaac Newton (1642-1727) es universalmente reconocido como uno de los fundadores de la ciencia moderna. Es el autor del primer sistema de la física teórica —la mecánica— desarrollado sobre la base de una concepción grandiosa y unificada del universo que toma forma en las ideas de espacio y tiempo absoluto, en las tres leyes del movimiento de los cuerpos —conocidas como las tres leyes de Newton— y en la ley de la gravitación universal. La mecánica permite dar cuenta con la exactitud de la matemática de los movimientos de los planetas, satélites y cometas y también de los movimientos de los cuerpos en las vecindades de la Tierra. Suministra además una nueva imagen del universo que se aparta tanto de las ideas cosmológicas de Ptolomeo y Copérnico, que pensaban el mundo como un conjunto ordenado y finito de cuerpos celestes organizados en una geometría esférica, como de las ideas de Descartes que buscaban la unidad del mundo en una sustancia etérea que llenaba todos los intersticios del espacio y que, por medio de grandes torbellinos alrededor de las estrellas, movía los planetas alrededor de ellas. La nueva imagen que surge de los *Principia* es la de un universo infinito y vacío, casi abstracto, en el cual los cuerpos celestes se mueven gobernados únicamente por las leyes universales del movimiento. La unidad del mundo ya no deriva de la geometría o del tejido de la sustancia etérea. Se trata de una unidad más abstracta: la de las leyes generales.

El logro científico de Newton no se reduce, sin embargo, a la composición de este extraordinario “sistema del mundo”.² Continuando la obra de Galileo, desarrolla una concepción de ciencia, de explicación científica y de método que en sus rasgos generales conserva, aún hoy, su vigencia. La ciencia newtoniana es a grandes rasgos una representación matemática de los fenómenos naturales que puede ponerse a prueba mediante experimentos. En su primer trabajo, publicado en 1672 en las *Philosophical Transactions*, revista de la Royal Society, Newton, a propósito del fenómeno de la producción de colores a partir de la luz blanca mediante el prisma,

pone en juego una nueva forma de explicar los fenómenos y de hacer ciencia.³ Pensadores del siglo XVII anteriores a Newton, como Descartes, Hooke o Grimaldi, al analizar el fenómeno de la producción de colores por el prisma, centraban su atención en las causas que la gobernaban. Imaginando hipótesis mecánicas sobre la constitución de la luz blanca —la luz como flujo de “bolas” en Descartes, como un “pulso simple” en Hooke o como un fluido compresible en Grimaldi— buscaban luego establecer cómo el medio refractante —el vidrio del prisma— modificaba la sustancia de la luz, perturbándola. Esas perturbaciones al incidir sobre la retina deberían producir, supuestamente, la sensación de los colores. Toda la explicación buscaba de manera hipotética “salvar el fenómeno” de los colores, como diría Descartes, mediante un modelo mecánico. Los autores que hemos mencionado eran conscientes del mayor o menor grado de arbitrariedad de sus explicaciones. Pensaban, sin embargo, que en las ciencias físicas no era posible alcanzar un grado mayor de certeza.

Newton inicia su investigación de manera distinta. Analizando cuidadosamente el fenómeno de la producción de los colores a la luz de la ley de la refracción, observa que en el experimento esta ley parece no cumplirse. En efecto, un rayo bien definido de luz blanca después de atravesar el prisma se convierte en un haz cónico formado por los distintos colores. Este aparente incumplimiento de la ley se convertirá propiamente en el objeto de investigación de Newton quien buscará desvanecer la contradicción entre lo esperado según la ley de la refracción y lo que se observa en el experimento. Valiéndose de otros experimentos auxiliares —por ejemplo, al observar una tira de papel coloreada mitad rojo mitad azul a través del prisma, la parte azul y la parte roja se ven separadas— que indicarían

La ciencia newtoniana es a grandes rasgos una representación matemática de los fenómenos naturales que puede ponerse a prueba mediante experimentos.

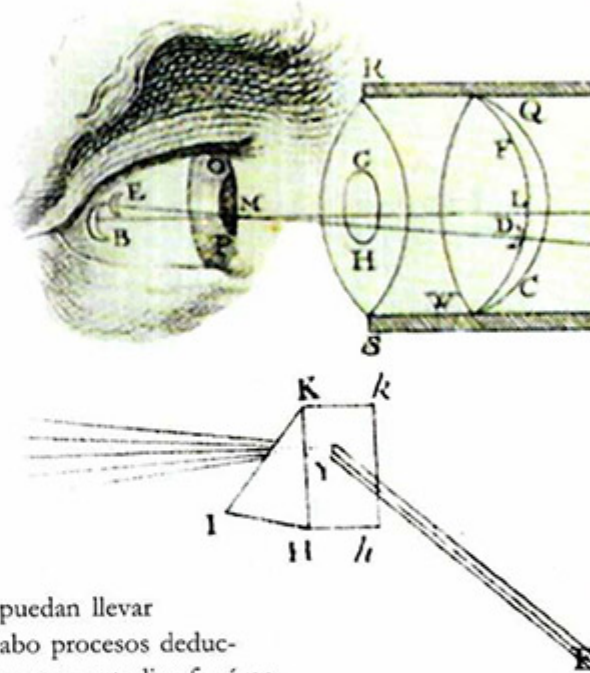
que los colores tienen refrangibilidades distintas, Newton llega finalmente a formular varias premisas generales que constituyen el núcleo de su teoría: existen "rayos" para cada uno de los colores y para cada gradación de color; cada rayo, además del color que le es propio, posee una única refrangibilidad; las propiedades de cada "rayo" —color y refrangibilidad— son inmutables; la luz blanca es una mezcla de "rayos" de todos los colores. Mediante estas premisas Newton logra reconstruir la dinámica del experimento del prisma y explicar por qué el haz de luz blanca parece no cumplir la ley de la refracción en ese experimento. Las premisas de la teoría serán puestas a prueba mediante experimentos especialmente diseñados para el efecto.

Este trabajo de Newton sobre la óptica de los colores reafirma una manera de explicar los fenómenos que ya había sido introducida en la ciencia por Galileo y que se aparta radicalmente de la manera hipotética, carente de certeza y argumentativamente débil, de las explicaciones según modelos mecánicos. Explicar es ahora dar cuenta racionalmente de un fenómeno sobre la base de un proceso deductivo a partir de las premisas generales. Si bien el proceso deductivo riguroso que se sigue de las premisas no suministra la certeza de las matemáticas porque, como decía el propio Newton, la certeza de una ciencia no puede ser mayor que la certeza de sus premisas y éstas provienen de la experiencia, la explicación se estructura sobre bases argumentables, teóricas y experimentales sólidas, susceptibles de una crítica racional que pueda mejorarlas o transformarlas.

Abordar el estudio de los fenómenos desde la perspectiva de la construcción de teorías basadas en premisas generales tiene un efecto adicional: delimita estrictamente el espectro de problemas que pueden ser tratados por la teoría. En el caso de los colores de la luz al cual nos hemos referido anteriormente, la teoría de Newton no puede responder preguntas que hagan referencia a la naturaleza física de la luz y de los colores. Igualmente se produce una delimitación de los lenguajes para referirse adecuadamente a los fenómenos.

Newton hablaba de su método como de "análisis y síntesis".⁴ El análisis de la experiencia se refiere al estudio de los fenómenos, pero no partiendo de cero como querían los empiristas científicos de la Inglaterra del siglo XVII —Francis Bacon o Robert Boyle, por ejemplo— que procuraban acercarse des-

prevenidamente, sin prejuicios de ninguna clase, a la experiencia para construir "historias naturales". Newton propone utilizar en este análisis todo el bagaje teórico suficientemente confiable acumulado a través de la historia. En el caso del estudio sobre los colores de la luz, por ejemplo, Newton utiliza una ley en la cual confía, la ley de la refracción que había sido publicada por Descartes en su *Dióptrica*. El proceso de análisis debe conducir a la formulación de ciertas premisas generales sobre las cuales

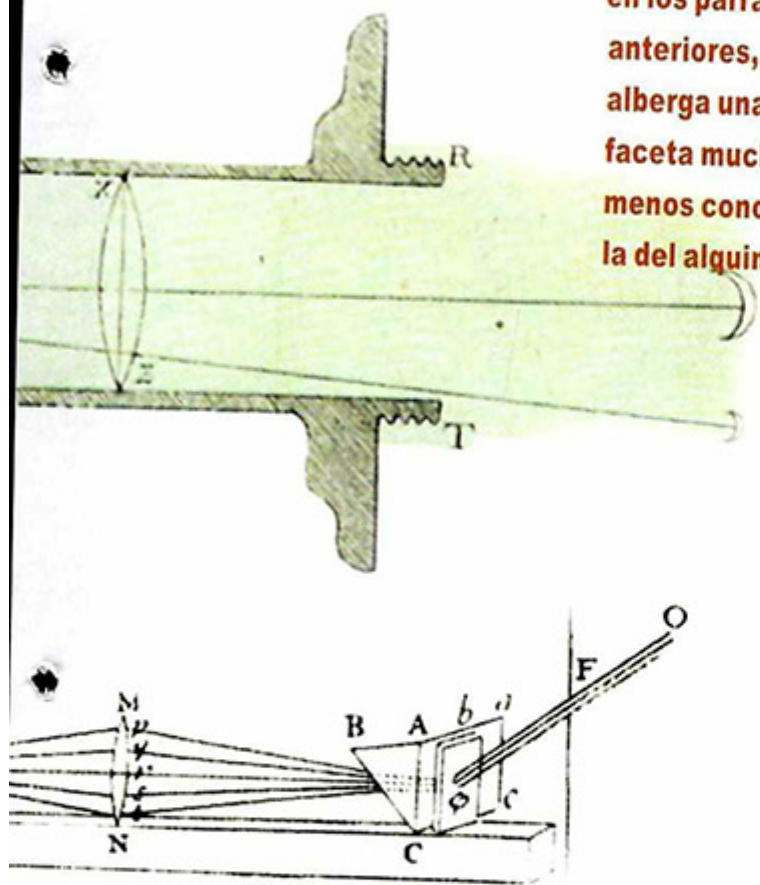


se puedan llevar a cabo procesos deductivos para estudiar fenómenos particulares. El proceso de síntesis consiste en volver a la experiencia con los principios generales para ponerlos a prueba por medio de experimentos, para diseñar nuevos experimentos, abordar nuevos fenómenos, dar explicaciones de ellos, etc.

Pero la rica personalidad de Newton, además de la inclinación hacia la ciencia racional que hemos descrito brevemente en los párrafos anteriores, alberga una faceta mucho menos conocida: la del alquimista o como diría lord Keynes, quien en 1936 develó este tesoro oculto de las investigaciones newtonianas, la del mago.⁵ El espíritu de la alquimia es muy distinto de la racionalidad científica. Mientras que la ciencia es un conocimiento que procede analíticamente separando campos de investigación y definiendo métodos seguros en concordancia con

los objetos respectivos de estudio, la alquimia es una sabiduría milenaria que no se orienta por métodos pre-determinados y que piensa el mundo como un todo unitario, inseparable, como un organismo en el que las distintas partes se interrelacionan y se condicionan mutuamente. La naturaleza que en la ciencia es un dominio secularizado de leyes universales, en

La rica personalidad de Newton, además de la inclinación hacia la ciencia racional que hemos descrito brevemente en los párrafos anteriores, alberga una faceta mucho menos conocida: la del alquimista.



la alquimia es análoga a un ser vivo —capaz de generación por la unión sexualizada de contrarios, de crecimiento, de desintegración y de regeneración—, animada además por un espíritu vital que organiza sus cambios y su desenvolvimiento.

La práctica alquímica que versa sobre la transmutación de las sustancias se ocupa, de manera aun más fundamental, de la transformación y elevación espiritual del propio alquimista.⁶ Los dos procesos no son en realidad sino uno solo. La objetividad estricta de las ciencias naturales —sujeto y objeto como entidades nítidamente separadas— es la

la alquimia en la que sujeto y objeto son caras interrelacionadas de una misma realidad. La salud espiritual del alquimista no es ajena al desenvolvimiento material de los procesos en la retorta.

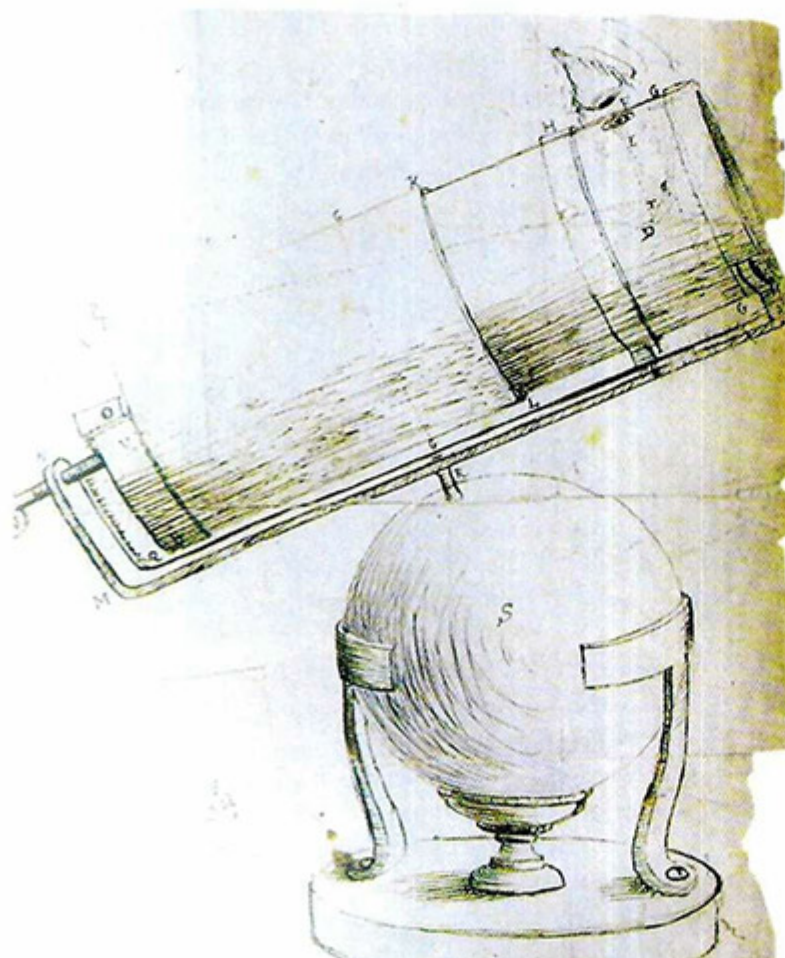
El problema central —y también el reto— que el descubrimiento de esta cara oculta de la actividad newtoniana planteó a los investigadores de la obra del sabio inglés fue el de reconstruir una imagen unificada de su concepción y de su quehacer. Tal vez una de las claves para lograr esta comprensión reside en la manera como Newton entendía las relaciones entre Dios y el mundo. Mientras que para pensadores como Descartes y Leibniz la acción de Dios sobre el mundo se reducía al acto de la creación, del cual surgía un mundo capaz de evolucionar armónicamente por cuenta propia, para Newton esta visión sólo podía conducir al ateísmo porque tendía de hecho a excluir a Dios del mundo. Dios debe estar, como gobernante, permanentemente presente en el mundo, actuando sobre él.⁷ La materia es mera pasividad y sin la ayuda de principios activos, exteriores a ella, el mundo acabaría convertido en una masa inerte y sin movimiento. En efecto, el movimiento es proclive a perderse continuamente por efectos de la fricción.⁸ Para mantenerlo, nos dice Newton, se requiere del concurso de principios activos no materiales, como la causa de la gravedad o de la fermentación, que reclutan movimiento y acción vivificante para los procesos materiales de transformación natural y de vida. Dios mismo actúa sobre el mundo detrás de estos principios espirituales.

Así, a nivel cosmológico, Dios está simultáneamente presente en todas partes a través del espacio absoluto, como si éste fuera su "sensorio",⁹ y actúa sobre el universo a través de principios no materiales como la causa de la gravitación. A nivel de las transformaciones más sutiles de la materia, objeto de la alquimia, Dios actúa a través de principios vitales de vegetación y fermentación. Newton intentó pensar los fenómenos en estas escalas tan diferentes

La acción de la fuerza gravitacional, aunque no su esencia, puede describirse matemáticamente mediante la célebre ley que establece la acción como proporcional al producto de las masas de los dos cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. La alquimia, aunque no de manera matemática, intenta descifrar la acción de las fuerzas microscópicas, de ese "espíritu sutil", que gobierna las transformaciones de la materia.

Por vías distintas, ciencia y alquimia, tienden, según Newton, a un mismo fin: acercarse a Dios a través de su obra y de esta manera elevarse moralmente y honrarlo.

La alquimia, aunque no de manera matemática, intenta descifrar la acción de las fuerzas microscópicas, de ese "espíritu sutil", que gobierna las transformaciones de la materia.



Referencias

1. *Los Principia* hacen referencia a la obra más importante de Newton, publicada en 1687 y que en español lleva el título de *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Editora Nacional, Madrid, 1982. Edición de Escobotado, Antonio.
2. Este es el título que lleva el tercer libro de los *Principia*.
3. La investigación de Newton se encuentra en Newton, Isaac: "A letter of Mr. Isaac Newton, Mathematick Professor in the University of Cambridge, containing his New Theory about Light and Colors" en *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy*, Edited by Bernard Cohen, Harvard University Press, Cambridge Mass. 1958. Una traducción de esta carta se puede encontrar en el apéndice del libro de Granés S., José: *La gramática de una controversia científica*, Editorial Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2001. En este libro puede encontrarse también un análisis de la investigación de Newton sobre los colores de la luz.
4. Una explicación del método de análisis y síntesis puede encontrarse en la *Cuestión 31* del libro de Newton, *Óptica*, Ediciones Alfaguara Madrid, 1977. Traducción de Solís, Carlos p. 349.
5. Keynes, el economista inglés, compró en 1936 un fajo de manuscritos alquímicos de Newton en una subasta. Después de leerlos publicó un artículo en el cual sostenía que la imagen que hasta entonces teníamos del gran hombre de ciencia inglés estaba equivocada. Newton, decía Keynes, habría sido en realidad "el último de los magos". Véase, Keynes: "Newton the man". *The Royal Society Newton Tercentenary Celebrations*, Cambridge University Press, 1947.
6. Explicaciones sobre la alquimia pueden encontrarse en Eliade, Mircea: *Herreros y Alquimistas*. Alianza Editorial, Madrid, 1990 y en Hutin, Serge: *La vida cotidiana de los alquimistas en la Edad Media*, Ediciones Temas de Hoy, Madrid, 1989.
7. Las diferencias de concepción entre Leibniz y Newton en este punto pueden encontrarse en *La polémica Leibniz-Clarke*, Edición de Eloy Rada, Taurus, 1980.
8. Estas tesis se desarrollan en la *Cuestión 31* de la *Óptica*, Ediciones Alfaguara 1977 pp. 342-345.
9. Esta expresión es usada por Newton en la *Cuestión 28* de la *Óptica*, Op. Cit.
10. Un buen estudio de la alquimia de Newton puede encontrarse en Dobbs, BJT: "Newton's Alchemy and His Theory of Matter"; en *Isis* 1982 73 (269) pp.237-254. Véase también Dobbs, Betty Jo Teeter, *The Janus faces of genius. The role of alchemy in Newton's Thought*, Cambridge University Press, 1991.



**CONGRESO LATINOAMERICANO
DE EDUCACIÓN PARA EL
DESARROLLO DEL PENSAMIENTO
SALÓN ROJO - HOTEL TEQUENDAMA
BOGOTA, ABRIL 27, 28 Y 29 DE 2006**

PRECONGRESO

**TALLER:
APRENDIZAJE DESARROLLADOR
Y PROCEDIMIENTOS PARA
ESTIMULAR EL DESARROLLO
INTELLECTUAL**

**BOGOTA, ABRIL 26 DEL 2006
HOTEL TEQUENDAMA INTERCONTINENTAL-
SALON BRITANICO**

DR. JOSÉ ZILBERSTEIN TORUNCHA

Miembro Consejo Científico de Pedagogos de CUBA
APC y Profesor del Centro de Referencia para la
Educación Avanzada - CREA, CUBA

APOYAN:



*Equipo Cisne
de Investigación*

LCCS

UNIVERSIDAD COLOMBIANA CONTRA EL SUICIDIO

FiPC

ALBERTO MERANI
Fundación Internacional de Pedagogía Conceptual

INFORMES



IMAGEN & MERCADEO

Cali: Teléfonos 331 7403 - 330 0236

CONFERENCIAS PLENAS

- MODIFICABILIDAD ESTRUCTURAL COGNITIVA Y MEDIACIÓN PEDAGÓGICA EN EL AULA DE CLASE . EXPERIENCIA: ESCUELAS URBANO MARGINALES DE ECUADOR
Dra. Verónica Zambrano - Entrenadora Certificada del Centro Int para el Desarrollo del Potencial de Aprendizaje ICELP. Jerusalén.
- APRENDER A APRENDER EN LA ESCUELA LATINOAMERICANA DE HOY
Dr. José Zilberstein Toruncha - Miembro Consejo Científico de Pedagogos de Cuba- APC y Docente de Centro de Referencia para la Educación Avanzada - CREA . Cuba
- LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS PROCESOS SOCIEDUCATIVOS
Dra. Águeda Mayra Pérez - Docente del Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño - IPLA. Cuba

CONFERENCIAS SIMULTANEAS

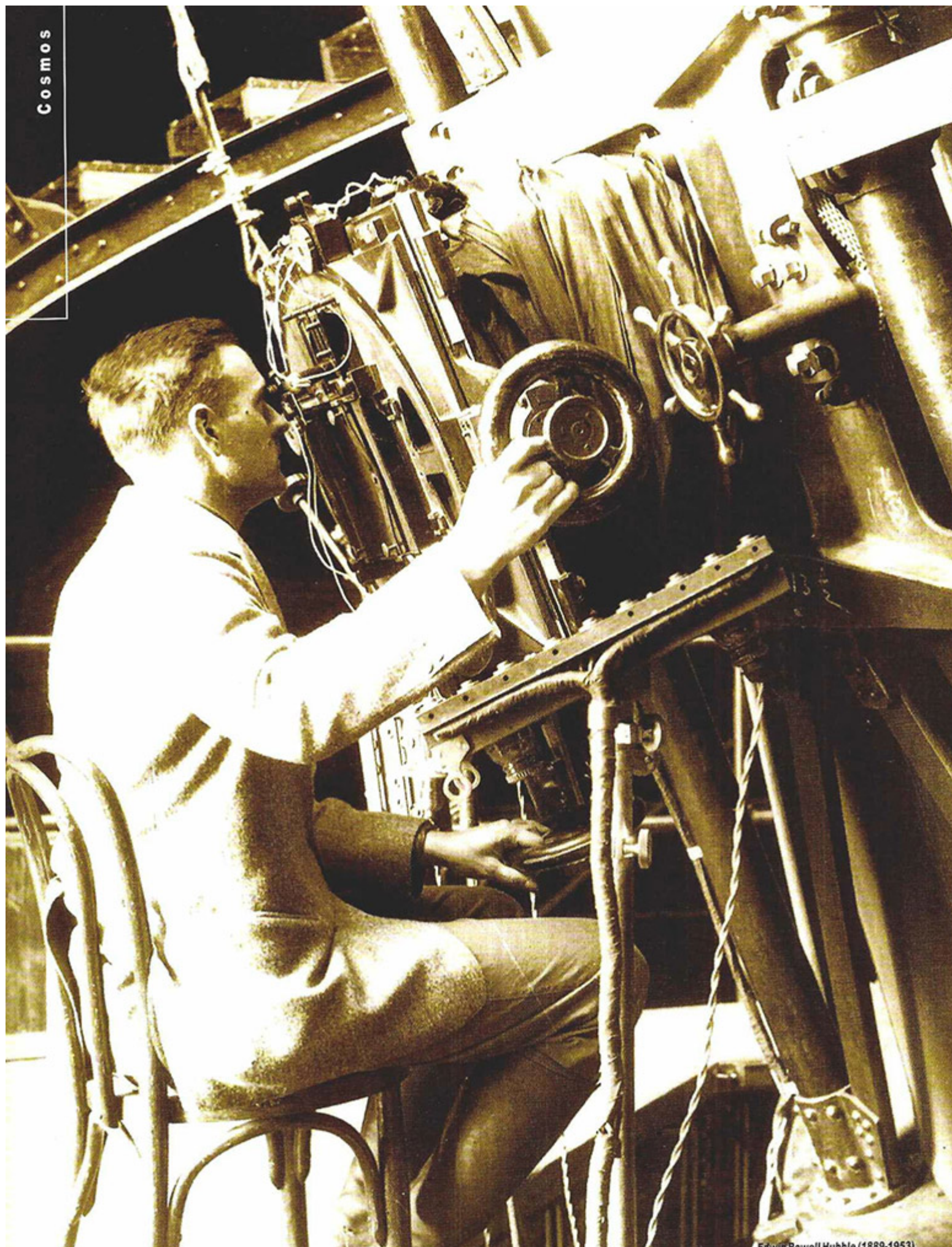
- COMO ENSEÑAR A PENSAR POR MEDIO DE LA EVALUACIÓN
Dr. Pablo de Jesús Romero - Miembro Sociedad Colombiana de Pedagogía - SOCOLPE. Colombia
- EL ADOLESCENTE Y SU EDUCACION EN EL MILENIO
Dr. Guillermo Carvajal - Director de la Fundación Instituto Colombiano de Psicoterapia Integral. Colombia

TALLERES

- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EDUCATIVA Y EL DIAGNOSTICO DE LA INSTITUCIÓN ESCOLAR. Dr. José Zilberstein Toruncha - Cuba
- COMO HACER DESARROLLO DEL PENSAMIENTO EN EL AULA DE CLASE - TEORIA DE MODIFICABILIDAD ESTRUCTURAL COGNITIVA
Dra. Verónica Zambrano -Ecuador
- COMO HACER PARA QUE LA EDUCACION SEA RESILIENTE
Dr. German Roberto Pilonieta - Director Proyecto Cisne de Investigación - Colombia
- CONFLICTOS DE AULA. Dr. Jorge Arturo Padilla - Asesor Colombia
- EDUCACION FILOSOFICA EN LOS NIÑOS Y JOVENES. Dr. Diego Antonio Pineda- Colombia
- COMPETENCIAS EN CIENCIAS SOCIALES
- COMPETENCIAS LABORALES
- DESARROLLO DEL PENSAMIENTO CIENTÍFICO Y LINGÜÍSTICO EN NIÑOS Y JOVENES. Dra. Liliana Mejía Botero - Dirección Investigación Universidad Autónoma - Colombia
- ELEMENTOS DE PEDAGOGIA DEL ARTE. Dr. Daniel Castro Benítez - Museo 20 de Julio, Quinta de Bolívar - Colombia
- OPERACIONES INTELLECTIVAS, INTELIGENCIAS MULTIPLES, FUNCIONES COGNITIVAS Y POTENCIAL DE APRENDIZAJE.
Dr. Giovanni M. lafrancesco - Rector Gimnasio Los Andes
- TECNOLOGÍA: ANÁLISIS A TRAVES DE LA CONSTRUCCION
Dr. Antonio Quintana - Investigador del grupo Didáctica de la tecnología Univ. Distrital (Colombia)
- TÉCNICAS PARA EL ESTUDIO Y DESARROLLO DE LA COMPETENCIA COMUNICATIVA EN LOS DOCENTES.
Dra. Mayra Águeda - Docente del Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño - IPLA. Cuba
- HERRAMIENTAS METODOLOGICAS PARA LA EDUCACION AMBIENTAL. Dra. Olga María Bermúdez - Instituto de Estudios Ambientales Universidad Nacional - Colombia
- DISEÑO DE TALLERES, EVALUACIONES Y ACTIVIDADES DIVERGENTES. Dr. Pablo de Jesús Romero Ibáñez-Asesor Colombia
- CREATIVIDAD. Dr. Diego Parra Duque - Asesor Pdaacol - Colombia
- COMPETENCIAS MATEMATICAS
- COMPETENCIAS EN CIENCIAS NATURALES
- PAUTAS DE INTELIGENCIA CON LOS ADOLESCENTES DE HOY
Dr. Guillermo Carvajal - Director de la Fundación Instituto Colombiano de Psicoterapia Integral. Colombia
- EL VALOR DE LA ARGUMENTACIÓN EN LA EDUCACION DEL FUTURO. Dr. Jaime Sarmiento - Co-investigador Proyecto Cisne
- RESILIENCIA: ¿QUÉ NOS DICE DE LOS PROCESOS DE FORMACIÓN?
Dr. Rafael Campo Vásquez - Docente Univ. Javeriana. Colombia
- LA REALIDAD UN PRETEXTO PARA EL TEXTO
Dra. Rosalba Becerra de Grajales - Premio Nal. Fundalectura 2004. Colombia

MESAS DE TRABAJO

- EL DESARROLLO DE LA INTELIGENCIA EN LA ESCUELA DE HOY . RETOS Y POSIBILIDADES REALES. Dr. José Zilberstein Toruncha. Cuba
- EDUCACION Y RESILIENCIA UN ABORDAJE INMINENTE PARA EL NUEVO MILENIO



Edwin Powell Hubble (1889-1953)

El cosmos ayer y hoy

Sergio Torres Arzayús

Centro Internacional de Física,

Bogotá D.C., Colombia.

E-mail: verada@earthlink.net

El conocimiento que hemos ganado sobre el universo ha seguido un crecimiento no lineal. Han ocurrido muchos sucesos desde la primera observación de una supernova hecha por los chinos hace más de 200 años, hasta las observaciones del cielo profundo realizadas por el telescopio espacial Hubble, pasando por las cenizas de Giordano Bruno, quemado vivo por la inquisición de la iglesia católica por haber propuesto conceptos avanzados sobre el universo. Durante cientos de años el universo era el dominio de pensadores que no tenían acceso a datos experimentales más allá de la observación del cielo estrellado con sus propios ojos. En contraste, los investigadores que actualmente trabajan en cosmología gozan el privilegio de tener a disposición la tecnología y las observaciones directas que permiten probar la validez de sus teorías. El modelo cosmológico del Big Bang es hasta el momento la única teoría que ha pasado la prueba de fuego: las predicciones del modelo son consistentes con las observaciones del cielo profundo en el amplio rango espectral del radio a los rayos gama.

Sin embargo, aún quedan dudas fundamentales por resolver y los intentos de explorar soluciones ponen en evidencia serias limitantes del modelo. ¿Cómo se desarrolló y cuál es el estado actual del modelo estándar cosmológico?

Para los teólogos de turno, que rehusaban mirar por el telescopio de Galileo, el mundo seguiría siendo ese planeta privilegiado en el centro de un universo protegido por una esfera celeste perfecta y etérea.

Aristóteles da las reglas del juego

La física de Aristóteles es supremamente elegante y coherente: con sólo cinco elementos (tierra, agua, aire, fuego, y éter) y sus tendencias a ocupar su lugar natural respectivo explica todos los fenómenos naturales conocidos y elabora un modelo del universo. La forma esférica por su simetría es elevada a la categoría de perfecta y por lo tanto propia para describir los objetos celestes los cuales a su vez están hechos de éter, una sustancia reservada para cuerpos perfectos. El elemento tierra por el contrario es corrupto y tiende a caer al centro, mientras que el fuego tiene la tendencia a ir hacia su lugar natural en el cielo. Estos conceptos no son arbitrarios, tienen

un sólido fundamento en la lógica Aristotélica y un profundo sentido de racionalidad. Podríamos decir que Aristóteles nos entregó las “reglas del juego” que ejercen gran influencia en el subsecuente desarrollo de modelos cosmológicos. Estos conceptos entran al mundo con toda la fuerza de la autoridad de Aristóteles y luego reciben la bendición del escolasticismo reforzando su influencia hasta bien entrado el Renacimiento. Este es el marco conceptual y el fundamento filosófico bajo el cual aparece el modelo Ptolemaico del universo que dominó por 2.000 años: vivimos en un planeta privilegiado al centro del universo y circunscrito en una esfera celeste a su vez poblada por innumerable cantidad de estrellas, otros planetas y un sol.

**Elastrónomo,
geógrafo
ymatemático
griego: Claudio
Ptolomeo
(c.90-168).**

La coherencia del modelo, el sustento lógico, la consistencia con el sentido común y el alineamiento con la teología medieval hacen del

**El modelo
Ptolemaico
del universo dominó
por 2.000 años:
vivimos en un planeta
privilegiado al
centro del universo
y circunscrito en
una esfera celeste
a su vez poblada
por innumerable
cantidad de estrellas,
otros planetas
y un sol.**

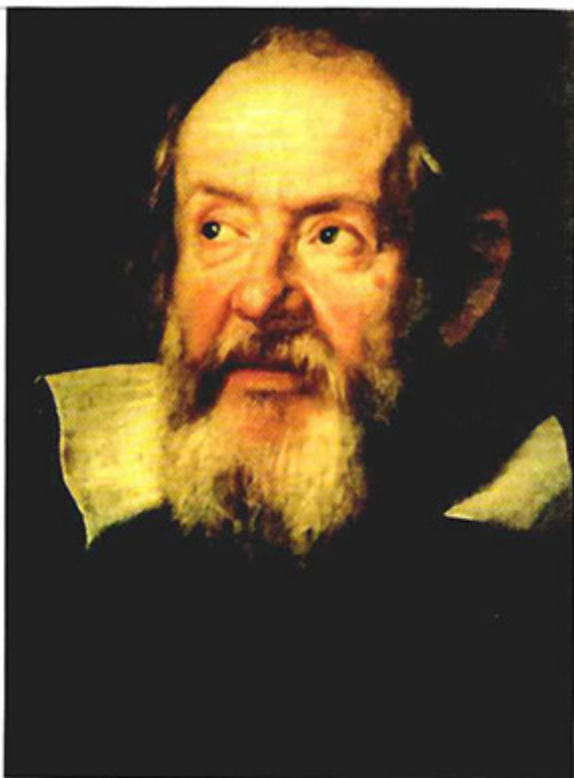
modelo Ptolemaico-Aristotélico la noción oficial del mundo y por lo tanto se opone de forma violenta a cualquier desviación o reto. La suerte de Giordano Bruno dramatiza en forma extrema la situación que se vivía en el siglo XIII. La influencia del recalcitrante racionalismo escolástico se refleja también en la oposición que sufren los filósofos como Pico della Mirandola y Marsilio Ficino, que experimentan con las ideas subversivas del Platonismo.

Galileo perturba el orden

Galileo apunta su telescopio al Sol y le encuentra manchas; a la luna y ve cicatrices; a Júpiter y observa pequeños mundos circundando el planeta. Sus observaciones, en total contradicción con las nociones dominantes, encuentran un universo poblado por cuerpos imperfectos. Mientras que para Galileo la observación directa del cielo es el método apropiado para descubrir la naturaleza, para los teólogos de turno, que rehusaban mirar por el telescopio de Galileo, el mundo seguiría siendo ese planeta privilegiado en el centro de un universo protegido por una esfera celeste perfecta y etérea. Guiado por la observación directa del cielo, Galileo acumula razones para dudar profundamente del modelo Ptolemaico y aceptar el modelo heliocéntrico de Copérnico. “Eppur si muove” se convertirán en las tres palabras más potentes para resumir el choque cultural entre modelos del mundo impuestos por la autoridad filosófica de turno y la naciente era científica.

Con Galileo queda establecido el hecho de que el universo es susceptible de ser observado y estudiado de forma sistemática lo cual rompe con la tradición de elaborar modelos basados en preferencias filosóficas. No queremos con esto decir que el modelo de Ptolomeo es puramente especulativo. De hecho el método usado por Ptolomeo para llegar al modelo geocéntrico se basa en los conocimientos de geometría de los griegos y sigue pasos similares a la práctica científica actual. Que el universo pueda ser estudiado y comprendido es algo que no deja de maravillar. La astronomía y la cosmología son





Galileo Galilei (1564-1642).

en todo sentido ciencias experimentales. Es cierto que no podemos recrear la explosión de una supernova en el laboratorio de igual forma que el físico nuclear, repite en su laboratorio cuantas veces sea necesario las reacciones nucleares que estudia. A diferencia del físico nuclear el astrónomo no está sujeto a la engorrosa tarea de solicitar fondos para realizar experimentos de generación de galaxias en el laboratorio. Para el astrónomo los experimentos ya están realizados y su tarea se reduce a hacer observaciones, recoger datos y analizarlos. El universo es un gran laboratorio lleno de planetas, estrellas, supernovas, galaxias y otros cuerpos celestes. Cada uno de estos es un sistema mucho menos complejo que un mosco.

Einstein provee el marco teórico

La cosmología es el estudio del origen y la evolución del universo considerado como un todo. Son dos los pilares que sustentan la cosmología moderna: el marco teórico de la Relatividad de Einstein y los datos de observaciones astronómicas del cielo profundo. Las observaciones de Hubble en 1929 sobre la expansión del universo y la comprobación de la existencia de otras galaxias como la nuestra dan origen a la cosmología "experimental". La teoría de la Relatividad General desarrollada por Einstein (1915) permite la formulación del modelo del Big Bang.

Antes de Einstein los conceptos de fuerza, espacio y tiempo tenían un carácter absoluto y cuando eran aplicados a la cosmología daban resultados contradictorios. Para Newton el espacio y el tiempo tienen existencia propia fuera de los cuerpos materiales. El espacio es un contenedor donde se albergan los objetos y existe independiente de ellos. Si pudiéramos remover todos los objetos el contenedor permanecería. Para la cosmología el concepto de espacio como recipiente absoluto tiene problemas: si consideramos todas las galaxias y cúmulos y estructuras superiores de galaxias que observamos y las introducimos en este recipiente, surge la necesidad de definir una frontera más allá de la cual no existe nada. Nos podemos imaginar un habitante en la última galaxia justo en la frontera del universo: si éste salta la frontera y viaja hacia fuera se topará algún día con el borde mismo del contenedor. ¿Qué hay más allá de ese borde? Necesitaríamos otro contenedor aún más grande para poder colocar el primer contenedor, y así *ad infinitum*. Algo similar ocurre con el tiempo: ¿Hubo un comienzo del tiempo? y ¿Qué sucedió antes del comienzo?

Con la teoría especial de la relatividad (1905), Einstein desarrolla una formulación de las leyes físicas en el espacio-tiempo, un espacio de cuatro dimensiones de las cuales el tiempo recibe el mismo tratamiento que el espacio. En esta formulación las magnitudes físicas que entran en las ecuaciones deben ser independientes del marco de referencia; por ejemplo la magnitud de un intervalo en el espacio-tiempo debe ser invariante. Si este mismo intervalo se mide en dos marcos de referencia, uno en movimiento relativo al otro, cada observador mide cuatro componentes (tres de espacio y uno de tiempo) los cuales pueden adquirir valores distintos en los dos marcos de referencia. Sin embargo, la magnitud del intervalo calculada usando los valores de las componentes resulta siempre la misma (vg. invariante). De aquí se desprende la insólita realidad que de alguna forma el espacio y el tiempo son intercambiables. Lo son en el sentido que el mismo intervalo en el espacio-tiempo cuando

Son dos los pilares que sustentan la cosmología moderna: el marco teórico de la relatividad de Einstein y los datos de observaciones astronómicas del cielo profundo.

La actividad de crear modelos cosmológicos relativistas no es distinta a la de los astrónomos de la antigüedad que buscaban modelos del mundo usando la geometría como marco teórico.

se observa en dos marcos de referencia distintos puede dar proyecciones del componente tiempo que son distintas en cada marco de referencia. En términos prácticos lo que esto significa es que al tiempo no se le puede dar una interpretación absoluta: si un astrónomo en la Tierra observa la explosión de una supernova el 8 de Julio de 1995 a las 18:05:00, el mismo evento será observado en un tiempo diferente por un astronauta en movimiento relativo a la Tierra. Para que el espacio-tiempo de la Relatividad Especial funcionara, Einstein tuvo que imponer una restricción fundamental en la velocidad de la luz: esta es constante, la misma para todos los marcos de referencia y nada en el universo puede superar la velocidad de la luz.

Equipado con la formulación cuatridimensional de las leyes físicas en marcos de referencia no acelerados, Einstein aborda el tema de las leyes físicas para marcos de referencia acelerados resolviendo muy elegantemente el problema de la gravedad. En la física de Newton la gravedad es una fuerza de atracción entre los cuerpos dotados con masa. El problema aquí radica en la inexplicable

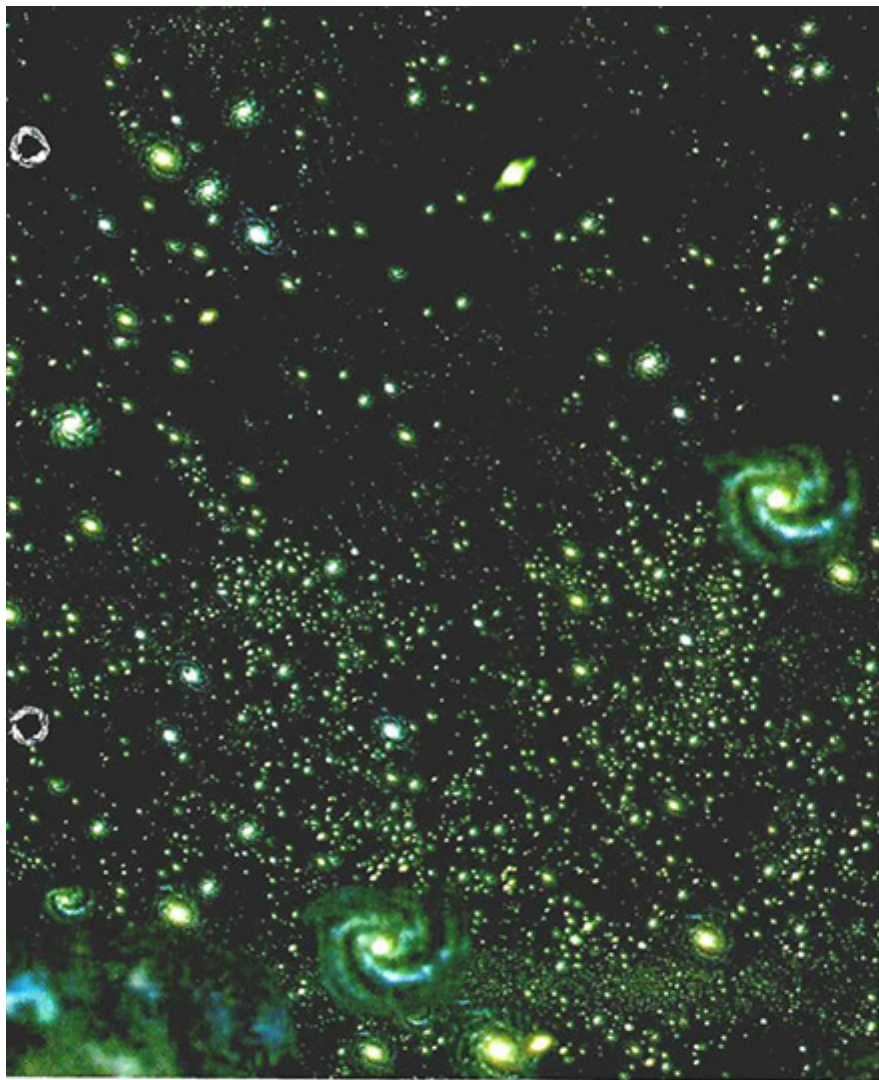
acción a distancia que debe operar entre los dos cuerpos para que la interacción gravitacional pueda tener efecto. Supongamos que pudiéramos quitar el Sol. Según la mecánica de Newton, la Tierra inmediatamente sentiría la carencia de la fuerza de gravedad hacia el Sol y seguiría un movimiento rectilíneo tangente al punto donde perdió contacto con el Sol. Es decir, la gravedad de Newton es una interacción que actúa instantáneamente, lo cual implica la transmisión de algo a velocidad infinita en contradicción con los principios de la Relatividad Especial.

En la Relatividad General el espacio-tiempo adquiere cierta curvatura como respuesta a la presencia de masa (o energía), los cuerpos siguen las trayectorias a lo largo de la línea más corta (en el espacio curvo de cuatro dimensiones) que une los puntos extremos de la misma. Es decir, los cuerpos se mueven libremente como si no sintieran una fuerza y la gravedad simplemente es una manifestación de la curvatura del espacio mismo. Con esto se remueven las dificultades de la acción a distancia: la Tierra se mueve en su órbita

como una partícula libre siguiendo la curvatura del espacio producida por la masa del Sol. Si el Sol fuese a desaparecer, una onda de deformación de la curvatura, propagándose a la velocidad de la luz, llegaría a la Tierra siete minutos más tarde informándole que ya el Sol no existe. Los problemas ya mencionados con los conceptos de espacio y tiempo como entidades absolutas también son resueltos en la Relatividad de Einstein. Para describir el espacio-tiempo en la Relatividad encontramos apropiado, con cierta ironía, acudir a los conceptos Aristotélicos de sustancia y accidente. Podríamos decir que el espacio y el tiempo son accidentes (atributos) de la materia, y así como el color verde (accidente) es un atributo que no existe fuera de la materia (existe la hoja verde, pero no el verde fuera de la hoja), el espacio y el tiempo no existen fuera de la materia/energía.

Modelos cosmológicos relativistas

El primer modelo cosmológico relativista fue enunciado por el mismo Einstein en 1917. En éste se consideraba el universo como una superficie cilíndrica tridimensional sumergida en el espacio cuatridimensional. El diseño de este universo incluyó la famosa constante cosmológica la cual fue usada por Einstein para hacer que su universo recién creado se comportara bien y se sometiera a la noción (o más bien prejuicio) de que el universo debería ser estático. Luego surgen el modelo, también estático pero sin materia, de Willem de Sitter, el de Aleksandre Friedmann (1922) con soluciones que admitían un universo dinámico (en expansión o en colapso) y el "átomo primitivo" del abate Georges Lemaitre (1927) en el cual se incluye materia en expansión que emana de una explosión inicial. Hasta el momento la tarea de los cosmólogos relativistas se limita a un ejercicio académico consistente en hallar soluciones de las ecuaciones de la Relatividad General aplicadas al universo como un todo. Las ecuaciones de la Relatividad General por sí solas no dicen cómo es el universo. Para hallar una solución, primero hay que dar las relaciones existentes entre materia, energía y presión. El universo en su totalidad se considera como un gas con partículas (masa), energía y presión. Las múltiples posibilidades de diseñar un gas resultan en múltiples soluciones de las ecuaciones de Einstein.



La actividad de crear modelos cosmológicos relativistas no es distinta de la de los astrónomos de la antigüedad que buscaban modelos del mundo usando la geometría como marco teórico. Se desarrolla el modelo, se somete a prueba comparando las predicciones del modelo con las observaciones (movimientos planetarios en el caso de los modelos geométricos de la antigüedad) y se rechaza si no funciona o se ajusta introduciendo “epiciclos” para reparar cualquier desviación entre predicciones y observación. Nótese que el mismo Einstein introduce el “epiciclo” de la constante cosmológica. La aparición de “epiciclos” en la cosmología es un fenómeno ubicuo y podríamos decir intrínseco en la ciencia. Nos referimos a “epiciclo” como todo artefacto o contorsión introducido en una teoría para ajustarla a los datos experimentales. En su forma original las teorías se formulan con el mayor grado posible de sencillez. La navaja de Occam ha demostrado una y otra vez su utilidad en el desarrollo de teorías científicas. En física las teorías más elegantes, compactas y simples han sido las más efectivas. Por supuesto, la actividad científica es un quehacer humano no inmune a inclinaciones

que se enamoran de su teoría a pesar de datos adversos a ella y en vez de abandonarla prefieren deformarla con elementos nuevos y ajenos (epiciclos) para tratar de acomodar los datos. Entre mayor sea el número de epiciclos que se le cuelgan a una teoría mayor debe ser la sospecha de que algo anda mal. Este simple principio parece ser bastante preciso y se propone aquí como guía útil para juzgar el estado de avance de los modelos cosmológicos. Nótese el patrón en los modelos geométricos de los griegos: entre los modelos geocéntricos, Eudoxo necesita 26 esferas, Callipo 33 y Ptolomeo 40 epiciclos y 6 ecuantes, mientras que el modelo heliocéntrico original de Aristarco de Samos no necesita epiciclos para explicar el movimiento retrógrado de los planetas. A propósito, Copérnico introduce 48 epiciclos, ¡más que Ptolomeo! La teoría de

la gravedad de Newton tampoco es exenta de epiciclos. De conocida notoriedad es la incapacidad de ésta de explicar el avance anómalo del perihelio de Mercurio, para lo cual se lanzaron posibles variantes de la teoría de Newton incluyendo materia de baja visibilidad en torno al Sol (Le Verrier, 1859), modificaciones a las ecuaciones de Newton (Aspa Hall, 1894) y la incorporación de fuerzas de origen eléctrico.

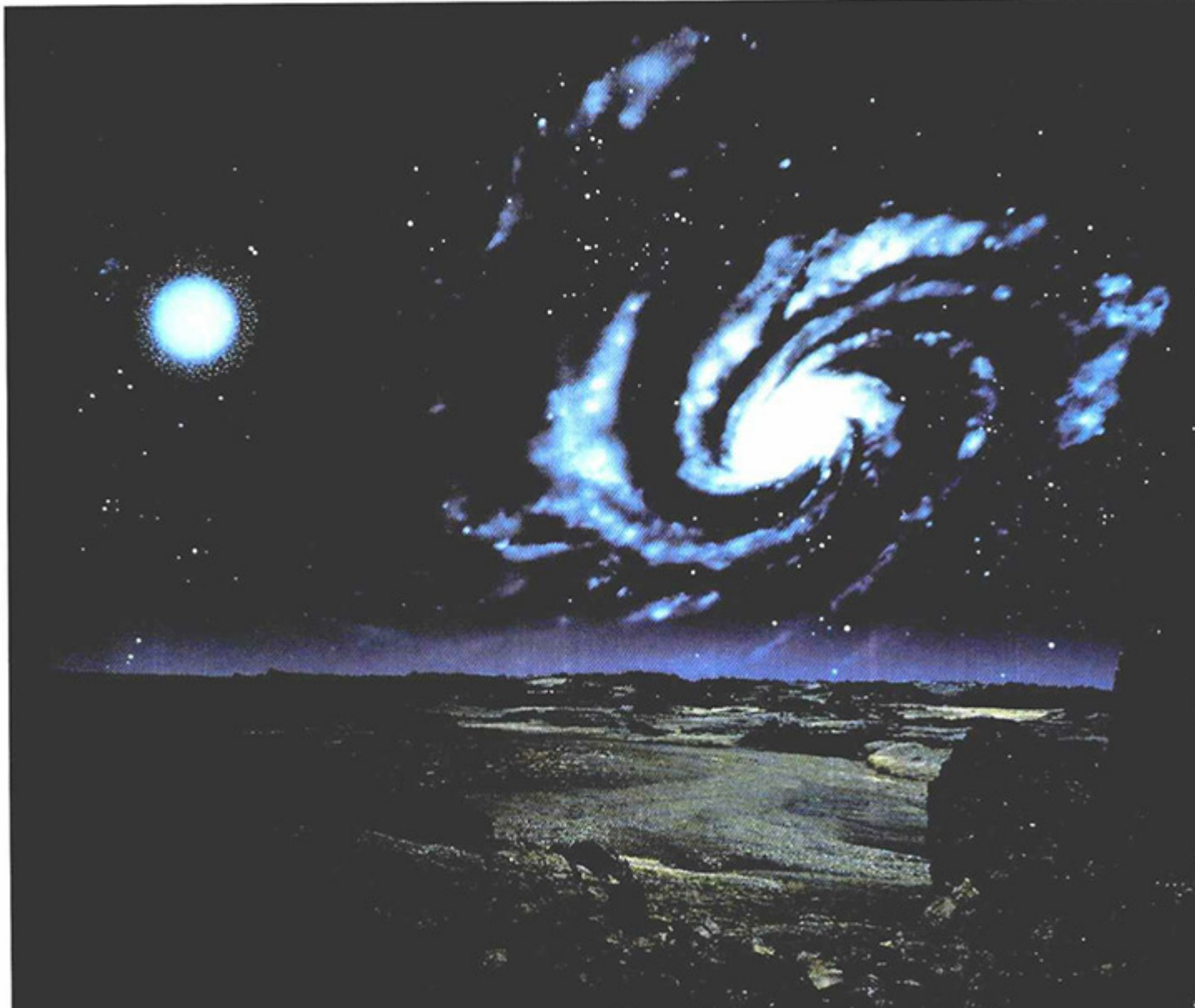
El cosmos hoy

El desarrollo de las tecnologías que permiten hacer observaciones astronómicas en una amplia gama espectral, desde potentes radiotelescopios hasta plataformas satelitales con detectores de rayos X y gama han permitido ampliar nuestra visión del cosmos a niveles nunca soñados por Galileo. Las observaciones indican que vivimos en un universo de geometría plana y en expansión con 13.700 millones de años de edad constituido por un 4,4% de materia ordinaria (de la misma con la que se hacen las rocas, el aire, las moscas y los presidentes) y el

(73%). Hay (por masa) aproximadamente cien mil millones de galaxias agrupadas en estructuras de cúmulos y supercúmulos y cada una de ellas alberga en promedio cien mil millones de estrellas como nuestro Sol. En nuestra vecindad galáctica se han descubierto hasta el momento más de 100 sistemas solares no muy diferentes al nuestro. Todos estos cuerpos astronómicos están sumergidos dentro de un fondo de radiación electromagnética (radiación cósmica de fondo o RCF) que proviene de las primeras épocas del universo cuando la materia, en forma de partículas, y la radiación compartían el mismo estado termodinámico. Cuando observamos una estrella lejana observamos el pasado, ya que la

luz, al propagarse a una velocidad finita, tarda un largo tiempo en llegar a nuestros telescopios. Entre más lejana la estrella más remota en el tiempo es la información recibida. Así se ha podido determinar que el universo temprano era más denso y caliente.

Todas estas observaciones son consistentes con el modelo cosmológico del Big Bang. Este surgió a partir de las ideas de Friedmann, Lemaitre y el físico ruso George Gamow (1946) quien reconoce gracias a sus conocimientos en física nuclear que la fase inicial de alta temperatura y densidad, por la cual necesariamente tiene que pasar un universo en expansión, es un crisol donde se sintetizan los núcleos de los elementos primordiales en el



universo. Con base en mediciones de los espectros estelares, sabemos que la composición del universo es de 75% de hidrógeno, 25% de helio y una pequeña fracción de deuterio y litio de acuerdo con las predicciones de nucleosíntesis del modelo. Los cálculos de nucleosíntesis de los elementos primordiales en el Big Bang también ponen una cota de tres al número de familias de neutrinos en el universo en total acuerdo con las mediciones de la vida media del bosón intermedio Z^0 realizadas en el laboratorio CERN de Ginebra. Trabajando en los cálculos de nucleosíntesis, Gamow y sus colegas R. Alpher y R. Herman (1948) hacen la predicción de la existencia de un fondo cósmico de

microondas que resulta de la radiación existente en el universo durante la nucleosíntesis. El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (RCF) por A. Penzias y R. Wilson (1964) es un hecho conocido que le dio gran impulso al modelo del Big Bang. Las mediciones de anisotropías de la RCF realizadas por el satélite COBE (1992) y más tarde por el satélite WMAP (2003), los dos de la NASA, confirman otras predicciones del modelo con respecto a la RCF: anisotropías a un nivel $\Delta T/T = 10^{-5}$, la huella dejada en la RCF por ondas de densidad en el plasma primordial, polarización de la RCF, coherencia de la polarización a escalas angulares superiores a un grado y distribución espectral de cuerpo negro con temperatura de 2.725 grados Kelvin.

Las anisotropías detectadas en la RCF fueron predichas por el modelo al momento de explicar las observaciones de la estructura a gran escala del universo. Los físicos rusos R. A. Sunyaev y Y. B. Zeldovich (1970) proponen un mecanismo para generar la estructura observada a partir de perturbaciones en el plasma primordial. Estas fluctuaciones del plasma primigenio dejan huellas en la radiación con características compatibles con el espectro de potencias de la RCF medido por la sonda WMAP. Como vemos,

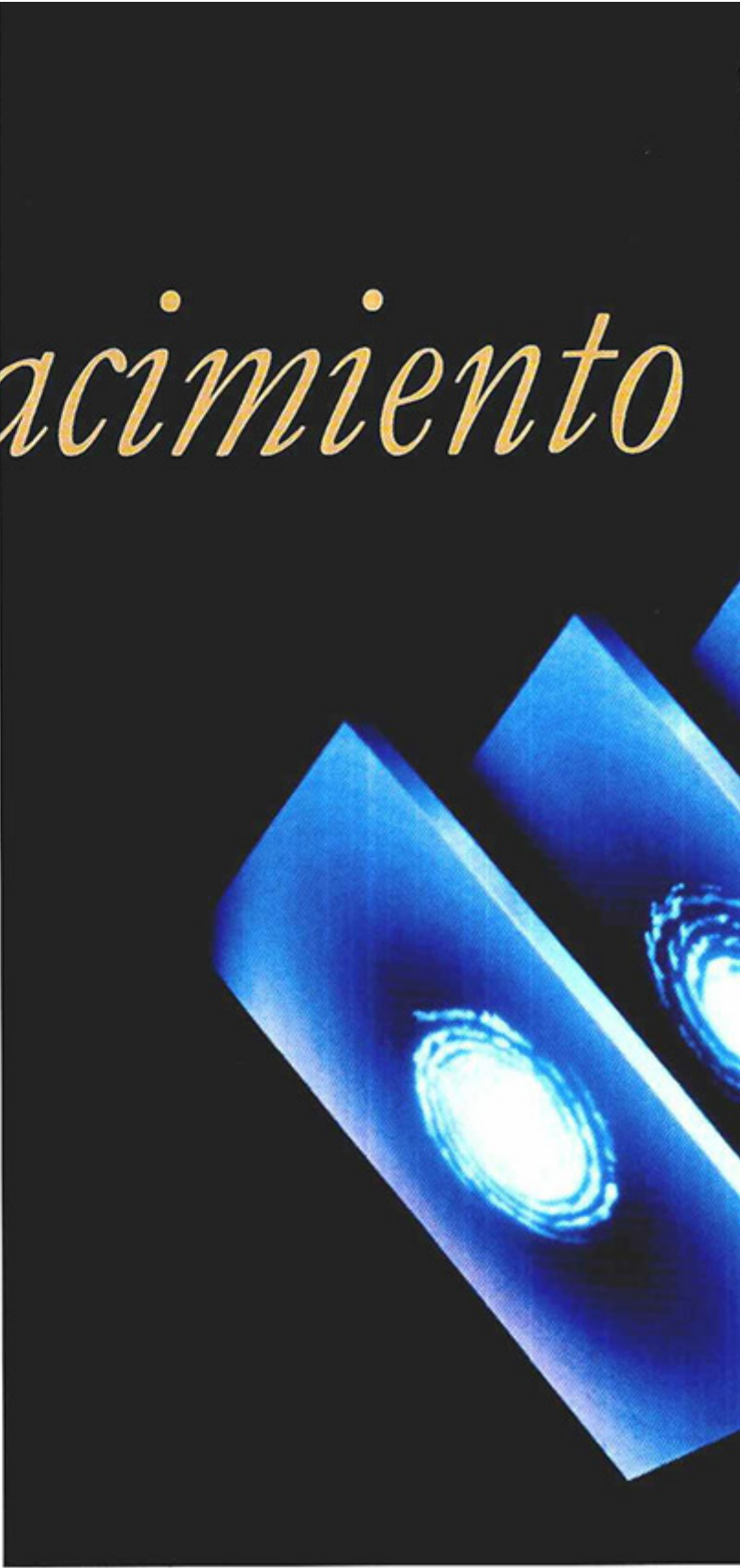
la coherencia del modelo y la contrastabilidad empírica explican el nivel de aceptación de la teoría del Big Bang comparable con a las grandes teorías modernas como la Relatividad y la mecánica cuántica. La teoría del Big Bang también tiene sus 'epiciclos'; entre los más embarazosos cabe destacar la necesidad de materia oscura y de la constante cosmológica. La teoría también tiene limitaciones: pierde toda capacidad predictiva cuando se lleva a fracciones de segundo después de la singularidad al origen del tiempo. Esta última limitante es simplemente la manifestación de la carencia de una teoría cuántica de la gravedad. Se espera que la teoría del Big Bang sea cubierta por teorías más avanzadas de gravedad cuántica (teoría de cuerdas, por ejemplo) de igual forma que la teoría de la gravedad de Newton (la cual sigue siendo válida a escalas no cosmológicas de masa y distancia) fue cubierta por la teoría de la Relatividad General.

Algunos críticos del Big Bang, entre ellos reconocidos cosmólogos como J. V. Narlikar, H. Arp, G. Burbidge y F. Hoyle, proponentes del modelo cosmológico cuasi-estacionario, hacen referencia a los 'epiciclos' del Big Bang mencionados. Se han propuesto modelos cosmológicos alternativos que van desde lunáticos que publican una página entera en el New York Times (Robitaille, marzo 17 de 2002) pregonando la noción de que el universo es una bola de agua líquida hasta alternativas serias como la del modelo cuasi-estacionario. Todas estas alternativas tienen un factor de epiciclo supremamente superior al Big Bang. Además, los 'epiciclos' de materia oscura y constante cosmológica del Big Bang gozan de cierto nivel de plausibilidad. Recordemos los 'epiciclos' más destacados de la mecánica cuántica: el neutrino y la antimateria, confirmados experimentalmente años después de su aparición como curiosidad teórica. Algunos críticos de la ciencia, que se adhieren a las tendencias modernas de la sociología de la ciencia pondrían la teoría del Big Bang al mismo nivel que el modelo de la bola de agua o cualquier mito de la creación. El Big Bang se salva de esas apreciaciones gracias al poder autoregulador de la contrastabilidad empírica inherente en el proceso científico.

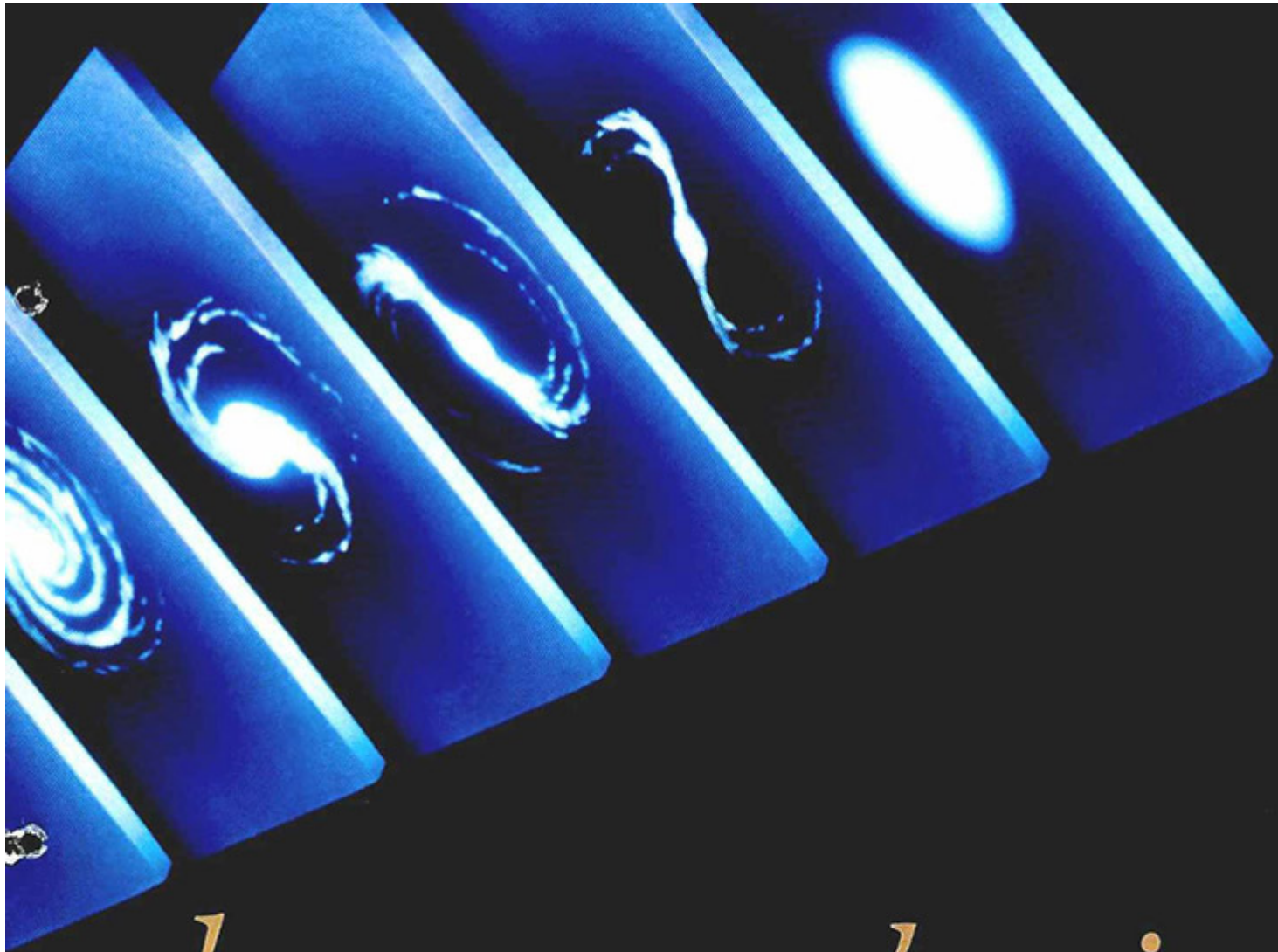
El nacimiento

Pedro Ignacio Deaza Rincón

*Licenciado en Física,
Universidad Pedagógica Nacional;
Especialista en Física,
Universidad Nacional de Colombia;
Profesor, Facultad de Ingeniería,
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas;
Director, Grupo de Ondas
Electromagnéticas y Astrofísica y de la
Sección AstroLinux, Grupo Linux,
Universidad Distrital,
Bogotá D.C., Colombia.
E-mail 1: pdeaza@udistrital.edu.co
E-mail 2: pideazar@unal.edu.co*



Hasta hace aproximadamente un siglo no se sabía de la existencia de las galaxias y menos aun del número de ellas contenidas en un universo observable. Sólo con el advenimiento de nuevas tecnologías de observación, Edwin Hubble y otros demostraron que las manchas difusas y borrosas consideradas hasta entonces estrellas moribundas eran en realidad gigantescas estructuras



de una galaxia

de estrellas a las que se les llamó galaxias.¹⁸ ¿Cuál es la razón para que las estrellas se hallen organizadas en estas gigantescas estructuras entre las que median inmensos vacíos?, ¿cómo se originaron estas grandes estructuras?, ¿por qué las galaxias presentan una gran variedad de tamaños, formas y masa? Para construir un modelo de formación de las galaxias se estudia su conducta física y sus propiedades. La clasificación de Hubble divide

las galaxias en tres grandes grupos: elípticas, espirales e irregulares (*figura 1*). Cerca del setenta por ciento de las galaxias observadas son espirales; el resto corresponde a galaxias elípticas y en menor escala, a irregulares.

Las galaxias elípticas tienden a ajustarse a una simetría esférica, contienen muy poco polvo y son pobres en regiones de plasmas. La mayor parte de sus estrellas son muy evolucionadas. Las galaxias

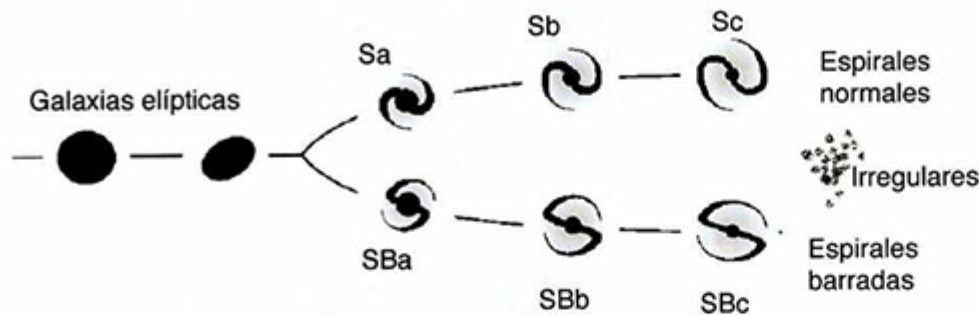


Figura 1.
Clasificación
morfológica
de Hubble.

espirales poseen una forma elipsoidal bastante aplana y sus brazos están compuestos de regiones de plasma, polvo y estrellas jóvenes y calientes. La región central es un bulbo esferoidal generalmente muy masivo y un gran porcentaje de ellas presenta una barra rectangular que, al parecer, tiene origen en inestabilidades del disco. Las galaxias irregulares no presentan una forma definida, una parte de las elípticas y las espirales muestran un núcleo pequeño y luminoso denominado AGN, núcleo galáctico activo (figura 2).

La estructura estelar de las galaxias que se observan, posee una distribución espacial cuyo origen se debe buscar en la dinámica del plasma que las formó.

Figura 2: Galaxias elíptica, espiral normal, espiral barrada e irregular.



Las galaxias, tal como las observamos hoy, son el resultado de un largo proceso de colapso de gigantes nubes de plasma, constituidas por regiones de hidrógeno neutro (HI), hidrógeno ionizado (HII), hidrógeno molecular (H₂) y en menor proporción helio (HeI) y helio ionizado (HeII). El proceso evolutivo y gradual de formación de estrellas se fundamenta en el colapso a gran escala del plasma y su posterior proceso de fragmentación y consecuente generación de subcolapsos a diferentes órdenes hasta un cierto límite. Las estrellas en su evolución, retornan al medio interestelar, primordialmente en sus etapas inicial y final, una fracción significativa del plasma con el cual se formaron.

De lo anterior se deduce que a lo largo de su evolución el plasma disminuye progresivamente. En el proceso de colapso del plasma, se forman estrellas gigantes que fusionan en poco tiempo unos millones de años el trece por ciento de sus núcleos de hidrógeno, proceso que las conducirá hacia etapas más avanzadas de su evolución y posteriormente a su catastrófico final; a estas estrellas azules y efímeras las caracteriza una elevada temperatura. También se forman estrellas pequeñas, que emplean miles de millones de años en el proceso de fusión de ese trece por ciento de sus núcleos de hidrógeno, su temperatura es baja, son rojas y duraderas.

Como la cantidad de plasma es cada vez menor, la población de estrellas gigantes es cada vez menor y las galaxias van enrojeciendo en su evolución. Este enrojecimiento no necesariamente es homogéneo y de todas maneras prevalecen zonas de concentración de plasma, caracterizadas por un color azul.⁴ El plasma que las estrellas retornan al medio interestelar ha evolucionado junto con ellas. En el interior de la estrella, las condiciones físicas, caracterizadas por las variables de estado, han favorecido los procesos de fusión y han ocurrido reacciones nucleares que han llevado a convertir las estructuras nucleares simples en estructuras nucleares más complejas, conocidas en astrofísica como metales, que corresponden a elementos más pesados que el helio. La evolución produce como resultado una galaxia empobrecida en plasma, más roja y con mayor concentración metálica. El plasma posee un movimiento complejo. Puede

sufrir pérdidas de energía por viscosidad y hallarse en un estado de ionización tal que su movimiento se vea afectado por el campo magnético que él mismo contribuye a crear.¹¹

La estructura estelar de las galaxias que se observan, posee una distribución espacial cuyo origen se debe buscar en la dinámica del plasma que las formó. El estudio de

la dinámica del plasma no avanza significativamente cuando la astrofísica se surtía primordialmente de información proveniente de las observaciones en la región visible del espectro electromagnético. Las estrellas poseen una temperatura superficial que las hace visibles. El plasma está más frío y su emisión se observa generalmente en ondas de radio. No obstante, existe plasma a mayor temperatura y algunas regiones emiten en visible, rayos ultravioleta y rayos X, y mediante procesos no térmicos en cualquier región del espectro electromagnético.

Hay regiones muy localizadas de plasma que se observan en el visible; a estas regiones se les llama nebulosas. En las nebulosas denominadas regiones HII, poseen estrellas, las más calientes, que emiten

átomos y la recombinación produce átomos de hidrógeno neutro excitado que emite; en el visible es muy intensa la línea H_{α} que proporciona un color rojizo a las regiones de HII, pero tiene, además, otras líneas de emisión, por ejemplo, la nebulosa de Orión. Otras nebulosas se han originado en plasma eyectado por estrellas moribundas. De este tipo son las nebulosas planetarias, constituidas básicamente por hidrógeno ionizado y restos de supernova. Una región HII también está constituida de hidrógeno

atómico e hidrógeno molecular. El procedimiento más eficiente para medir directamente H es la emisión en 21 cm. Esta emisión permite determinar su concentración y su movimiento. La concentración de hidrógeno molecular se mide indirectamente observando la emisión de monóxido de carbono en 2,6 Mm.,¹⁶ pues debe existir una correlación entre la intensidad en 2,6 Mm. y la concentración de hidrógeno molecular.

Colapso de nubes magnetizadas

Colapso de nubes magnetizadas

En ocasiones, en el universo, las nubes de plasma magnetizadas adquieren una densidad suficiente para que su autogravitación desencadene el colapso gravitacional que las conducirá a la formación de una gran estructura, con una morfología, unas propiedades físicas básicas y constituida por un gran número de estrellas, estructura que se denomina galaxia (figura 3).

Con el objeto de explicar cómo nace una galaxia, usualmente se habla de una gran nube isoterma de masa constante que se contrae en un proceso adiabático, inmersa en un medio de muy baja densidad, caliente, de gravedad despreciable comparada con la gravedad de la nube y en presencia de un campo magnético uniforme, que puede variar, pero de tal modo que el flujo mag-

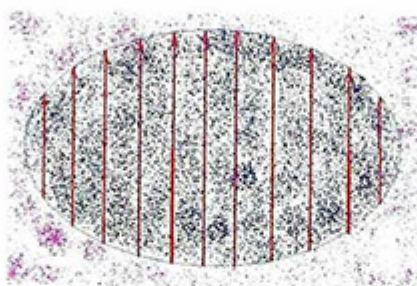


Figura 3: Representación esquemática de la nube magnetizada.

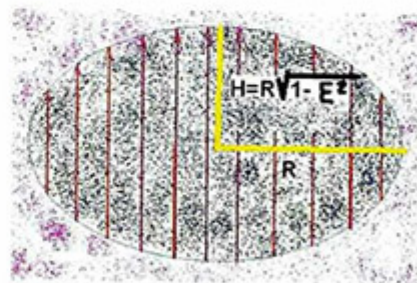
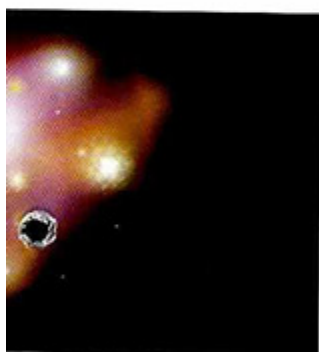


Figura 4: Parámetros de la geometría de la nube E , es la excentricidad.



Presión en función del radio ecuatorial

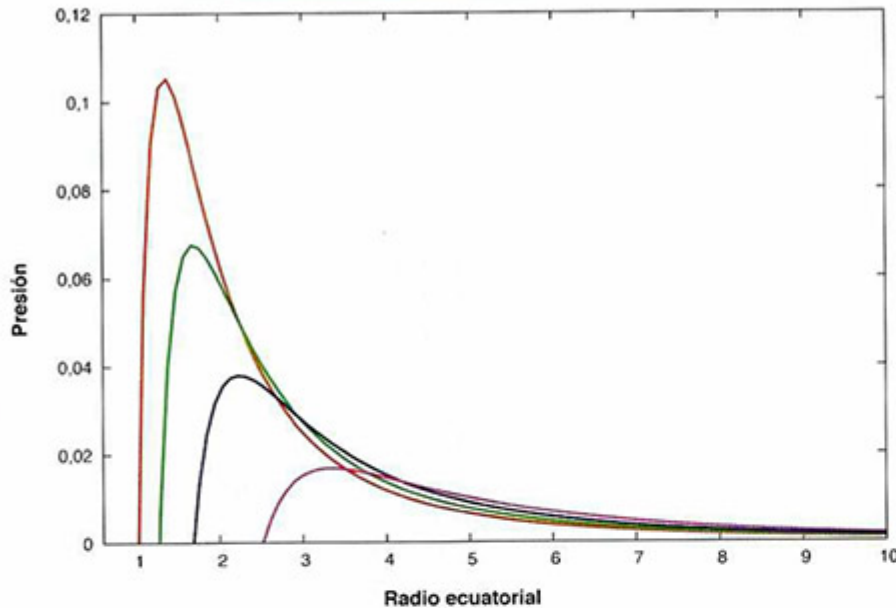


Figura 5: Presión en función del radio ecuatorial de la nube para diversos valores de la excentricidad ϵ . Curva superior $\epsilon=0$. En la secuencia descendente $\epsilon=0,6$, $\epsilon=0,8$, $\epsilon=0,9$.

Un método elegante y también riguroso para construir un modelo de las primeras etapas de la formación de una galaxia, consiste en derivar a partir de un análisis dinámico, la forma como se conserva la energía durante el proceso mediante el cual la nube alcanza una situación de equilibrio que antecede al inicio de la contracción que la conducirá inevitablemente al colapso gravitacional y al posterior proceso de fragmentación hasta alcanzar la etapa de formación estelar (figura 4).

La forma como se conserva la energía, permite establecer una relación entre el radio ecuatorial de la nube y la presión externa necesaria para el colapso. Como las observaciones cosmológicas y astrofísicas dan cuenta de la existencia de nubes protogalácticas esféricas, elípticas y en mayor porcentaje, elipsoidales de radio constante, es decir, esferoides de una gran excentricidad, se asume entonces, un volumen para la nube inicial, constituido por un elipsoide de revolución de radio constante, es decir, un esferoide para el cual su excentricidad puede variar entre 0 y 1; más explícitamente, puede ser una distribución esférica o en el otro extremo, un esferoide muy aplastado o sea caracte-

rizado por una excentricidad cercana a uno. En general, matemáticamente se asume la condición: $0 \leq \epsilon < 1$.

La variación de la presión p en función del radio ecuatorial R de la nube para diversos valores de ϵ y sujetándonos a la condición $0 \leq \epsilon < 1$ (figura 5), exhibe una familia de curvas, cada una con un máximo de coordenadas $(R_{Máximo}, p_{Máximo})$.

Si $R > R_{Máximo}$, el equilibrio es estable, las pendientes de las curvas son negativas, un aumento del radio de la estructura implica un medio externo incapaz de ejercer una presión que conduzca a la nube a alcanzar una situación límite de equilibrio que antecede al colapso gravitacional. Si $R < R_{Máximo}$, una disminución del radio de la estructura implica una presión mayor que la del equilibrio, y como consecuencia una contracción mayor

de la estructura. El resultado será una contracción progresiva, es decir, la nube colapsará a causa de la autogravitación. El colapso no será de ningún modo indefinido, porque la condición de temperatura constante dejará de cumplirse y adicionalmente aparecerán gradientes de temperatura asociados con inhomogeneidades y todo ello íntimamente ligado a la aparición de subnubes, que a su vez colapsarán para luego fragmentarse hasta un cierto límite establecido cuando la densidad de los fragmentos sea muy elevada y estos colapsen hacia la formación estelar. El resultado serán zonas localizadas pobladas estelarmente, es decir, los cúmulos estelares que constituirán la galaxia.

Cerca del setenta por ciento de las galaxias observadas son espirales, el resto corresponde a galaxias elípticas y en menor escala a irregulares.

La curva que posee el mayor de los máximos, corresponde a una nube con una geometría cuya excentricidad es $\epsilon = 0$. Si la excentricidad aumenta gradualmente hasta valores cercanos a 1, las coordenadas del máximo varían siguiendo una forma funcional inversamente proporcional, de tal modo que la presión disminuye mientras que el radio de la nube aumenta. Es decir, una nube protogaláctica con simetría esférica, se hallará en

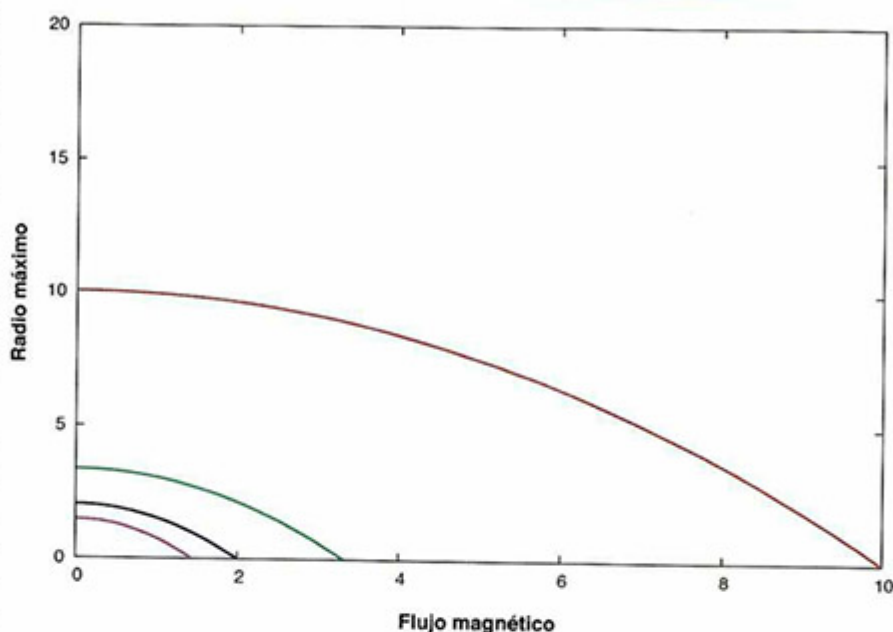
el equilibrio exigiendo una mayor presión p y exhibiendo un radio R menor que el de cualquier otra estructura con excentricidad $\epsilon > 0$. De otro lado, una nube protogaláctica de disco con una excentricidad cercana a uno, requiere en el equilibrio una menor presión y su estructura posee un enorme radio ecuatorial.

El tamaño y la geometría de la galaxia dependen de la excentricidad, pero también interviene de modo significativo el campo magnético, hecho que observamos en la *figura 6*: para excentricidades muy cercanas a 1, el radio máximo para la nube es grande, pero disminuye progresivamente a medida que el flujo magnético aumenta. Nótese que si el campo magnético aumenta, llegará un momento en que este no sólo dificulte el colapso, sino que lo impida. El resto de curvas de la familia nos evidencia que a medida que la excentricidad disminuye hasta alcanzar el caso esférico, los correspondientes radios ecuatoriales para una nube van siendo cada vez menores y asumiendo la misma conducta funcional ante la presencia del campo magnético. Cada flujo caracteriza una nube en particular.

La gráfica de la presión p en función del flujo magnético, *figura 7*, nos confirma una vez más que para nubes cuya geometría está asociada con una simetría esférica se requieren presiones más elevadas que para nubes de disco.

Es interesante observar que en el caso de geometrías con excentricidad cero, aun ante la presencia de campos magnéticos débiles, rápidamente la presión externa tiende a infinito, mientras que en

Radio máximo ecuatorial en función del flujo magnético



En regiones de campo magnético intenso, es muy difícil la formación de estrellas, sólo nubes muy masivas podrán colapsar.

estructuras con excentricidades cercanas a 1 se requieren campos magnéticos mayores para impedir el colapso gravitacional.

Una nube extensa, muy aplanada, es decir, con una geometría cuya excentricidad tiende a 1, no sólo puede poseer un campo magnético mayor que en el caso esférico, sino que en un rango apreciable, su autogravitación es capaz de superar la dificultad impuesta por el campo magnético para colapsar.

Es evidente entonces, que en regiones de campo magnético intenso, es muy difícil la formación de estrellas, sólo nubes muy masivas podrán colapsar.

Conclusiones

Las nubes más excéntricas, es decir, las nubes con una geometría esferoidal muy aplanada, colapsan con mayor facilidad que las nubes esféricas, ya que estas últimas requieren de una mayor presión externa para colapsar y sus radios son menores que los de las esferoides de geometría aplanada. Este resultado conceptual y cualitativo concuerda muy bien con la aseveración de que, un 70 por ciento de las galaxias observadas son espirales.

El análisis de la presión para diversos casos de un flujo magnético establecido para una nube de

Figura 6: Radio máximo en función del flujo magnético para diversos valores de la excentricidad.

Presión máxima en función del flujo magnético

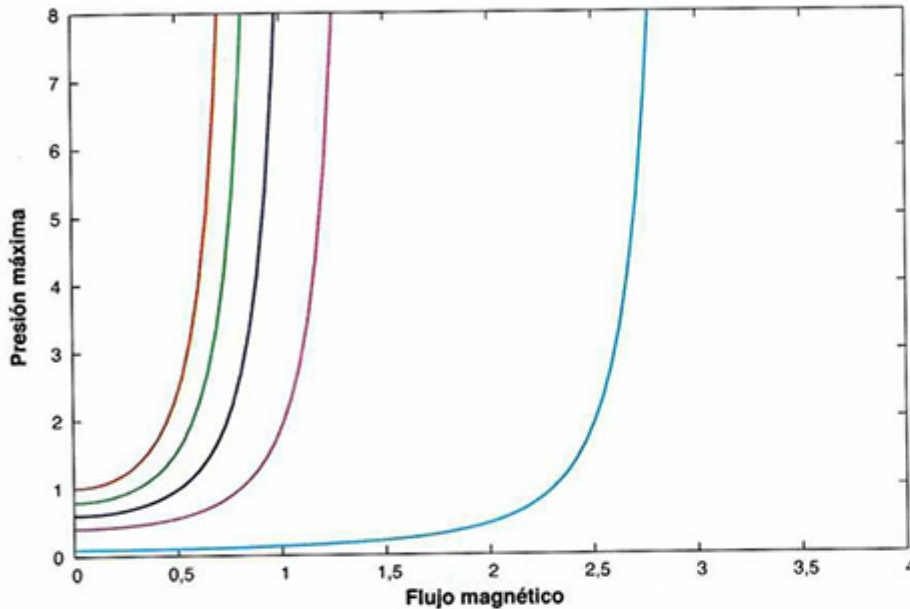


Figura 7: Presión en función del flujo magnético para diversos valores de la excentricidad ϵ .

permite no sólo esclarecer el papel del campo magnético en el colapso de grandes nubes, sino su relación con la geometría de la nube.

Para una nube magnetizada cuya geometría corresponda a la de una nube esferoidal muy aplanaada, la autogravitación terminaría superando las dificultades impuestas por el campo magnético para colapsar. De otro lado, en una nube esférica la autogravitación tendrá mayor dificultad para superar las condiciones impuestas por un campo magnético intenso.

Finalmente, es obvio que no cualquier masa podrá colapsar; existe una masa mínima en presencia de un campo magnético y depende también de la geometría por debajo de la cual no habrá formación galáctica.

Perspectivas

Se puede construir un panorama numérico de las galaxias a partir de los anteriores resultados, lo que se constituye en la herramienta primordial que nos permita comparar más de cerca los modelos teóricos con la observación.

Referencias

1. Alfven H.: *Cosmic Plasma*. D. Reidel Publishing Company. London, 1981.
2. Alfven H.: *Cosmical Electrodynamics*, Oxford at the Clarendon Press. London, 1981.
3. Barger A. J.: *El universo maduro*. Investigación y Ciencia, Marzo 2005.
4. Battaner E.: *Fluidos Cósmicos*. Editorial Labor Universitaria. Barcelona, 1986.
5. Binney J., Tremaine S.: *Galactic Dynamics*. Princeton University Press. New Jersey, 1990.
6. Bradley W., Carroll Dale A.: *Ostlie. An Introduction to Modern Astrophysics*. Addison Wesley. Massachusetts, 1996.
7. Burkert A., Truran J. W., Hensler G.: *The Collapse of our Galaxy and the Formation of the Galactic Disk*. *The Astronomical Journal*, 391:651-658, June 1, 1992.
8. Burns J. O.: *Macroestructuras del universo*. Investigación y Ciencia, 1988.
9. Chandrasekhar S., Fermi E.: *Astrophys. J.*, 118, 113. 1953.
10. Combes F., Boisse P., Mazure A.: *Galaxies and Cosmology*. Springer. Paris, 1991.
11. Cowling T. G.: *Magnetohidrodinámica*. Editorial Alhambra. Madrid, 1968.
12. Delcroix J. L.: *Introducción a la Teoría de los Gases Ionizados*. Editorial Alhambra. Madrid, 1968.
13. Denisse J. F., Delcroix J. L.: *Teoría de las Ondas en los Plasmas*. Editorial Alhambra. Madrid, 1968.
14. Ellis Richard S.: *Galaxy formation and evolution*. *Astro-ph/0102056*.
15. Ferreras I., Wjste R. F.G., Silk J.: *The Formation History of the Galactic Bulge*. *MNRAS*, 30 July, 2003.
16. Gordón M. A., Barton W. B.: *Monóxido de carbono en la galaxia*. Investigación y Ciencia, 1986.
17. Ibanez M., Parravano A., Mendoza C.: *On the Thermal Structure and Stability of Configurations with Heat Diffusion and Gain-Loss Function I. General Results*. *The Astrophysical Journal*, 398:177-183, October 1992.
18. Kauffmann G. y Bosch F. van den: *El ciclo vital de las galaxias*. Investigación y Ciencia, Temas 33, 2003.
19. Tomisaka K.: *Collapse of Rotating Magnetized Molecular Cloud Cores and Mass Outflows*, *Theoretical Astrophysics*, National Astronomical Observatory, Mitaka Tokyo August 2002.
20. Krolik Julian H.: *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1999.
21. Osterbrock Donald E.: *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University Science Books. Mill Valley California, 1989.
22. Shu F. H.: *Gas Dynamics*. University Science Books. Sausalito, California, 1992.
23. Strittmatter P. A.: *Gravitational Collapse in the Presence of a Magnetic Field*. *Mon Royal Astronomical Society*. 132, 359-378. 1966.
24. Strom S. E. y Strom K. M.: *Evolución de las galaxias de disco*. Investigación y Ciencia, 1980.
25. Tajima T., Shibata K.: *Plasma Astrophysics*. Addison Wesley, Massachusetts, 1997.
26. Yeng Ting L.: *Introduction to the Study of Giant Molecular Clouds*, Department of Astronomy University Illinois, June 2003.
27. Zweibel E. G.: *Virial Theorem Analysis of the Structure and Stability of Magnetized Clouds*. *The Astrophysical Journal* *American Astronomical Society*. 348:186-197, January 1. 1990.



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA

Innovación y Ciencia

Publicación trimestral
que informa sobre
los últimos avances
en Ciencia y Tecnología
realizados en
Colombia y el mundo

FECHA DE SUSCRIPCIÓN

DIA / MES / AÑO

SUSCRIPCIÓN POR UN AÑO,
4 EJEMPLARES,
A PARTIR DEL NÚMERO:

»cupón de suscripción
Suscripción anual \$36.000 oo · Precio: número regular \$9.500 oo, edición especial \$12.500 oo · Asociado ACAC: gratuita

NOMBRE

CC O NIT

DIRECCIÓN

TELÉFONO

CIUDAD

CORREO ELECTRÓNICO

FAX

PROFESIÓN

ESPECIALIDAD

FORMA DE PAGO

EFECTIVO TARJETA DE CRÉDITO DINERS #

Credibanco y Credencial se reciben directamente en nuestra oficina.

CHEQUE

VENCE

CUOTAS

NÚMERO DE SEGURIDAD

ACEPTO RENOVACIÓN
AUTOMÁTICA

SI

NO

Consignación a nombre de «Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia» en:
Banco de Occidente, cta. # 26880746-8 · Banco Agrario, cta. # 0230-002930-5 · Banco Popular, cta. # 160-203196

Mecánica cuántica

J. Virgilio Niño C.

*Profesor Asociado,
Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C., Colombia.
E-mail: virgilioni@unal.edu.co*



Presente y futuro

Desde hace siglos el hombre se ha planteado una serie de preguntas que permanecen aún sin solución, aunque ciertamente se ha avanzado en sus enfoques; algunas de estas preguntas conciernen al origen del universo, de la vida y a la estructura y composición de la naturaleza o más precisamente, de la materia. Los griegos idearon modelos para dar cuenta de la variedad de formas que vemos en la naturaleza y de las diferentes estructuras a partir de la suposición de la existencia de unidades materiales indivisibles de diversas formas que se acoplaban unas a otras. Estas formas indivisibles eran llamadas átomos.

Siglos más tarde, a comienzos del siglo XIX, Avogadro, Gay-Lussac y particularmente Dalton establecieron las bases para aceptar la existencia de los átomos. Dalton propuso un conjunto de postulados concernientes a la naturaleza de los átomos que explicaban la forma en que éstos se combinaban para dar origen a diferentes compuestos.

A finales del siglo XIX se encontró que los átomos de Dalton no eran indivisibles; Thomson descubrió la existencia del electrón como componente de los átomos. En esa misma época se midió el espectro de emisión y absorción de diferentes elementos químicos, los que en última instancia constituían una identificación o huella particular de cada uno.

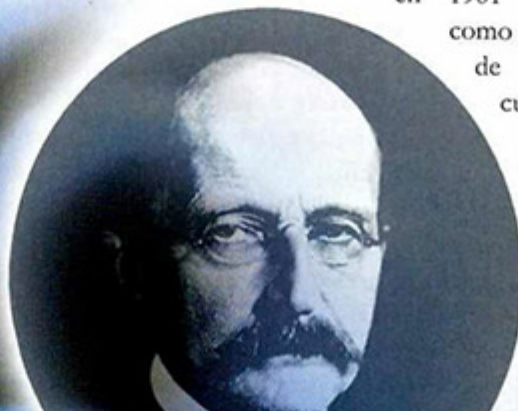
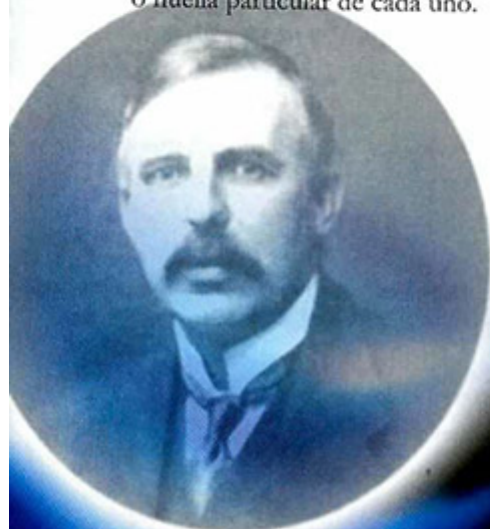
Para esa época la mecánica de Newton había completado 200 años de éxitos y su concepción básica del mundo había traspasado la física y había impregnado el pensamiento de la época. Maxwell por su parte, había logrado plantear sus famosas ecuaciones que entre otras cosas unificaban las fuerzas eléctrica y magnética en una sola llamada electromagnética. Adicionalmente, con sus ecuaciones y la llamada fuerza de Lorentz se podían explicar y predecir todos los fenómenos electromagnéticos incluyendo la propagación de ondas electromagnéticas, tal como fue demostrado pocos años más tarde por Hertz.

La teoría del calor cuyo estudio se remontaba al siglo XVII había alcanzado a finales del siglo XIX una gran madurez mediante la formulación de las llamadas leyes de la termodinámica. Se estaba progresando en una formulación microscópica de la misma, mediante el acercamiento de Boltzmann que

introducía lo que hoy llamamos mecánica estadística clásica. A finales del siglo XIX Becquerel descubrió la radioactividad y Röntgen al descubrir los llamados rayos X se hizo merecedor del primer premio Nobel impartido en física en el año de 1901.

Dos efectos condujeron, entre otros, a la necesidad de replantear la física de Newton, dando origen a la teoría cuántica: la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, los que han sido discutidos en otros artículos de esta revista. Sólo indicamos que la explicación de la radiación del cuerpo negro dada por Planck en 1901 es considerada como el nacimiento de la mecánica cuántica. En esta explicación se

La explicación de la radiación del cuerpo negro dada por Planck en 1901 es considerada como el nacimiento de la mecánica cuántica.



asume que la energía de un oscilador es discreta, es decir, está cuantizada. La explicación del efecto fotoeléctrico dada por Einstein en 1905 condujo a proponer que la energía de la luz, es decir, de las ondas electromagnéticas estaba cuantizada y a estos cuantos de energía se les denominó fotones.

Estos dos experimentos con sus explicaciones y una hipótesis atrevida planteada por de Broglie se basaban en un concepto de esteticidad en el sentido de que las leyes de la física deberían ser simétricas, es decir, que si las ondas electromagnéticas bajo ciertas circunstancias se comportaban como partículas (los fotones), debería entonces ser posible que las partículas se comportaran como ondas. Ello sentó las bases de la mecánica ondulatoria propuesta por Schrödinger en 1925, que constituye una de las formulaciones de la mecánica cuántica no relativista. En los años siguientes la formulación de Schrödinger se amplió para incluir efectos relativistas como indicaremos más adelante.

Durante los primeros treinta años del siglo pasado surgieron los primeros modelos atómicos. En 1911 Rutherford demostró la existencia del núcleo atómico y en 1913 Bohr propuso un modelo basado en la física clásica que daba cuenta de los espectros atómicos de átomos hidrogenoides, pero que introducía una serie de premisas que se salían de la misma física clásica. En los años veinte la formulación de Heisenberg de la mecánica cuántica, basada en la teoría de matrices, permitió explicar dichos espectros y se constituyó en una formulación alternativa de la mecánica ondulatoria de Schrödinger. Se demostró la equivalencia entre las formulaciones de Schrödinger y de Heisenberg. El llamado grupo de Copenhague, integrado inicialmente por Bohr, Born, Heisenberg, Jordan y Dirac, planteó una formulación y una interpretación de la nueva teoría que sigue siendo la más aceptada hasta el presente, la cual a veces se conoce como la interpretación de Copenhague u ortodoxa de la mecánica cuántica. Este proceso de formulación de la nueva teoría culminó a finales de los años veinte del siglo pasado.

Posteriormente, la formulación de Dirac mediante operadores y la de Feynman mediante

conformar una estructura matemática completa, sino a tener instrumentos de alta precisión predictiva, así como a ampliar e introducir facetas para acercarse a una comprensión de la naturaleza. Ya a comienzos de los años treinta del siglo pasado, von Neumann había logrado presentar una formulación matemáticamente rigurosa de la nueva teoría.

Esfuerzos para incorporar la teoría de la relatividad planteada por Einstein en 1905 a la mecánica cuántica, condujeron a reemplazar la ecuación de Schrödinger por la de Klein-Gordon y por la Dirac. En el primer caso la ecuación era válida para bosones y en el segundo para electrones. Una teoría relativista totalmente coherente requirió el desarrollo de la llamada teoría cuántica de campos, cuya completa formulación condujo a lo que hoy se denomina electrodinámica cuántica.

Si bien los resultados mismos de la teoría concuerdan muy bien con los experimentos, su interpretación

es aún hoy en día motivo de discusión. Muchos físicos famosos que incluso participaron en la creación de esta teoría como Schrödinger, de Broglie y Einstein se apartaron de la interpretación de Copenhague y fueron seguidos por físicos como Everett, Bohm, Aspect, etc. Everett planteó en 1956 la llamada interpretación de muchos mundos o universos paralelos casi independientes y Bohm propuso la existencia de una función de onda universal no local que permitiría que partículas distantes interactuaran instantáneamente.

El alejamiento de Schrödinger, Einstein, de Broglie, etc., de la interpretación del grupo de Copenhague estaba fundamentado en la no aceptación del rompimiento del determinismo y de la causalidad que estaban anclados en la visión newtoniana del mundo, a pesar de que a comienzos del siglo pasado varios filósofos habían ya planteado teorías acausales.

La ruptura del determinismo newtoniano estaba implícita al aceptar que las partículas podían bajo

**La teoría cuántica
extiende la
comprensión que
de la naturaleza se
tenía con la física
clásica a niveles
moleculares,
atómicos, nucleares
y de partículas
elementales.**

ciertas circunstancias comportarse como ondas. Formalmente la formulación la planteó Heisenberg mediante relaciones de indeterminación a veces mal llamadas relaciones de incertidumbre. En su forma más simple, estas relaciones impedían, por principio, conocer exacta y simultáneamente el estado clásico de una partícula, lo que era indispensable para resolver las ecuaciones de Newton y así poder determinar los estados futuros, es decir el movimiento exacto de la partícula objeto de interés.

Similarmente, el papel del observador en el mundo newtoniano es pasivo, es decir, el mundo existe y es cognoscible independientemente de él; para el caso del estudio del movimiento, el observador se limita a medir intervalos de tiempo, así como la posición y la velocidad del objeto y su influencia sobre el movimiento del objeto puede hacerse tan pequeña como se quiera, en cuyo sentido se dice que el observador es pasivo. En el caso cuántico, el observador es activo, necesariamente influye, por principio, en el acto de medición y como tal debe incluirse en la formulación de la teoría. El papel del observador ha conducido a que se discutan diferentes posiciones de carácter filosófico que van desde el realismo hasta el subjetivismo e idealismo más acentuados.

Además de lo relacionado con el papel del observador, la mecánica cuántica es una teoría fundamental que incorpora al menos cuatro tipos de fenómenos que no pueden ser comprendidos mediante la física clásica. Estos se refieren a los efectos cuánticos que se presentan en ciertos sistemas a nivel macroscópico como los que ocurren en los llamados superconductores, a la discretización o cuantización de algunas cantidades físicas, al comportamiento corpuscular u ondulatorio tanto de partículas como de ondas bajo ciertas circunstancias y al llamado *entanglement* o entrelazamiento cuántico. La mecánica cuántica contiene a la mecánica clásica y se reduce a ésta bajo ciertas condiciones. La teoría cuántica extiende la comprensión que de la naturaleza se tenía con la física clásica a niveles moleculares, atómicos, nucleares y de partículas elementales.

En este artículo damos unas ideas básicas en forma descriptiva, de algunas implicaciones conceptuales que surgieron con la nueva teoría y mencionamos resultados aplicados a nuestra vida diaria, así como ciertas tendencias de desarrollo que se prevén para el futuro próximo. El

ámbito de las aplicaciones de la teoría cuántica es enorme, tal como lo señalaba Lederman en 1993: más del 25% del producto interno bruto de los Estados Unidos dependía de la tecnología que ha surgido sustancialmente de la mecánica cuántica. Obviamente, el avance de la ciencia y de la física es tan rápido que es imposible pretender dar una visión global y explicativa en unas pocas páginas, manteniendo cierto equilibrio entre temas tan diferentes. Así que al ser imposible desarrollar en este artículo un tema en particular, más bien nos limitaremos a enunciar algunos temas y a indicar su contexto. De hecho, ya en esta introducción hemos tocado varios temas que hacen parte del actual y futuro desarrollo de la mecánica cuántica.

Adicionalmente, la literatura que se ha publicado en los últimos años a nivel divulgativo es enorme y las referencias que se citan al final constituyen sólo una reducida muestra de algunos artículos y libros, casi todos de tan fácil acceso que seguramente motivarán al lector y le ayudarán a profundizar en temas de su interés que aquí apenas se mencionan.

La mecánica cuántica hoy

La mecánica cuántica replanteó varias nociones clásicas entre las que señalábamos las relacionadas con la causalidad, el determinismo, la objetividad y la repetitividad de experimentos, introduciendo cierta espontaneidad en los resultados de la medida en el sentido de que sólo se puede predecir la probabilidad de obtener tal o cual resultado.

De otro lado, la mecánica cuántica ha conducido al desarrollo de la llamada física del estado sólido, la cual ha sido la base del desarrollo tecnológico del siglo XX y actual. En particular, el desarrollo de los transistores, los semiconductores, la microelectrónica y por ende los computadores, los relojes no mecánicos, la telefonía celular y los llamados nuevos materiales se deriva de la física del estado sólido.

El desarrollo de los rayos láser utilizados en la transmisión de señales empleando fibras ópticas, o en el análisis de materiales incluyendo técnicas holográficas, el microscopio electrónico, la resonancia magnética nuclear y las telecomunicaciones modernas, incluyendo el internet, están basados en la mecánica cuántica al igual que varias técnicas

El desarrollo de los rayos láser, el análisis de materiales incluyendo técnicas holográficas, el microscopio electrónico, la resonancia magnética nuclear y las telecomunicaciones modernas, incluyendo el internet, están basados en la mecánica cuántica.

herencia genética, pasando por el desarrollo de la llamada biología molecular.

Una de las primeras aplicaciones directas de la mecánica cuántica fue el desafortunado empleo de la energía nuclear durante la segunda guerra mundial, no precisamente como fuente de energía, lo que de hecho ha mostrado ser muy útil.

A finales del siglo pasado una conocida revista efectuó una indagación a prominentes físicos sobre varios aspectos de la ciencia, en particular de la física. Dos de las preguntas estaban relacionadas con lo que ellos consideraban como los descubrimientos más importantes que se habían realizado y con lo que según su opinión constituían los problemas más relevantes aún no resueltos.

Las respuestas a la primera pregunta se centraron en la mecánica cuántica, la relatividad y la mecánica newtoniana con un énfasis algo menor en la teoría electromagnética. La mecánica de Newton representa el primer intento de construir leyes expresadas matemáticamente y constatadas mediante la experimentación; condensa diferentes fases de una gran estrategia para validar ideas que ha recibido el nombre de método científico y plantea formalmente la existencia de un mundo cognoscible y explicable mediante leyes que conectan causalmente la sucesión de estados o situaciones por las que puede pasar un sistema u objeto. La teoría de la relatividad muestra que nuestra comprensión intuitiva de cantidades físicas puede ser fácilmente vulnerada al revelar nuevas características en nuestra concepción de espacio y tiempo de algo inmutable y universal a algo relativo.

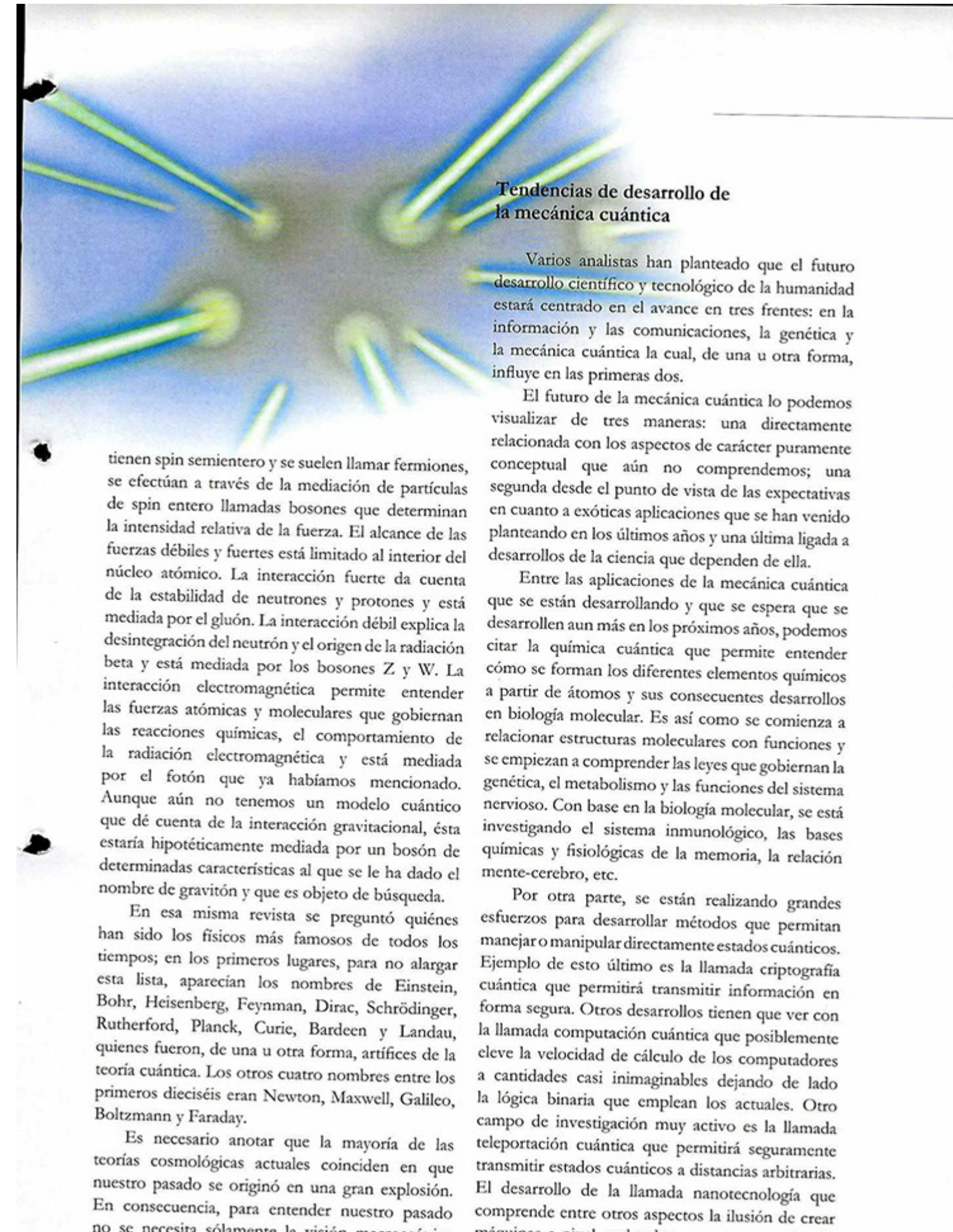
Varios físicos han afirmado que si tuvieran que condensar en una sola frase el conocimiento más importante que tenemos, esta sería "todas las cosas están hechas de átomos". Claro está, átomos en el sentido moderno, lo que lleva implícitamente el reconocimiento o aceptación de la mecánica cuántica no únicamente como instrumento para manejar la naturaleza sino como medio de comprenderla. Es así como tenemos una imagen de la naturaleza en la que las células están compuestas de moléculas, éstas de átomos, los que a su vez están compuestos de electrones y núcleos. Los núcleos atómicos aparecen constituidos por

neutrones y protones, los que en última instancia están conformados por quarks. De tal manera, actualmente pensamos que esencialmente cualquier objeto de la naturaleza incluyendo seres vivos o galaxias, está constituido por quarks, llamados *up* y *down* (arriba y abajo), electrones y unos compañeros de estos últimos, aparentemente sin masa, llamados neutrinos. Esta es la que se suele llamar la familia del electrón. Sabemos que existen otras dos familias que se diferencian de la del electrón únicamente en su masa. Estas familias son la del *muón* y la de la partícula *tau*, cada una compuesta adicionalmente por dos quarks y un neutrino. No sabemos a ciencia cierta por qué la naturaleza hizo esa réplica.

Esta imagen de la naturaleza se completa al considerar las interacciones que surgen entre los componentes de la materia, las cuales se describen en física mediante el concepto de fuerza. Se han reconocido cinco fuerzas fundamentales llamadas gravitacional, eléctrica, magnética, débil y fuerte. Se ha intuido la posibilidad de integrarlas en una fuerza única, la cual debió existir hasta pocos instantes después del big bang cuando ellas empezaron a separarse.

La primera unificación fue realizada por Maxwell al formular como un todo la teoría electromagnética y aunar la fuerza eléctrica y la magnética en una sola llamada electromagnética. En los años setenta del siglo pasado Weinberg y Salam formulan el denominado modelo estándar al unificar la fuerza electromagnética con la débil en una sola llamada electrodébil. Hoy en día se realizan grandes esfuerzos para tratar de unificar la fuerza electrodébil con la fuerte, a lo que ya se le ha dado el nombre de gran unificación. Einstein y otros físicos como Weil trabajaron muchos años tratando en vano de unificar la fuerza gravitacional con la electromagnética, de donde históricamente surgió el nombre de teoría del campo unificado. Se piensa en la actualidad que debe ser posible unificar todas las fuerzas en una sola. Se han desarrollado teorías cuánticas de campos para las fuerzas débiles y fuertes. La fuerza débil y la electromagnética, como ya indicamos, han sido unificadas en una teoría cuántica de campos llamada electrodébil. La teoría cuántica de campos correspondiente a la fuerza fuerte se suele llamar cromodinámica cuántica.

En esta visión que tenemos de la naturaleza, las interacciones entre los quarks y las demás partículas (leptones: electrón, muón, tau y neutrino) que



Tendencias de desarrollo de la mecánica cuántica

Varios analistas han planteado que el futuro desarrollo científico y tecnológico de la humanidad estará centrado en el avance en tres frentes: en la información y las comunicaciones, la genética y la mecánica cuántica la cual, de una u otra forma, influye en las primeras dos.

El futuro de la mecánica cuántica lo podemos visualizar de tres maneras: una directamente relacionada con los aspectos de carácter puramente conceptual que aún no comprendemos; una segunda desde el punto de vista de las expectativas en cuanto a exóticas aplicaciones que se han venido planteando en los últimos años y una última ligada a desarrollos de la ciencia que dependen de ella.

Entre las aplicaciones de la mecánica cuántica que se están desarrollando y que se espera que se desarrollen aun más en los próximos años, podemos citar la química cuántica que permite entender cómo se forman los diferentes elementos químicos a partir de átomos y sus consecuentes desarrollos en biología molecular. Es así como se comienza a relacionar estructuras moleculares con funciones y se empiezan a comprender las leyes que gobiernan la genética, el metabolismo y las funciones del sistema nervioso. Con base en la biología molecular, se está investigando el sistema inmunológico, las bases químicas y fisiológicas de la memoria, la relación mente-cerebro, etc.

Por otra parte, se están realizando grandes esfuerzos para desarrollar métodos que permitan manejar o manipular directamente estados cuánticos. Ejemplo de esto último es la llamada criptografía cuántica que permitirá transmitir información en forma segura. Otros desarrollos tienen que ver con la llamada computación cuántica que posiblemente eleve la velocidad de cálculo de los computadores a cantidades casi inimaginables dejando de lado la lógica binaria que emplean los actuales. Otro campo de investigación muy activo es la llamada teleportación cuántica que permitirá seguramente transmitir estados cuánticos a distancias arbitrarias. El desarrollo de la llamada nanotecnología que comprende entre otros aspectos la ilusión de crear máquinas a nivel molecular, es un tema activo de investigación, el cual es tratado en otro aparte de esta revista, al igual que la denominada ciencia de

tienen spin semientero y se suelen llamar fermiones, se efectúan a través de la mediación de partículas de spin entero llamadas bosones que determinan la intensidad relativa de la fuerza. El alcance de las fuerzas débiles y fuertes está limitado al interior del núcleo atómico. La interacción fuerte da cuenta de la estabilidad de neutrones y protones y está mediada por el gluón. La interacción débil explica la desintegración del neutrón y el origen de la radiación beta y está mediada por los bosones Z y W. La interacción electromagnética permite entender las fuerzas atómicas y moleculares que gobiernan las reacciones químicas, el comportamiento de la radiación electromagnética y está mediada por el fotón que ya habíamos mencionado. Aunque aún no tenemos un modelo cuántico que dé cuenta de la interacción gravitacional, ésta estaría hipotéticamente mediada por un bosón de determinadas características al que se le ha dado el nombre de gravitón y que es objeto de búsqueda.

En esa misma revista se preguntó quiénes han sido los físicos más famosos de todos los tiempos; en los primeros lugares, para no alargar esta lista, aparecían los nombres de Einstein, Bohr, Heisenberg, Feynman, Dirac, Schrödinger, Rutherford, Planck, Curie, Bardeen y Landau, quienes fueron, de una u otra forma, artífices de la teoría cuántica. Los otros cuatro nombres entre los primeros dieciséis eran Newton, Maxwell, Galileo, Boltzmann y Faraday.

Es necesario anotar que la mayoría de las teorías cosmológicas actuales coinciden en que nuestro pasado se originó en una gran explosión. En consecuencia, para entender nuestro pasado no se necesita solamente la visión macroscópica a escalas galácticas sino las consideraciones del mundo cuántico primigenio.

los nuevos materiales con la que se pretende fabricar materiales a la medida, es decir con las propiedades que se desee.

Los problemas actuales más preponderantes en la física atañen a la física de las partículas elementales, incluyendo la eventual unificación de las fuerzas, la gravedad cuántica, las denominadas teorías del todo y de los multiuniversos, la teoría de cuerdas, la astrofísica, la teoría del big bang, la materia y energía oscuras y la constante cosmológica. Se están haciendo grandes esfuerzos en temas relacionados con turbulencias, los superconductores de alta temperatura crítica, el estudio de sistemas complejos incluyendo la aparición o emergencia de lo que denominamos vida, la comprensión de sistemas alejados del equilibrio y el caos cuántico.

Adicionalmente se plantean interrogantes que van más allá de lo que hemos planteado: ¿son las leyes de la física únicas?, ¿son lo que llamamos constantes universales y que determinan muchas de las propiedades de nuestro mundo realmente constantes?, ¿existe "una ecuación" fundamental para el universo con una solución única y estable? o ¿existe una ecuación con varias soluciones consistentes, una de las cuales describe nuestro mundo, el cual surge accidentalmente?, ¿experimentan regiones aún no observadas del universo las mismas leyes?, ¿por qué las partículas fundamentales que conocemos tienen determinadas propiedades y no otras?, ¿por qué las fuerzas que conocemos tienen esas propiedades? Evidentemente el acercamiento a la solución de estas preguntas marcará el desarrollo de la mecánica cuántica en los próximos años o lustros.

Desde el punto de vista de la teoría cuántica, en sí misma, quizás el problema más fundamental no resuelto se refiere justamente a lo que realmente describimos con la teoría: ¿qué es realmente la observación?, ¿termina el acto de observar cuando el observador ha interpretado lo medido? Si es así, ¿qué relación existe entre materia y conciencia?, ¿qué es la información?, ¿qué significan correlaciones no locales que viajan más rápido que la luz pero que no permiten comunicarse a una velocidad mayor que la de la luz?

Estos son interrogantes y retos que las nuevas generaciones de científicos tendrán que abordar. Independientemente de los problemas de carácter puramente físico o científico que hemos esbozado, las nuevas generaciones tendrán que enfrentar en este mundo globalizado, inevitablemente retos

adicionales relacionados con el medio ambiente, con la generación de una sociedad que brinde oportunidades de desarrollo a sus integrantes y en la que pueda florecer cierto equilibrio entre pueblos y culturas. Evidentemente el desarrollo científico-tecnológico junto con el de los sistemas educativos serán la base de un manejo político y económico que brinde aquellos logros por los que la humanidad ha luchado desde su comienzo más primitivo: sobrevivir con calidad de vida y satisfacer su deseo de comprender el cosmos y su papel en él, si es que lo tiene.

Bibliografía

1. Adams, S.: *Frontiers. Twentieth-century physics.* Taylor and Francis. 2000.
2. *Investigación y Ciencia. Misterios de la física cuántica.* Temas 10. 1997.
3. *Investigación y Ciencia. Fenómenos cuánticos.* Temas 31. 2003.
4. Sánchez, J.M.: *Ron. El Siglo de la Ciencia.* Taurus. 2000.
5. Durrani, M.: *Physics, past, present and future.* Physics World. Dec. 1999.
6. Haseltine, E.: *The 11 greatest unanswered questions of physics.* Discover. Feb. 2002.
7. Greenstein, G.; Zajonc, A.G.: *The Quantum Challenge. Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics.* Jones and Bartlett Publ. 1997.
8. Calderón, I. & ed.: *Causalidad o Emergencia. Diálogo entre Filósofos y Científicos.* Cargraphics. 2004.
9. Lederman, L.: *La Partícula Divina.* Crítica. 1996.
10. Weinberg, S.: *El sueño de una teoría final.* Crítica. 1994.
11. Barrow, J. D.: *Teorías del Todo.* Crítica. 1994.
12. *Investigación y Ciencia. Informe especial: La cosmología al debate.* Marzo, 1999.
13. Lomonick, M. D.: *What existed before the Big Bang?* Discover. Feb. 2004.
14. *Investigación y Ciencia. Presente y futuro del cosmos.* Temas 33. 2003.
15. Swolin, L.: *The Life of the Cosmos.* Oxford University Press. 1997.
16. Penrose, R.: *The Large, the Small and the Human Mind.* Cambridge University Press. 1997.
17. Deutsch, D.: *La estructura de la realidad.* Anagrama. 1999.
18. Folger, T.: *Muchas vidas muchos universos.* Discover. Oct. 2001.
19. Roqué, X.: *La física en el último cuarto del siglo XX.* Investigación y Ciencia. Dic. 2001.
20. Stapp, H. P.: *Mind, Matter and Quantum Mechanics.* Springer. 1993.
21. Gribbin, J.: *Nuestro Universo. La última frontera.* Folio. 2001.
22. López Cerezo, J. A.; Sánchez Ron, J. M. & ed.: *Ciencia, Tecnología, Sociedad y Cultura en el cambio de siglo.* Nueva. OEL. 2001.
23. *Investigación y Ciencia. Semiconductores y Superconductores.* Temas 34. 2003.
24. Williams, C. P.: *Clearwater, S. H.: Ultimate Zero and One. Computing and the Quantum Frontier.* Copernicus-Springer. 2000.
25. Kaku, M.: *Visiones. Cómo la ciencia revolucionará la materia, la vida y la mente en el siglo XXI.* Debate. 1998.
26. Maddox, J.: *Lo que queda por descubrir. Una incursión en los problemas aún no resueltos por la ciencia, desde el origen de la vida hasta el futuro de la humanidad.* Debate. 1999.



CONFERENCIAS SABATINAS - I SEMESTRE DE 2006
Dirigidas a estudiantes, profesores y público en general
Auditorio León de Greiff - Universidad Nacional de Colombia
8:30 AM /ENTRADA LIBRE

- Febrero 18** NUEVAS TECNOLOGÍAS: A cargo del Dr. Eduardo Posada Flórez. Físico, presidente de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC.
- Febrero 25** LOS ADOLESCENTES EN LA ERA DEL VACIO: A cargo del Dr. Efrén Martínez. Psicólogo de la Universidad de Nariño, Director Científico del Centro de Difusión y Aplicación de la Logoterapia CEDAL, Presidente de la Fundación Colectivo.
- Marzo 4** COMUNIQUÉMONOS: A MÁS MEDIOS, MEJOR COMUNICACIÓN? RESPONSABILIDAD DE LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN EN EL SISTEMA EDUCATIVO: Por el Dr. Luis Liévano Grafitero, cuentero y realizador de radio y TV, director del programa de radio la Chiva Virtual y corresponsal de Telesur.
- Marzo 11** SABER O NO SABER, Ahí ESTÁ LA DIFERENCIA: A cargo del Dr. Mauricio Urquiza; químico investigador de la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia.
- Marzo 25** CONOCIMIENTO, VIDA Y UNIVERSO: A cargo del Dr. Pablo Cuartas, astrónomo del Planetario de Bogotá.
- Abril 1** FÍSICA DE LA DANZA: A cargo del Dr. Alvaro Abril, físico.
- Abril 22** IMAGEN VISUAL Y CONOCIMIENTO: Por la maestra Zenaida Osorio, escuela de Diseño Gráfico, Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia.
- Abril 29** ¿CÓMO UN ADOLESCENTE RESUELVE SUS PROBLEMAS? ¿PODEMOS VACUNARNOS CONTRA LAS ADICCIONES? Por el Dr. Nelson Osorio, médico psiquiatra Hospital Santa Clara.
- Mayo 6** DEL LABORATORIO A LA COTIDIANIDAD: Por el Dr. Rafael Hurtado. Físico, profesor del Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia. Director Observatorio Ciencia y Tecnología
- Mayo 13** SIDA: Por el Dr. Otto Sussmann, Médico microbiólogo, infectólogo, jefe Comité de Infecciones de la Clínica Nueva de Palermo y de la Clínica Shaio, Bogotá.
- Mayo 20** DERECHOS SEXUALES Y REPRODUCTIVOS: LA IV GENERACIÓN DE LOS DERECHOS HUMANOS: A cargo de la Dra. Florence Thomas, profesora titular y honoraria Universidad Nacional de Colombia, coordinadora Grupo Mujer y Sociedad, especialista en estudios de género, columnista periódico El Tiempo.

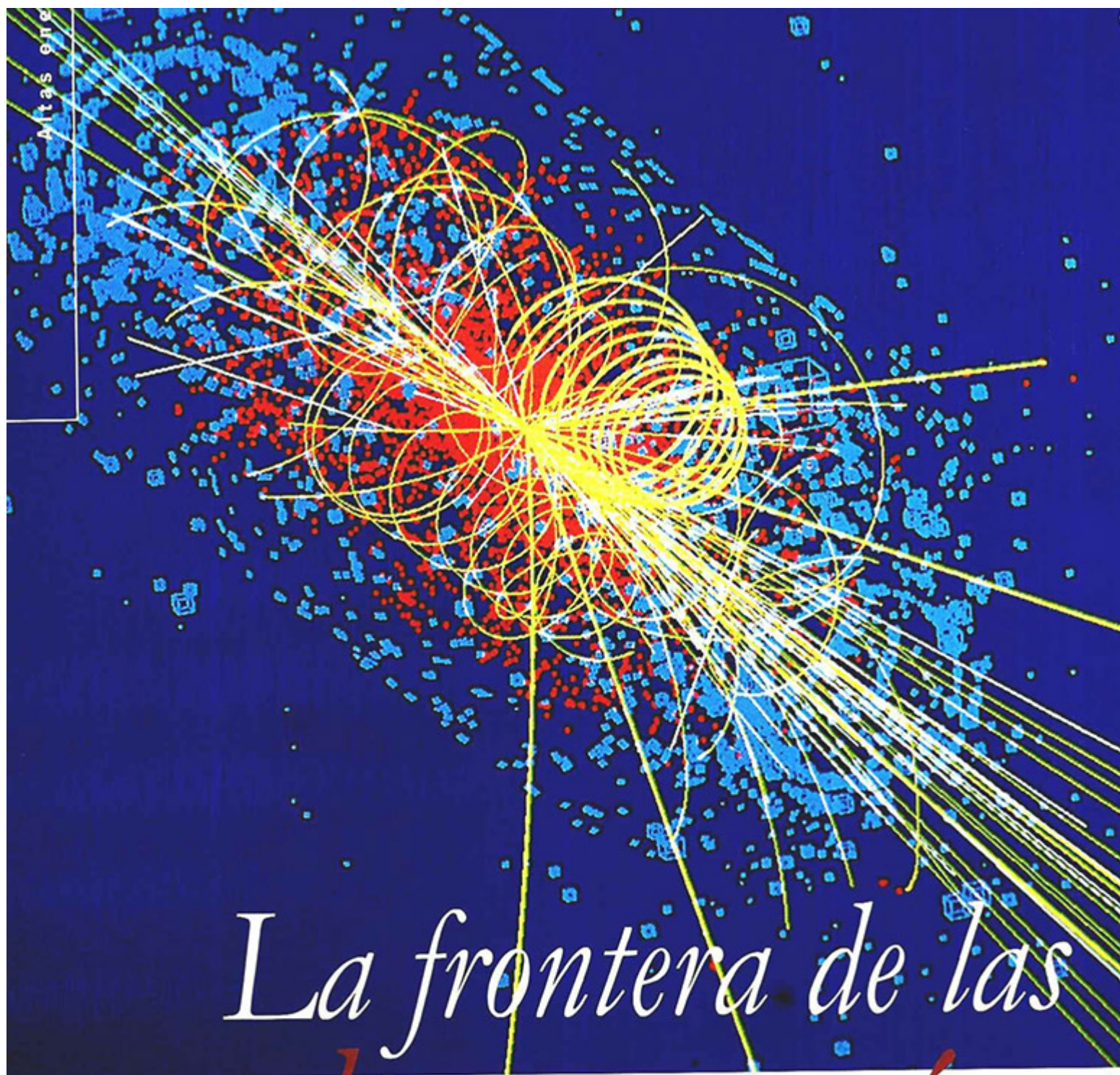


Imagen: CERN.

La frontera de las altas energías

Bernardo Gómez
*Departamento de Física,
Universidad de los Andes,
Bogotá, D.C., Colombia.
E-mail: bgomez@uniandes.edu.co*

Actualidad y perspectivas

La frontera de las altas energías en el estudio de la naturaleza reboza de vitalidad, en especial ahora cuando la materia oscura y la energía oscura hacen de la conexión cósmica de la física de partículas una enorme fuerza motriz: vemos a los físicos de altas energías en grandes colaboraciones internacionales en todo el planeta buscando comprender las leyes más fundamentales de la materia, la energía, el espacio y el tiempo. Son herederos de Demócrito en la búsqueda de las partículas elementales y herederos de Michael Faraday cuando nos reveló su idea de que “todas las fuerzas tienen un origen común”. Son herederos de Tycho Brahe en el estilo de trabajo de “ciencia grande” de colaboración en equipo y herederos de Galileo Galilei en el desarrollo de sus propias herramientas para los experimentos, siempre en el límite de lo posible tecnológicamente.

Todo el planeta es su lugar de exploración: en un mundo subterráneo, como en Kamioka en Japón, o bajo las montañas del Gran Sasso en Italia en un túnel bajo 1.400 metros de roca, o en antiguas minas a 2.000 metros bajo tierra en Sudbury en Canadá, los físicos estudian las partículas más esquivas para su observación, los neutrinos de pequeñísima masa, sin carga eléctrica y ajenos a la interacción fuerte, pero presentes en la interacción débil. Recientemente, han descubierto que los neutrinos, de los cuales hay tres tipos o familias, “oscilan” pasando de una familia a otra entre las tres.

Lo más alto de las montañas es también escenario de exploración, como en Chacaltaya en Bolivia, a 5.200 metros sobre el nivel del mar, donde hace 57 años el brasileño César Lattes mediante unidades multicapas de material fotográfico, las “emulsiones nucleares”, registró la existencia del pión, contribuyendo así a su descubrimiento. Hoy se estudian allí en el Laboratorio de Chacaltaya, los rayos cósmicos, partículas subatómicas, provenientes del Sol, del centro de la galaxia, o de fuentes extragalácticas. Estos rayos inciden sobre el planeta, generando en la atmósfera chubascos de partículas energéticas, piones, muones, electrones, positrones, fotones, y hermosos efectos luminosos, las auroras.

En la pampa argentina, en Mendoza se monta un arreglo de 1.600 detectores, los cuales a 2.000 metros

están cada uno y separados 1,5 km de cada tanque vecino. Están allí para detectar las más energéticas lluvias de partículas: tres muy sensibles fotomultiplicadores en cada tanque amplifican la luz emitida al paso de los rayos cósmicos. Se buscan las partículas de más altas energías, superiores a 1020 eV, inexplicables en la actualidad.

En la pradera de Illinois, en Estados Unidos, a 80 km al oeste de Chicago, está el Laboratorio Fermi, donde en un túnel, a pocos metros bajo tierra, mil poderosos electroimanes superconductores con campos magnéticos de 5 Tesla guían dos haces de materia y antimateria, protones y antiprotones, a lo largo de un toroide de 6 km de circunferencia en un vacío ultra alto de 10-10 Torr, equivalente a la presión atmosférica a 1.000 km de altura. Allí, los haces de las más altas energías que se alcanzan en el mundo (1012 eV o TeV, Teraelectrónvoltios) colisionan frontalmente aniquilando materia y antimateria en energía que según $E=mc^2$ se materializa en nuevas partículas y antipartículas, que son registradas y estudiadas por dos colaboraciones internacionales de más de 500 físicos cada una. Este anillo acelerador colisionador es el Tevatrón de Fermilab, donde hace 10 años los dos experimentos, CDF y D-Cero, éste último con participación de físicos colombianos, descubrieron el quark top, el sexto y último de los quarks, las partículas elementales con “carga de color”, fuente de la interacción fuerte, la mayor fuerza de la naturaleza que liga los quarks en hadrones, como protones y neutrones y a éstos en los núcleos atómicos. Hoy los experimentos del Tevatrón estudian la producción de partículas elementales, hacen mediciones de precisión de sus masas y buscan el “Higgs”, el mecanismo de generación de masa y nueva física, como partículas supersimétricas.

En Alemania, en el Laboratorio DESY, en un túnel de hasta 25 metros de profundidad bajo la ciudad de Hamburgo, circulan protones acelerados hasta cerca de un TeV en un anillo de electroimanes superconductores similar al Tevatrón de Fermilab, también de 6 km de circunferencia. Estos protones son blanco de proyectiles energéticos, electrones, que recorren el anillo en dirección opuesta y con

para explorar su interior, su estructura y la naturaleza de la fuerza fuerte que liga los quarks, el intercambio de gluones y el mar de alta densidad de pares de partículas y antipartículas que permanentemente se crean y aniquilan en el interior del protón.

En Ginebra, Suiza, el mayor de los anillos aceleradores colisionadores con 27 km de circunferencia se extiende en un túnel de 50 a 175 metros bajo tierra en la frontera franco suiza. Es el Laboratorio CERN, que pasa de acelerar electrones y positrones en el anillo LEP en la última década, a ubicar en el mismo túnel un nuevo acelerador colisionador de protones. Actualmente completa cerca de 1.200 electroimanes superconductores que alcanzarán campos magnéticos de 8 Tesla, para que a partir del año 2008 dos haces de protones colisionen frontalmente en sentidos opuestos, abriendo una nueva ventana para explorar el Universo en su estructura más pequeña con energías de 14 TeV.

Esta intensa actividad experimental de hoy en colaboración mundial de miles de científicos se basa en todo un siglo de investigación muy exitosa: se inició con el descubrimiento de los rayos-X hace 110 años, seguido meses después de la radioactividad. Hace 108 años se halló la primera partícula,

Vista aérea del acelerador Tevatrón de Fermilab. (Cortesía Laboratorio Fermilab).



el electrón. Continuaron los descubrimientos del núcleo atómico en 1911 y la necesidad de la fuerza nuclear fuerte; luego el descubrimiento del neutrón en 1932 y la imagen simple de tres partículas constituyentes de la materia: protón, neutrón y electrón. Pero esta imagen de inmediato se hizo más compleja: el estudio de la radioactividad beta llevó a la idea del neutrino, "pequeño y neutro", que apenas 26 años después de propuesto pudo ser observado directamente y con gran esfuerzo. A partir de la teoría se descubrió la antimateria; no tardó la comprobación experimental con los positrones. Siguió la búsqueda de la partícula mediadora de la fuerza nuclear fuerte, la partícula de Yukawa, que llevó a encontrar "mesones", partículas de masa intermedia entre protones y electrones, primero los muones y luego los piones.

Los rayos cósmicos eran la fuente donde se hallaban las nuevas partículas. Así, hasta comienzos de los años 50, cuando los aceleradores de partículas revelaron una diversidad no imaginada previamente. De los experimentos surgían decenas de nuevas partículas, hasta un centenar de ellas, llevando al "zoológico de las partículas", que recordaba al panorama de elementos químicos encontrado por Medeleiev un siglo antes y que encontró orden y comprensión con la tabla periódica de los elementos.

¿Cómo organizar las partículas? Por sus masas las hay livianas, "leptones", de masa intermedia, "mesones" y pesadas, "bariones". Por su momento angular intrínseco o "spin" las hay: de spin semientero, "fermiones" o de spin entero, "bosones", con comportamiento estadístico bien diferente. Por sus interacciones clasificamos como "hadrones" las que participan de la interacción fuerte.

En los años sesenta, el estudio de procesos de interacciones fuertes que parten de hadrones y llevan al final a nuevos hadrones, aportó evidencia experimental, que combinada con brillante contribución de los físicos teóricos, permitió para los años setenta organizar estas partículas pensando en una estructura interna compuesta de "quarks". Este logro, integrando al conoci-

miento de las interacciones débiles, llevó al "Modelo Estándar de la Física de Partículas".

El modelo estándar reúne las interacciones fundamentales que se describen en el formalismo de teoría cuántica de campos: interacciones electromagnética, débil y fuerte; no incluye la gravitación. Entre las partículas constituyentes de la materia distinguimos los quarks, que participan de todas las interacciones, mientras que los leptones no participan de la interacción fuerte. Para las partículas hay una estructura de "sabores" y "familias". Seis son los tipos de quarks o seis sabores: up, down, charm, strange, top y bottom. Entre los leptones estos seis sabores son: electrón, neutrino electrónico, muón, neutrino muónico, tauón y neutrino tauónico. Por dupletas de quarks y dupletas de leptones, estas partículas se ordenan en familias o generaciones, así: los quarks up y down y los leptones electrón y su neutrino electrónico constituyen la primera generación de partículas. Cada nueva generación es una copia fiel de la anterior, excepto por las masas, que es la única diferencia, aumentando de una generación a la siguiente.

El modelo estándar ha sido uno de los grandes logros del intelecto humano, pero para los físicos de partículas elementales es muy claro: con el modelo estándar no se tiene la teoría final, quedan preguntas:

- ¿Cuál es el origen de la masa de las partículas?
- ¿Por qué son tan livianos los neutrinos?
- ¿Por qué hay tres familias de partículas?
- ¿Por qué las cargas eléctricas de electrón y protón tienen idéntica magnitud?
- ¿Son realmente elementales las partículas elementales o tienen una estructura interna?
- ¿Hay nuevos estados de la materia bajo condiciones extremadamente altas de densidad y temperatura?
- ¿De dónde proviene el desbalance entre materia y antimateria?
- ¿Son inestables los protones?
- ¿Hay un origen común para las tres interacciones del modelo estándar?
- ¿Cómo puede incluirse la gravitación en una teoría unificada de todas las interacciones?

Los físicos de partículas no están solos. Su campo de exploración, lo más pequeño, se entrelaza cada vez más estrechamente con el campo de los astrónomos, astrofísicos, cosmólogos, con el estudio de lo más grande. "Donde termina el telescopio,

comienza el microscopio. ¿Cuál de los dos alcanza el mayor panorama?" Así preguntaba el poeta Victor Hugo. La comprensión de las mayores estructuras del Universo pasa hoy por la comprensión de la estructura y procesos de las partículas elementales. Nos preguntamos:

¿De dónde provienen los rayos cósmicos en todos los rangos de energía? ¿Cuáles son las componentes que provienen de nuestra galaxia y cuáles tienen origen extragaláctico?

¿Cómo llegan las partículas de los rayos cósmicos a las más altas energías? ¿Cuáles son los mecanismos que les permiten llegar a energías mil millones de veces mayores que las que alcanzan las partículas en los más poderosos aceleradores como el Tevatron de Fermilab?

¿Cómo avanzan los rayos cósmicos en medio de campos magnéticos a través del gas interestelar y en el espacio intergaláctico?

¿Cómo es posible que haya partículas de rayos cósmicos con energías más altas que el máximo posible resultante de sus colisiones con los fotones de la radiación cósmica de fondo? ¿Hay algo aquí que no entendemos?

¿Cuáles son los mecanismos, los procesos físicos, detrás de las más espectaculares emisiones de rayos gama provenientes de diversas galaxias?

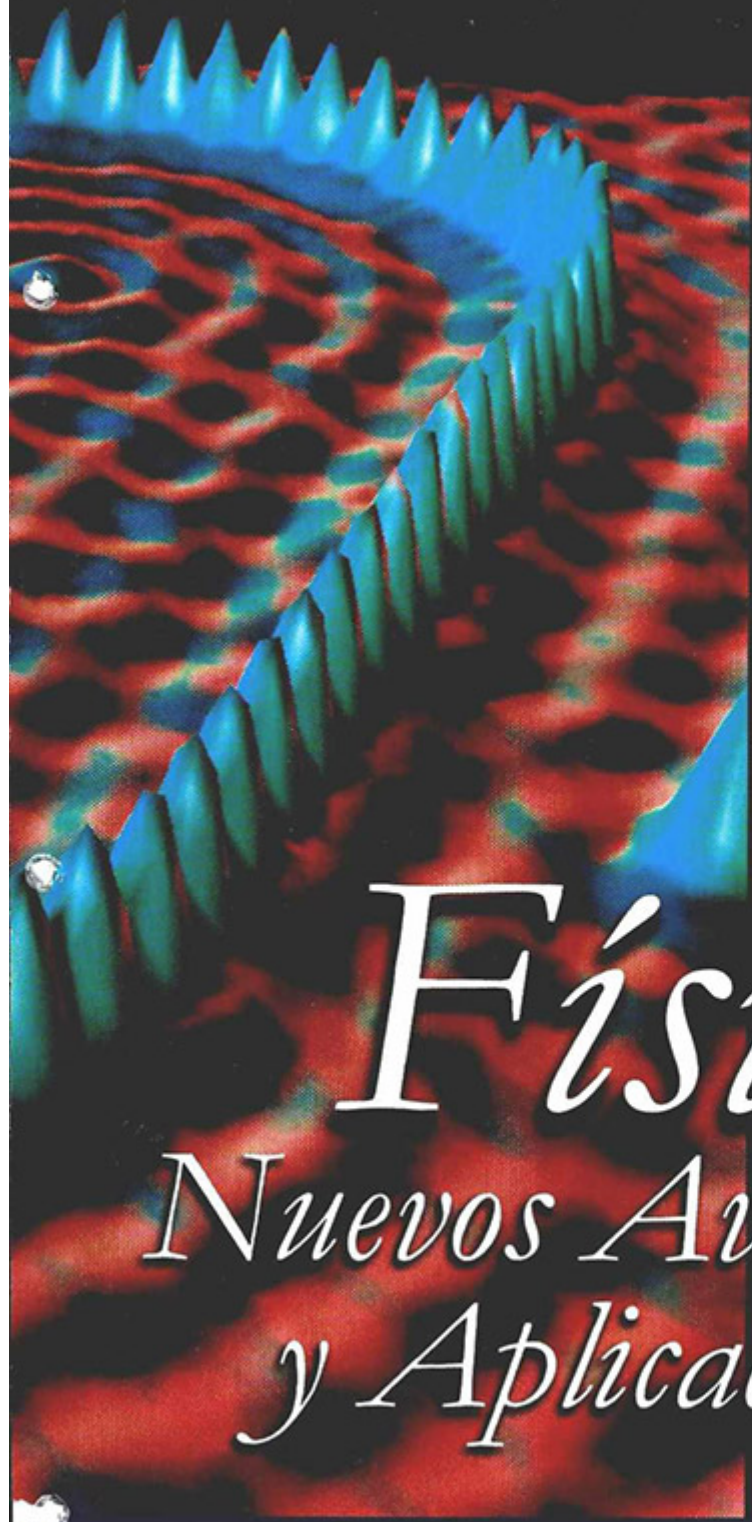
¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura que parece ser tan abundante en el Universo?

¿Cuál es la naturaleza de la energía oscura y cuál puede ser evidencia clara de ella en los experimentos de partículas de altas energías?

La búsqueda de respuestas continúa: en la física de partículas elementales, en la física de astropartículas y nuestros físicos están allí, activos, en un esfuerzo de colaboración internacional sin precedentes.

Bibliografía

- Fritzsch, H.: *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Alianza Editorial, S.A., Madrid; ISBN: 84-206-2337-7, 1982.
- Nee'man, Y; Kirsh, Y.: *Los cazadores de partículas*. Editorial Gedisa, S.A.; Barcelona; ISBN: 84-7432-305-3, 1988.
- Kane, G.L.: *The Particle Garden*. Helix Books, Addison-Wesley Pu.Co., Reading, Massachusetts; 1995. ISBN: 0-201-40780-9.
- Hoofst, G.: *In search of the ultimate building blocks*. Cambridge University Press, Cambridge; ISBN: 0-521-57883-3, 1997.
- Ynduráin, F.J.: *Electrones, Neutrinos y Quarks*. Editorial Crítica, S.L., Barcelona; ISBN: 84-8432-258-0, 2001.



Física
Nuevos Avances
y Aplicaciones

Nanotechnology

*Signific
usos, benef
y rie*



Andrés E. Zúñiga B.

Escuela de Ciencias Básicas Médicas,
Facultad de Salud, Universidad Libre,
Cali, Colombia.
E-mail: biogenes@gmail.com

Juan Fernando Duque Osorio

Escuela de Ciencias Básicas Médicas,
Facultad de Salud, Universidad del Valle
Cali, Colombia.
E-mail: juanferduque@hotmail.com

La nanotecnología se empieza a perfilar como una importante revolución tecnológica de finales del siglo XX y principios del XXI. Sus grandes potencialidades compiten con los grandes riesgos que a futuro, el uso malintencionado e indiscriminado de esta tecnología puede suponer. En este artículo se hace una revisión general del concepto de nanotecnología, sus usos, beneficios y los aspectos ambientales, éticos y legales que deben ser tenidos en cuenta para el desarrollo y uso de esta tecnología. El principal de estos riesgos es la proliferación de nanodispositivos autorreplicantes que en un escenario un poco extremo, puedan llegar a invadir el planeta y reemplazar la vida orgánica por vida artificial de origen nanotecnológico.

¿Qué es nanotecnología?

La nanotecnología puede ser definida como el conjunto de disciplinas y técnicas utilizadas en el diseño, síntesis, caracterización y aplicación de materiales y dispositivos dentro de los cuales sus más pequeñas organizaciones funcionales están, al menos en una de sus dimensiones, dentro de la escala de los nanómetros ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). Dicho en otras palabras, la esencia de la nanotecnología es la explotación de nuevas propiedades físicas, las cuales emergen a escala nanométrica y la creación de materiales y dispositivos que funcionan a nivel molecular.² Por lo tanto, la nanotecnología es una tecnología que permite manufacturar cosas al posicionar átomos precisamente donde se quieran posicionar,² lo cual permitiría entre muchos otros avances, hacer moléculas de forma eficiente y prácticamente como se quiera. Esto fue sugerido en 1961 por el físico

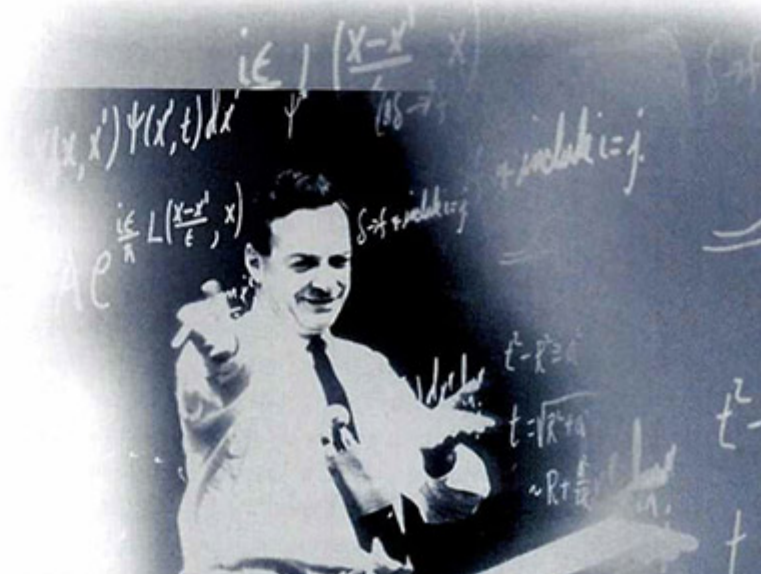
Richard Feynman en los principios de la física para manipular átomos con el fin de ensamblar moléculas exactamente, como por ejemplo un químico las dibujaría y que el desarrollo de tecnologías que permitieran hacerlo sería inevitable. Resultó así, pues el preciso posicionamiento de átomos en combinación para formar compuestos estables y estructuras ha empezado a lograrse.³ Incluso la división de investigación de IBM llegó a escribir el logo de esta compañía con átomos individuales de xenón, manipulados con la punta de un microscopio de fuerza atómica.³

Los métodos para la síntesis de nanomateriales, pueden incluir precursores de tipo sólido, líquido o gaseoso dentro de una amplia gama de técnicas experimentales. Sin embargo, la mayoría de estos métodos pueden clasificarse dentro de dos enfoques:¹ “arriba hacia abajo” (refiriéndose a métodos de síntesis que van de elementos grandes a pequeños [niveles jerárquicos altos a bajos], como hasta ahora se han fabricado todos las herramientas y dispositivos hechos por los seres humanos) y “abajo hacia arriba”, es decir empezando de la estructura molecular hacia “arriba”, a niveles más macro.

Técnicas de “Arriba hacia Abajo”: En estas técnicas se empieza con materiales a nivel macroscópico y se incorporan a ellos detalles más pequeños. El ejemplo más conocido de este tipo de técnicas

La esencia de la nanotecnología es la explotación de nuevas propiedades físicas, las cuales emergen a escala nanométrica y la creación de materiales y dispositivos que funcionan a nivel molecular.

El físico Richard Feynman.



Muchas de las utilidades de la nanotecnología incluyen aplicaciones biomédicas, por ejemplo la formación de hueso artificial biomimético.

es la fotolitografía, la cual es usada en la industria de semiconductores para crear circuitos integrados al perfilar cortes en galletas de silicio. Este proceso empieza por cubrir el silicio con un material fotosensible, el cual lo endurece; después el circuito se dibuja con láser y por último se lavan las partes que no fueron endurecidas por el material fotosensible y se obtienen así las formas deseadas. A escalas que se acercan más a lo nanométrico, con técnicas como la de "esfero" o "lapicero" nanolitográfico o nanolitografía y con microscopio de fuerza atómica electrostático, las moléculas individuales son movidas y depositadas en las configuraciones deseadas para producir caracteres de escala nanométrica en varios materiales.¹

Técnicas de "Abajo hacia Arriba": Estas técnicas empiezan diseñando y sintetizando moléculas que tienen la habilidad de autoensamblarse para formar estructuras de niveles más macro que escalas nanométricas.^{1,4,5} Estas estructuras se autoorganizan después de que un cambio en su medio ambiente dispara su autoensamblaje. Pueden ser cambios en el pH, concentración de solutos específicos o la aplicación de un campo eléctrico. Las fuerzas que hacen que estas moléculas se autoorganicen son de tipo termodinámico y de competencia de interacciones moleculares, incluyendo fuerzas hidrofóbicas-fílicas, enlazamiento de hidrógenos e interacciones de Van der Waals. Los materiales ensamblados de esta forma exhiben características químicas y/o físicas deseables no exhibidas por las moléculas que los constituyen.

Aplicaciones de la nanotecnología

Muchas de las utilidades de la nanotecnología incluyen aplicaciones biomédicas, como son la formación de hueso artificial biomimético.^{1,6,7} Estas técnicas utilizan materiales preexistentes como plantillas para guiar la nucleación y crecimiento de material nanoestructurado. En el caso del hueso biomimético, el cual es una aplicación de tipo biomineralizante de la nanotecnología, se induce la formación de órgano-apatita en estructuras de titanio con forma de mayas, las cuales han preabsorbido polilisina o poli-L-glutamato que al entrar en con-

tacto con el metal forman una bicapa poli-iónica. Se piensa que la captura de pequeñísimos cristales y su subsecuente nucleación es la que lleva al crecimiento de apatita en el metal. Otras técnicas tratan de imitar la ultraestructura del hueso sin el requerimiento de estructuras metálicas preexistentes, al inducir el autoensamblaje y la formación de nanofibras moleculares intercaladas con cristales de hidroxiapatita, tratando así de simular la ultraestructura colágena del hueso.^{1,8}

Avances recientes en la ingeniería de tejidos que han ocurrido a niveles mayores que escalas nanométricas incluyen sistemas microelectromecánicos y dispositivos electrónicos biocompatibles, los cuales tienen un gran potencial para el tratamiento de muchos desórdenes.^{9, 10, 11} Aunque dispositivos y materiales verdaderamente nanométricos diseñados para interactuar específicamente con células y tejidos ofrecerían una mejor integración entre sistemas fisiológicos y tecnológicos, en el presente la nanotecnología aplicada a la medicina está en su infancia.¹ Ejemplos de este tipo de tecnologías incluyen nuevos sistemas para el transporte y entrega de medicamentos en sitios específicos, utilizando nanopartículas^{12,13,14} o sistemas de tómulos de bicapas altamente porosas y auto-ensamblantes.^{15,16} Otro tipo de aplicaciones que está siendo desarrollado son los dendrimeros, los cuales son moléculas altamente ramificadas que pueden ser usadas como bloques de construcción para terapia génica o como agentes de contraste en imagenología de resonancia magnética.^{17,18}

Adicionalmente, se han hecho grandes investigaciones en nanodispositivos inspirados biológicamente, tales como el desarrollo de reacción en cadena de ADN/Polimerasa o computadores moleculares basados en proteínas.^{19,20} Otra área de interés es el desarrollo de motores moleculares autoensamblantes que imiten por ejemplo los flagelos de bacterias.^{21,22} Estos motores biológicos son ejemplos excelentes de moléculas autoensamblantes que forman una estructura funcional, y por lo tanto son importantes para ser estudiados como modelos a ser imitados para el desarrollo de nanomotores sintéticos que puedan interactuar con estructuras biológicas. A un nivel un poco más macro, pero partiendo de escalas nanométricas también, algún día dispositivos del tamaño de una bacteria podrán ser programados para destruir placas arteriales o células cancerosas, o para reparar el daño celular causado

por el envejecimiento.²³ Dado el origen molecular de todos los procesos patofisiológicos, la nanotecnología tiene un potencial inmenso para ser aplicada en medicina.¹

Dado la escala molecular a la cual funcionan los dispositivos y materiales nanotecnológicos, su potencial ambiental es enorme, como por ejemplo, en la degradación y/o separación de sustancias tóxicas como resultado de las actividades humanas. El ambientalista Terence McKenna, citado por Eric Drexler²³ se refirió a la nanotecnología como "la más radical de las revoluciones verdes". Además, dado que se supone que al usar la nanotecnología se crearán sustancias por la manipulación de átomos individuales, los productos de desecho que den como resultado tales procesos de manufactura, serán muy pocos, y en cualquier caso también podrán ser reciclados por nanodispositivos.³ Se añade que la mayoría de productos nanotecnológicos usarán elementos abundantes y comunes como el carbono, lo cual además de producir materiales muy livianos y resistentes, puede incluso ayudar a disminuir el efecto invernadero, si se desarrollan nanodispositivos capaces de tomar CO₂ y mejor todavía, CO. La fabricación de materiales más livianos y baratos permitirá aplicaciones prácticas de tecnologías como el funcionamiento de aparatos, particularmente vehículos, con energía solar. Esto además de ahorrarle mucho dinero a la humanidad, será ambientalmente muy beneficioso. Finalmente, aunque los nanodispositivos no podrán quitarle la radiactividad a desechos nucleares y atómicos, estos dispositivos sí podrán tomar moléculas radioactivas y concentrarlas de una forma que puedan ser fácilmente removidas.

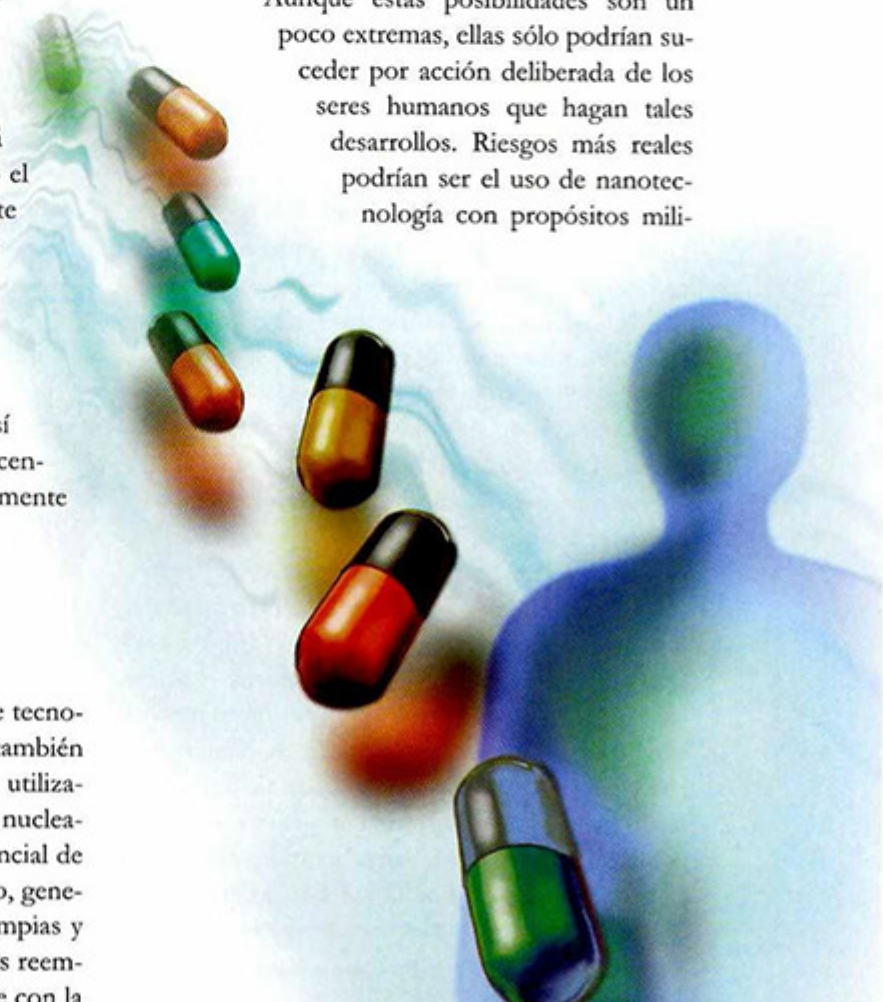
Riesgos y aspectos éticos y legales de la nanotecnología

La nanotecnología, como la mayoría de tecnologías humanas, produce beneficios, pero también puede producir mucho daño.³ Tecnologías utilizadas en la agricultura y hasta en las armas nucleares, le han hecho o al menos tienen el potencial de hacerle mucho daño al planeta. Sin embargo, generalmente las nuevas tecnologías son más limpias y seguras que las tecnologías viejas a las cuales reemplazan. Es muy probable que lo mismo pase con la

nanotecnología, y dado que se desarrolla de manera acelerada, es hora de empezar la discusión sobre guías que conduzcan su desarrollo e implementación responsable con fines pacíficos y legislaciones que castiguen su uso indebido y malintencionado.³ Las críticas extremas a la nanotecnología incluyen la idea de "nanobots rebeldes y autorreplicantes" que puedan salirse de control y devorar el planeta.³ Al menos hay un autor que ha manifestado que esta posibilidad, en estos círculos conocida como "plaga gelatinosa gris (*grey goo*)", es virtualmente imposible que ocurra en la realidad y muy difícil que se llegue a ella a propósito.²⁴

Otra posibilidad extrema que ha sido contemplada es que la nanotecnología lleve al desarrollo de organismos superinteligentes que usarían su inteligencia para dominar el mundo y reemplazar a la humanidad.²⁵ Esta posibilidad también ha sido desvirtuada pues la historia ha demostrado que las personas más inteligentes no son las que dominan el planeta.³

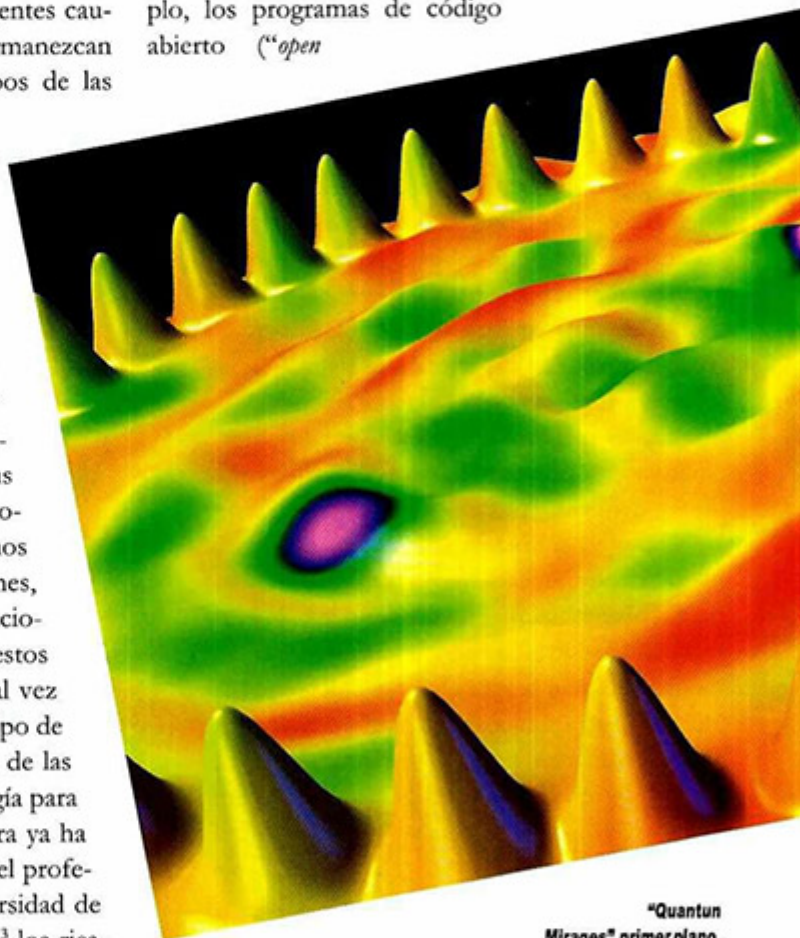
Aunque estas posibilidades son un poco extremas, ellas sólo podrían suceder por acción deliberada de los seres humanos que hagan tales desarrollos. Riesgos más reales podrían ser el uso de nanotecnología con propósitos mili-



Se debe usar “el arma de la apertura” para controlar los riesgos del uso inadecuado de la nanotecnología, en el sentido de que el mantenimiento de una sociedad abierta es la mejor defensa contra el mal uso de la tecnología.

tares y/o terroristas. Aquí hay que anotar que ya el Departamento de Defensa de Estados Unidos es uno de los principales patrocinadores de investigación en nanotecnología.³ En términos realistas, el uso militar de la nanotecnología podría incluir un mejoramiento en los sistemas de sensores y el manejo de información, y otras aplicaciones similares relativamente benignas. Sin embargo, aplicaciones menos benignas pueden ser imaginadas, como por ejemplo el desarrollo de nanodispositivos que puedan infiltrar los sistemas electrónicos del enemigo o esparcir agentes causantes de enfermedades que permanezcan en estado latente en los cuerpos de las víctimas y que se activen con una señal. Este tipo de aplicaciones no tendría impacto en ambientes naturales donde no hubiera seres humanos, pero agentes diseñados para destruir cosechas o bosques, obviamente sí supondrán una amenaza muy grande para ambientes naturales.³ Al menos la nanotecnología militar destructiva (no la de vigilancia) cumplirá sus funciones en el plano de la química y la biología. Hay que plantearse si los gobiernos reconocerán como armas estas aplicaciones, si serán reguladas por los tratados internacionales de armas químicas y biológicas, si estos tratados tendrán que ser ampliados, o tal vez habrá tratados nuevos para regular este tipo de armas.³ La discusión sobre la regulación de las aplicaciones militares de la nanotecnología para incluirlas dentro de las reglas de la guerra ya ha comenzado. Sin embargo, como razona el profesor de legislación ambiental de la Universidad de Leyes de Tennessee, Glenn H. Reynolds,³ los riesgos de la nanotecnología militar son más manejables que los de la biotecnología, pues faltan muchos años de trabajo para el desarrollo de nanoagentes patogénicos, el mundo lleva mucho tiempo manejando la amenaza de agentes patogénicos y muchos gobiernos han trabajado largo tiempo para hacerlos cada vez más letales. Por lo tanto, en las décadas venideras la mayoría de nuestros problemas vendrán de este tipo de agentes biológicos y no de nano plagas conjeturales.

También existe el riesgo de que las aplicaciones civiles de la nanotecnología no funcionen tan bien, o tan limpiamente como se planea. Sin embargo, el riesgo de consecuencias negativas es menor en casos civiles comparado con las potenciales aplicaciones militares de la nanotecnología, pues al menos en teoría, las aplicaciones civiles no tienen como objetivo la destrucción y/o afectación de otras personas. Además, y por irónico que pueda parecer, los desarrollos tecnológicos civiles tienden a ser más robustos y confiables que los militares, pues están basados en mayor experiencia y en la colaboración simultánea de personas y laboratorios. Por ejemplo, los programas de código abierto (“open



“Quantum Mirages” primer plano. (Imagen cortesía IBM).

source”) tienden a ser mejores que los de código cerrado de un único propietario, pues en el primer caso se cuenta con el concurso y la crítica de más personas e instituciones que en el segundo. Algo parecido puede suceder al comparar el desarrollo de tecnologías militares y civiles.²⁶ De todos modos, a medida que la nanotecnología se lleve del laborato-

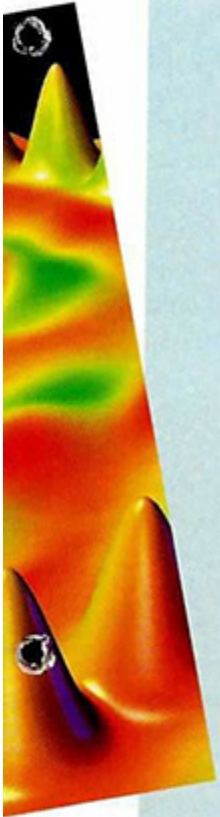
Recuadro 1

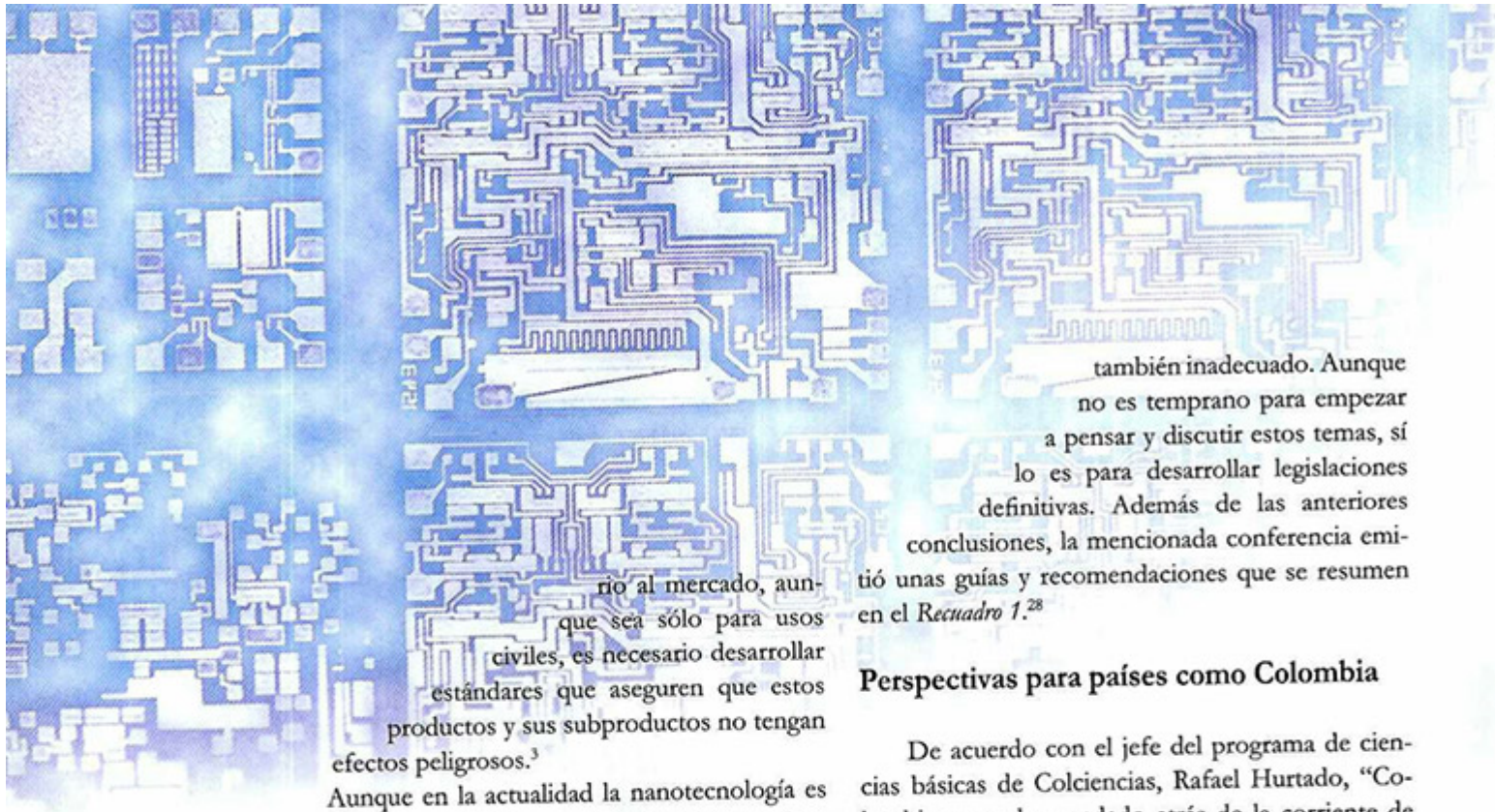
Principios de desarrollo

1. Los replicadores artificiales no deben ser capaces de replicarse en un ambiente natural y/o no-controlado.
2. No se apoya la evolución dentro de un contexto de manufacturas de sistemas auto-replicantes.
3. Cualquier información replicada debe ser libre de error.
4. Se debe limitar específicamente la proliferación de diseños de dispositivos de nanotecnología molecular y hay que proporcionar formas de rastrear cualquier sistema replicante.
5. Los desarrolladores deben tratar de considerar sistemáticamente las consecuencias ambientales de la tecnología y limitarlas a los efectos buscados. Se requiere investigación significativa en modelos ambientales, manejo de riesgos, teorías, mecanismos y diseños experimentales para sistemas de salvaguarda incluidos dentro de los dispositivos.
6. La autoregulación por parte de las industrias debe ser diseñada cuando sea posible. Los incentivos económicos pueden ser proporcionados en forma de descuentos o políticas de seguros para organizaciones de desarrollo de nanotecnología molecular que certifiquen la aceptación de las guías y regulaciones. La disposición a autoregularse debe ser una condición para el acceso a formas avanzadas de nanotecnología.
7. Se debe restringir la distribución de capacidad de desarrollo manufacturero molecular, cuando sea posible, a actores responsables que hayan acordado aceptar las guías y regulaciones. No se necesita aplicar estas restricciones a productos finales del proceso de desarrollo que satisfagan las guías.

Principios específicos de diseño

1. Cualquier dispositivo auto-replicante que tenga suficiente información como para describir su propia manufactura debe tenerla en forma encriptada de modo que cualquier error de replicación aleatorice sus planos de construcción.
2. Se deben usar instrucciones encriptadas en dispositivos de nanotecnología molecular, para desestimular la proliferación irresponsable y la piratería.
3. No deben suceder mutaciones (autónomas o de otras formas) fuera de condiciones de laboratorio sellado.
4. Los sistemas de replicación deben generar huellas que se puedan seguir.
5. Los diseños de dispositivos de nanotecnología molecular deben incorporar mecanismos de salva-guarda, tales como: 1) Dependencia absoluta de combustible artificial o "vitaminas" que no existan en ambientes naturales. 2) Producción de dispositivos que dependan de señales transmitidas para su replicación o en algunos casos para su funcionamiento. 3) Direccionamiento de señales de control a través de un dispositivo, de modo que los subensamblajes no funcionen independientemente. 4) Programación de fechas de terminación en los dispositivos, y 5) Desarrollo específico de otras innovaciones en el laboratorio o dispositivos de tecnología de seguridad para enfrentar los peligros potenciales de la nanotecnología molecular.





rio al mercado, aunque sea sólo para usos civiles, es necesario desarrollar estándares que aseguren que estos productos y sus subproductos no tengan efectos peligrosos.³

Aunque en la actualidad la nanotecnología es una disciplina todavía muy teórica y restringida a laboratorios y simulaciones de computadores, la discusión sobre el desarrollo de regulaciones legislaciones ha comenzado. En 1999, en el instituto Foresight, una fundación del Valle de Silicon en California dedicada a la exploración de aspectos relacionados con tecnologías avanzadas, se llevó a cabo una conferencia con la intención de empezar esta discusión.³ A esta conferencia asistieron representantes de las comunidades científicas, ambientales, académicas y militares y en ella se llegó a varios consensos:

Aun siendo deseable, no se debe detener el desarrollo de la nanotecnología, pues a pesar de que éste no es tan complicado como el de otras tecnologías como la nuclear, sus bases teóricas ya están sentadas y las dificultades que quedan son de naturaleza técnica. Además, prohibir o restringir de forma estricta el desarrollo de la nanotecnología, tendría como consecuencia que ésta fuera desarrollada por instituciones o naciones fuera de ley, sobre las cuales no se podría ejercer ningún control.³

Otra de las conclusiones de esta conferencia es que se debe usar "el arma de la apertura" para controlar los riesgos del uso inadecuado de la nanotecnología, en el sentido de que el mantenimiento de una sociedad abierta es la mejor defensa contra el mal uso de la tecnología.²⁷

La tercera gran conclusión de esta conferencia es que la regulación de la nanotecnología va a ser un proceso y no un evento. Pretender desde ya hacer una legislación definitiva que englobe todos los aspectos presentes y futuros del desarrollo y aplica-

también inadecuado. Aunque no es temprano para empezar a pensar y discutir estos temas, sí lo es para desarrollar legislaciones definitivas. Además de las anteriores conclusiones, la mencionada conferencia emitió unas guías y recomendaciones que se resumen en el *Recuadro 1*.²⁸

Perspectivas para países como Colombia

De acuerdo con el jefe del programa de ciencias básicas de Colciencias, Rafael Hurtado, "Colombia no se ha quedado atrás de la corriente de investigación internacional". Universidades como la Nacional, Los Andes, la del Valle, la de Antioquia, la Industrial de Santander y la del Quindío, adelantan proyectos de investigación sobre el tema tanto desde el punto de vista teórico como desde su aplicación.²⁹

Un ejemplo tangible son los nanotubos creados por el grupo del profesor Gustavo Holguín, quien los describe como "pequeños tubos constituidos por átomos de carbono de dimensiones nanométricas, con propiedades mecánicas únicas y con resistencia mayor que la del acero. Dependiendo de su ordenamiento molecular pueden ser conductores, semiconductores o aislantes eléctricos. Se pueden utilizar como catalizadores, conductores de señales, etc. Tienen utilidad en electrónica, óptica y mecánica, entre otras".²⁹

Para la profesora titular de la Universidad de los Andes y Ph.D en física, Angela Camacho, "la nanotecnología es una necesidad porque el mundo va en esa dirección. Si no tenemos la oportunidad de producir nanodispositivos y venderlos, por lo menos podemos tener toda la información, conocer exactamente cómo se comportan y saber qué se debe y qué no se debe comprar".²⁹

Discusión y conclusiones

Algo que diferencia a la nanotecnología de las otras tecnologías desarrolladas durante toda la historia cultural humana, es el hecho de que por primera vez se está empezando a construir de abajo hacia arriba, como en realidad lo hace la naturaleza.

es decir se está empezando desde el nivel atómico hacia arriba para llegar a construir dispositivos y sustancias que tienen aplicación virtualmente en todas las actividades humanas. Hasta ahora todos los materiales, herramientas y bloques con que se han construido las civilizaciones humanas se han manufacturado de arriba hacia abajo, es decir tomando materias primas, recortándolas y aliándolas hasta alcanzar las macroformas deseadas. Aunque no es nada nuevo que los seres humanos imitemos a la naturaleza en el desarrollo de nuestros dispositivos, la nanotecnología permite por primera vez imitar los procesos de la naturaleza desde sus niveles más íntimos, esto es, desde niveles atómicos y moleculares. Ciertamente esto abrirá nuevos campos investigativos y conceptuales y tendrá muchas más aplicaciones que las pocas mencionadas en este artículo. Sin embargo, a la hora de discutir y hacer conclusiones, los seres humanos tenemos la tendencia a hablar de lo negativo, lo cual, en lo que atañe a este artículo, tiene derivaciones interesantes.

Una de ellas tiene que ver con sus riesgos, particularmente el llegar a ensamblar nanobots autorreplicantes (lo cual se sugiere que sea prohibido debido a las incipientes regulaciones que existen sobre el tema). Lo más probable es que estos seres vivos se reproduzcan, muten y sean seleccionados por el ambiente de una forma darwiniana. En una palabra, evolucionarán.

Dado que podrán utilizar elementos, sustancias y materiales que no pueden utilizar los seres vivos orgánicos, y dadas las relativamente (con respecto a los seres vivos orgánicos) eficientes y considerables habilidades en el manejo de información que les darán sus creadores humanos, cabe preguntar si estos nanobots evolucionarán a velocidades superiores a las de sus contrapartes orgánicas, si llegarán a ser conscientes de sí mismos y tratarán de reemplazarnos. Parece que estas preguntas atañen más al campo de la ciencia ficción, pero cuando se trata de tecnologías de punta como las revisadas en este artículo, no sabemos dónde está el límite entre ciencia y ciencia ficción. Probablemente no existe, pero si existe se mueva muy rápido en el tiempo.

conforme el desarrollo tecnológico humano se acelera. Hablando de límites inexistentes y/o elusivos, y dadas las amplias aplicaciones biomédicas de la nanotecnología, también hay que preguntarse si en el futuro se podrá diferenciar entre seres orgánicos y artificiales, conforme el desarrollo de dispositivos híbridos vaya alcanzando niveles más macro de las escalas nanomoleculares. Con estos avances en nanotecnología y otros en neurología, ¿por fin se están sentando bases científicas y tecnológicas para el desarrollo de seres cibernéticos, como los que veíamos en las películas de ciencia ficción de finales del siglo XX? En este sentido es interesante anotar cómo las producciones de ciencia ficción de principios del siglo XXI han actualizado este tema con respecto a la nanotecnología, pues la integración de tejido orgánico y artificial debe hacerse desde un nivel molecular, dentro de lo cual el tema revisado en este artículo ha tomado preponderancia en las

series como Star Trek cuando de los Borg (imperio cibernético) se habla. ¿Cómo evitar entonces que aplicaciones de la nanotecnología que en principio son pacíficas (como aplicaciones neurológicas de lo que podríamos llamar nanocibernética) empiecen a ser usadas militarmente y deriven en males como el nombrado anteriormente?

De los artículos revisados para elaborar este escrito, se ve que los promotores de la nanotecnología hacen promesas que dejan el sabor de que su intención es convencer subliminalmente al lector de que la nanotecnología podría ayudar a solucionar muchos problemas de la humanidad, incluyendo la

pobreza, pues se alega que con una nanotecnología madura muchos costos de las actividades humanas podrían llegar a abaratare significativamente. Su aplicación abarcaría desde el almacenamiento de enormes cantidades de información en dispositivos más pequeños hasta la construcción de materiales ultralivianos y ultrarresistentes con destino por ejemplo a vehículos que funcionasen eficaz y eficientemente con energía solar, pasando por todas

A medida que la nanotecnología se lleve del laboratorio al mercado, aunque sea sólo para usos civiles, es necesario desarrollar estándares que aseguren que estos productos y sus subproductos no tengan efectos peligrosos.

ve en la realidad mundial es una distribución no equitativa de la riqueza y las tecnologías nuevas entre países pobres y desarrollados. ¿Cómo hacer para que esto no pase con la nanotecnología? Si nos basamos en datos históricos de otras tecnologías, seguramente esta inequidad también involucrará a la nanotecnología, dejando rezagados en el tiempo a los países con mayor dificultad en el acceso y uso de ella y probablemente en los lugares donde se necesitará con más urgencia. Las perspectivas para países como Colombia, clasificados como países pobres avanzados, probablemente no son tan desalentadoras al compararlas con las de los países más pobres del planeta. Países como el nuestro seguramente no estarán a la vanguardia en el desarrollo de estas tecnologías, pero sí es nuestra responsabilidad, como en muchos otros temas, informarnos al menos teóricamente.

Como con otras tecnologías de punta como la clonación, por ejemplo, la nanotecnología provoca muchos interrogantes y críticas a nivel ético, social, económico, ambiental, etc., pero no por esto se debe frenar su avance. A la par con su desarrollo, o incluso años antes, se debe empezar la discusión sobre recomendaciones, guías y legislaciones concernientes al tema y así minimizar las consecuencias negativas que se puedan presentar.

Referencias

1. Silva GA: *Introduction to Nanotechnology and its Applications to Medicine. Surg Neurol*; 61:216-220. 2004.
2. Cooper & Ryan: *IEEE Proc.-Nanobiotechnol. Editorial on Nanotechnology*; 150(1): 1-2. 2003.
3. Reynolds GH: *Environmental Regulation of Nanotechnology: Some Preliminary Observations. Environmental Law Institute: ELR*; 31: 10681-10688. 2001.
4. Stupp SI y Brawn PV: *Molecular Manipulation of Microstructures: Biomaterials, Ceramics, and Semiconductors. Science*; 277: 1242-1248. 1997.
5. Stupp SI, Lebonheur VV, Walker K: *Supramolecular Materials: Self-organized Nanostructures. Science*; 276: 384-389. 1997.
6. Stupp SI y Ciegler GW: *Organoapatites: Materials for Artificial Bone. I. Synthesis and Microstructure. J Biomed Mater Res*; 26: 169-183. 1992.
7. Stupp SI, Mejicano GC, Hanson JA: *Organoapatites: Materials for Artificial Bone. II. Hardening Reactions and Properties. J Biomed Mater Res*; 27: 289-299. 1993.
8. Hartgerink JD, Beniash E, Stupp SI: *Self-assembly and Mineralization of Peptide-amphiphilic Nanofibers. Science*; 294: 1684-1688. 2001.
9. Ameer GA, Mahmood TA, Langer R: *Biodegradable Composite Scaffold for Cell Transplantation. J Orthop Res*; 20: 16-19. 2002.
10. Anil GE, Yoo JJ, Kim BS, Atala A: *Tissue Engineered Stents Created from Chondrocytes. J Urol*; 165: 2091-2095. 2001.
11. Peters MC, Polverini PJ, Mooney DJ: *Engineering Vascular Networks in Porous Polymer Matrices. J Biomed Mater Res*; 60: 668-678. 2002.
12. Hanes J, Cleland JL, Langer R: *New Advances in Microsphere-based Single Dose Vaccines. Adv Drug Del Rev*; 28: 97-119. 1997.
13. LaVan DA, Lynn DM, Langer R: *Moving Smaller in Drug Discovery and Delivery. Nat Rev Drug Discov*; 1: 77-84. 2002.
14. Lockman PR, Mumper RJ, Khan MA, Allen DD: *Nanoparticle Technology for Drug Delivery Across the Blood-brain Barrier. Drug Dev Ind Pharm*; 28: 1-13. 2002.
15. Schnur JM: *Lipid Tubules: A paradigm for Molecularly Engineering Structures. Science*; 262: 1669-1676. 1993.
16. Schnur JM, Price R, Rudolph AS: *Biologically Engineered Microstructures: Controlled Release Applications. J Polym Mater*; 14: 105. 1997.
17. Karak N y Maiti S: *Dendritic Polymer: A Class of Novel Material. J Polym Mater*; 14: 105. 1997.
18. Lanz S, Ruloff R, Totó E, Merbach AE: *Gill Complexes with Fast Water Exchange and High Thermodynamic Stability: Potential Building Blocks for High-Relaxivity MRI Contrast Agents. Chemistry*; 9: 3555-3556. 2003.
19. Adleman LM: *Molecular Computation of Solutions of Combinatorial Problems. Science*; 266: 1021-1024. 1994.
20. Birge RR: *Protein Based Computers. Sci Am*; 3: 90-95. 1995.
21. Imoe Y, Atsumi T: *Na⁺ Driven Bacterial Flagellar Motors: A Mini-review. J Bioenerg Biomemb*; 21: 705-716. 1989.
22. Noji H, Yasuda R, Yoshida M, Kinosita K Jr.: *Direct Observation of the Rotation of F₁-ATPase. Nature*; 386: 299-302. 1997.
23. Drexler E, Peterson C, Pergamit G: *Unbounding the Future. New York: William Morrow and Company, Inc.*; 1991.
24. Freitas RA Jr.: *Some Limits to Global Ecophagy by Bivorous Replicators, With Public Policy Recommendations. URL disponible en: <http://www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html>.*
25. Joy B: *Why the Future Doesn't Need Us. URL disponible en: <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.*
26. Brans BR: *Open Sourcing Nanotechnology Research and Development: Some Considerations. Instituto Foresight, VIII Conferencia en Nanotecnología Molecular; 2000. URL disponible en: <http://www.foresight.org/Conferences/MNTS/Brans/>.*
27. Kantrowitz A: *The Weapon of Openness. Foresight Background No. 4., Silicon Valley, California, EUA. URL disponible en: <http://www.foresight.org/Updates/Background4.html>.*
28. Jacobstein N, Merkle R, Joy B: *Nanotechnology Guidelines V. 3.7. Instituto Foresight, VIII Conferencia en Nanotecnología Molecular; 2000. URL disponible en: <http://www.foresight.org/guidelines>.*
29. Garzón A, Lancheiro C, Ossorio C: *Academia Nacional de Medicina: Nanotecnología: futuro inmediato de la física. URL disponible en: <http://anm.encolombia.com/noticy3-2.htm>.*

*Un paso adelante
en ciencia y
tecnología*

*Lea Innovación
y Ciencia...*



• ***Suscríbase ya por sólo \$ 36.000 al año*** •

*Al afiliarse a la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia
recibirá la revista TOTALMENTE GRATIS*



Colombia avanzando en nanotecnología

Alba Avila

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Universidad de los Andes,
Bogotá D.C., Colombia.¹*

Johann Osma

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Universidad de los Andes,
Bogotá D.C., Colombia.²*

Yenny Hernández

*Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C., Colombia.³*

E-mail: nanotecnologiacolombia@yahoo.com



Arreglos de microespejos y propulsores de gotas de tinta, quizás son hoy los dos productos con los que más estamos familiarizados a nivel microescala, pues los encontramos en los videobeams y cartuchos de impresora que cotidianamente usamos. Sin embargo, ese uso continuo no nos garantiza la comprensión de su funcionamiento. ¿Pasará lo mismo cuando los nanoproductos lleguen?, ¿será absorbida una tecnología sin entender su funcionamiento?, ¿seremos consumidores de revolucionarias tecnologías sin ni siquiera saberlo?

Utilizar productos tecnológicos sin entenderlos puede limitarnos a una sola función básica que no dejaría visible la posible adaptación de estos productos o módulos de estos a otros problemas.

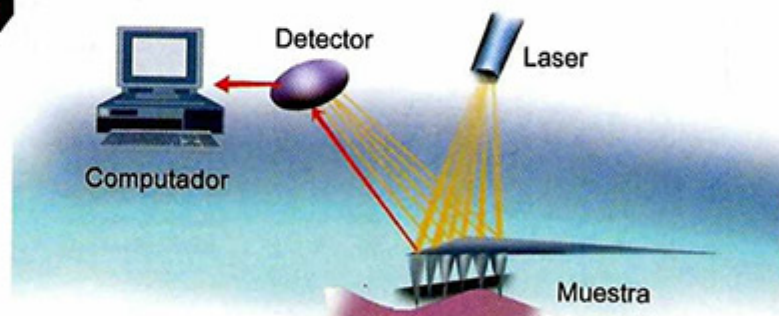
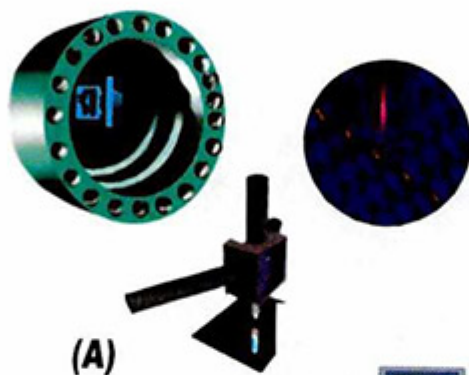
Estado del arte de la nanotecnología

A nivel mundial se empezó a hablar de nanotecnología a finales de los años cincuenta, mientras en Colombia nos recuperábamos de la violencia generada después del Bogotazo y nos llenábamos de esperanza con la propuesta del Frente Nacional. En Caltech, Richard Feynman daba una conferencia⁵ en la que argumentaba que los principios de la física no nos impiden manipular la materia a escala atómica, que la microtecnología no era el último límite de miniaturización y que esa nueva frontera se alcanzaría paso a paso fabricando cada vez herramientas más pequeñas que permitan el ensamblaje de muestras dimensionalmente más reducidas o que podrían ser fabricadas con rayos de partículas.¹ Para este entonces no se conocían los equipos de litografía electrónica ni las herramientas o métodos para manipulación atómica.

Los microscopios electrónicos fueron adaptados como herramientas litográficas a comienzos de los sesenta y su resolución no alcanzaba aún las

escalas nanométricas. Las predicciones de Feynman sobre manipulación atómica tomaron forma veinte años después, cuando los microscopios de barrido fueron inventados en los laboratorios de IBM in Zurich por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, quienes reciben el premio Nobel en 1986.² Ese año se genera una nueva herramienta a nivel atómico conocida como el microscopio de fuerza atómica (Atomic Force Microscope AFM), inventado por Gerd Binnig, Quate y Gerber.⁴

Los microscopios STM (Scanning Tunneling Microscope) y AFM que nos permiten observar y manipular átomos, tienen en común un



principio de barrido y se diferencian en su forma de extraer la información de la muestra. El barrido consiste en mover de forma controlada la aguja sobre la muestra y en algunos ensamblajes más flexibles. En la configuración física de un STM, existe un espacio entre la aguja y la muestra y la información extraída de ésta refleja el número de electrones que tunelán a través del espacio entre ellas. En un AFM, la aguja está en contacto directo con la muestra (al igual que una aguja de tocadiscos lee las pistas sobre un disco), registrando las variaciones verticales de la posición de la aguja que proyectan la superficie de la muestra (figura 1).

Paralelo a los inventos que se reportaban en Europa, en Estados Unidos, Erik Drexler publica-

Figura 1. (A) Diagrama de un microscopio de efecto túnel⁶ y (B) Esquema de microscopio de fuerza atómica.⁷

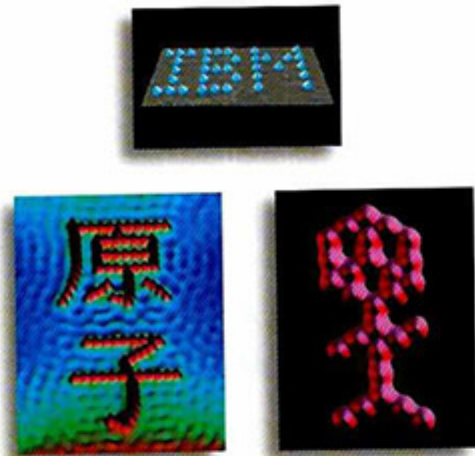


Figura 2. Logo de IBM, la palabra átomo en Kanji y el hombre más pequeño (Imágenes IBM).

Este artículo fue seguido por un libro, "Engines of creation" publicado en 1986, en el cual se describe en detalle los nanoensambladores o autoensambladores, dispositivos moleculares que dadas las características químicas, físicas o biológicas de sus mínimas unidades (moléculas), pueden fabricar estructuras más complejas que las suyas. De esta visión se cree que se podría crear cualquier elemento físico con sólo explotar las características físicas de sus moléculas, dando vuelo a la imaginación y consolidando la ciencia aplicada a través de la generación de empresas cuyo objetivo sea "la fabricación de cualquier elemento a partir de sus mínimas entidades", que se denomina molecular manufacturing y es el principal objetivo de empresas como Zyvex (que cuenta con asesoría de Ralph Merckle).

Una vez que predicciones y herramientas se combinan a comienzos de los noventa y se reportan evidencias de manipulación atómica en el laboratorio IBM en California, los investigadores Donald Eigler y Erhard Schweizer manipulan la posición de 35 átomos de Xenón sobre un sustrato de Níquel 110 para generar el logo de IBM. A esta pionera escritura atómica le siguieron otros trabajos más artísticos como el hombre en monóxido de carbono y los caracteres en Kanji para átomo (figura 2).⁵

ba su primer artículo sobre ingeniería molecular, titulado "Diseño de proteínas como un camino a la fabricación molecular", ("Protein design as a pathway to molecular manufacturing"), que actualmente se reconoce como la primera publicación de nanotecnología, dado que toca una de sus áreas centrales, el autoensamblaje.³

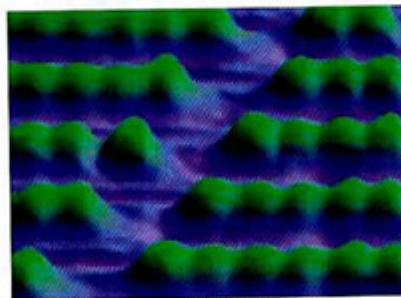


Figura 3. El ábaco más pequeño del mundo, átomos de Xenón ordenados sobre un sustrato de Níquel.

La replicación de macroestructuras bajo manipulación atómica fue reportada a finales de los años noventa en IBM Zurich, donde se construyó el primer ábaco con moléculas individuales de Xe (figura 3).⁶

Mientras científicos en IBM manipulaban átomos a comienzos de los noventa, Japón (NEC Corporation) se dedicaba al estudio del material residuo de la síntesis de fullerenos por el método de descarga de arco eléctrico, el cual consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por

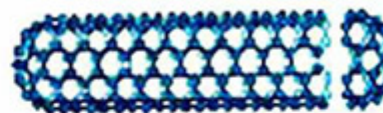


Figura 4. Representación de la estructura de un nanotubo de carbono.

dos electrodos de grafito enfrentados, lo que genera la evaporación de átomos de carbono para su siguiente condensación en una atmósfera inerte. Sumio Iijima, microscopista consagrado, descubrió depósitos en forma de aguja en el ánodo de la descarga los cuales ante el microscopio electrónico de transmisión (Trasmision Electron Microscope TEM).

Estos aparecieron como estructuras gráficas cerradas en forma de tubo a los cuales posteriormente llamaría Nanotubos de Carbono (figura 4).

Estas nanoestructuras no hubiesen sido observadas de no tener un microscopio electrónico o de no haber estado motivados por el auge en investigación de los fullerenos. Estos últimos son una familia de moléculas tridimensionales cerradas de carbono en forma de jaula (figura 5), descubiertas a mediados de 1985 en la Universidad de Rice por el Professor Richard Smalley, quien en 1996 recibió junto con Harold Kroto y Lowell Lamb el Premio Nobel de Química por su descubrimiento.

Las propiedades físicas de los nanotubos de carbono como su alto coeficiente de elasticidad, su dureza, su alta emisividad y su flexibilidad en la manipulación de propiedades eléctricas al depositar materiales metálicos en su superficie e inyectarlos dentro del tubo, han generado interés en aplicaciones nanotecnológicas. Aun más allá se han retomado las ideas de Drexler para construir estructuras 3D a partir de sus mínimas unidades, proceso que se conoce como *bottom up*, ya que se piensa que los

nanotubos son óptimos para los engranajes a nanoescala, nanopistones y nanopalancas entre otros.

El descubrimiento de nuevas herramientas que permiten la manipulación de unidades para generar propiedades deseadas de materiales o para fabricación de estructuras más complejas y el estudio de nuevos materiales a escalas nanométricas han permitido colocar nanoproductos en el mercado. Hoy se pueden listar los diez mejores productos a nanoescala desde el año 2003. Éstos, aunque no tienen una directa aplicación a la escala en la que la tecnología se bautizó, nanómetros, sí presentan directas aplicaciones en macroproductos tales como:

- Cera para los "skies", compuesta de nanopartículas que depositadas sobre los skies generan películas uniformes y delgadas, que reducen los efectos de fricción y además incrementan su dureza a medida que la temperatura decae.⁷
- Ropa antiarrugas y anticolorantes:⁸ una técnica desarrollada por Nanotex que consiste en adherir estructuras moleculares a textiles de algodón, las cuales previenen la absorción de sustancias e incrementan su resistencia a la deformación.

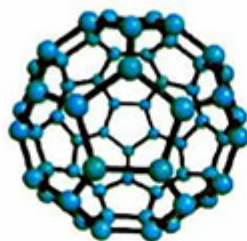
Nanotecnología en Colombia

Aunque en Colombia no hemos avanzado tanto como en Europa o Estados Unidos en términos de nanotecnología y aún no tenemos productos nacionales para la venta en el mercado, hemos comenzado nuestro proceso hace nueve años.

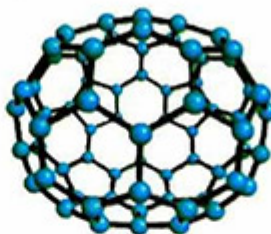
En cuanto a herramientas, el primer microscopio de efecto túnel, "tecnología colombiana" fue fabricado en el Centro Internacional de Física, CIF, a finales de 1995.⁹ Estudios sobre fullerenos se realizan en Colombia desde 1996 con el apoyo inicial de Colciencias y del CIF.

El Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia cuenta con un SEM desde hace más de diez años, el cual ha sido un gran apoyo en numerosas tesis de pre y postgrado. En el año 2002 la misma universidad creó el programa de "Equipos Robustos", el cual cuenta con laborato-

Figura 5. Fullerenos más conocidos. Estos están compuestos por 60 y 70 átomos de carbono respectivamente. El fullereno C60 también es conocido como Buckyball.



C60



C70

rios especializados de caracterización de materiales como Resonancia Magnética Nuclear, SEM, TEM, Fluorescencia de rayos X y microscopía óptica. El SEM es modelo Quanta 200, trabaja con un voltaje de aceleración de 30 kV y una resolución de 10 nanómetros (dependiendo de la muestra) y el TEM es modelo Tecnai 20, trabaja con un voltaje de aceleración de 200 kV y una resolución de 0,2 nanómetros. Estos dos equipos fueron vendidos por FEI Electrón Optics. Actualmente el Grupo de Óptica del

Departamento de Física de la Universidad Nacional está buscando adaptar el microscopio de barrido del departamento para realizar litografía de haz electrónico, lo que permitiría hacer contactos eléctricos de 50 nm de ancho.

La fabricación de nanotubos se inicia en la Universidad Nacional de Colombia dirigida por el profesor Gustavo Holguín y los trabajos pioneros en fabricación de nanotubos, por Yenny Hernández,¹⁰ y Giovanni Pinzón.¹¹

Actualmente los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Nacional de Colombia y Yenny Hernández con su trabajo de Maestría de la misma universidad continúan realizando investigaciones.

Por otro lado, en la Universidad de los Andes se han realizado tesis, tanto de pregrado como de maestría, en el área de micro y nanosistemas. Uno de estos trabajos titulado "Diseño de nanoestructuras para interacción celular" de Johann Osmá,¹³ trata del diseño y simulación de un robot con capacidad de interacción nano-

El descubrimiento de nuevas herramientas que permiten la manipulación de unidades para generar propiedades deseadas de materiales o para fabricación de estructuras más complejas y el estudio de nuevos materiales a escalas nanométricas han permitido colocar nanoproductos en el mercado.

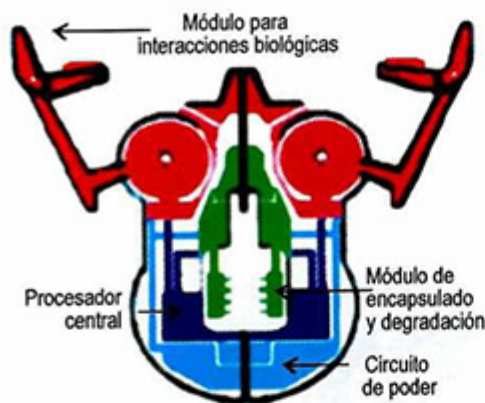


Figura 6.
Partes del nanobot.

métrica (nanobot) para la detección, encapsulación y degradación del virus del VIH dentro del torrente sanguíneo (figuras 6 y 7). Este diseño permite la detección del virus disuelto en la sangre y también en células (linfocitos T) infectadas por este.

Para entender un poco más nuestro estado actual en el tema e identificar recursos humanos y físicos aislados trabajando a escala nano, la Universidad de los Andes organizó el primer encuentro de micro-nanotecnologías en marzo del año 2004. El objetivo principal era crear un espacio tanto para las personas que trabajan en estas áreas a nivel nacional como para los estudiantes interesados en difundir sus temas de investigación y motivar la colaboración entre universidades y grupos de investigación.

Los nombres de los conferencistas invitados y los trabajos presentados se describen a continuación.¹⁴

En el área de microsistemas se destacan los trabajos de Fernando Jiménez y Mauricio Guerrero de la Universidad de los Andes y Juan Ostos sobre "Microsistemas", "Sistema sensor de gas micro-fabricado" y "Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond", respectivamente.

Eduardo Posada del CIF, Antonio García, Ángela Escobar y Jairo Escobar de la Universidad de los Andes, presentaron trabajos sobre el cambio tecnológico y el desarrollo en el país desde lo macro hasta lo nanométrico.

En el área de la nanotecnología, Germán Moreno de KEMTEK presentó el único producto comercial nanométrico del evento.

Alba Ávila, Ferney Rodríguez y Johann Osma de la Universidad de los Andes, presentaron "Fabricación y caracterización de nanoestructuras", "Conductividad eléctrica en el ADN" y "Diseño de un nanorobot".

La Universidad Nacional, a través de Jenny Hernández, se hizo presente con su trabajo "Fabricación de nanotubos de carbono". Finalmente la Universidad Distrital presentó "Desarrollo de modelos para nanodispositivos", a cargo de Andrés Lombo.

Este encuentro dejó claro que:

1. Existe interés por parte de los estudiantes en participar en el desarrollo de estas nuevas tecnologías y
2. Contamos con un grupo de investigadores motivados en sus campos de trabajo, quienes generaron inquietudes sobre áreas en las cuales podemos comenzar a trabajar.

Aunque nanotecnología a nivel mundial signifique grandes inversiones, hacer parte de la revolución no es sólo un proceso competitivo para sacar un producto al mercado, sino para entender la tecnología y difundirla. Es claro que Colombia no cuenta con equipos ni laboratorios para el desarrollo de productos pero también es cierto que cuenta con una gran capacidad humana que incluso superando estas dificultades ha mostrado resultados como se menciona en este artículo.

Aunque nanotecnología a nivel mundial signifique grandes inversiones, hacer parte de la revolución no es sólo un proceso competitivo para sacar un producto al mercado, sino para entender la tecnología y difundirla.

¿Qué podemos hacer ahora?

1. Trabajar en el desarrollo de kits y tutoriales para difundir los principios de esta tecnología tanto en las universidades como en colegios de educación secundaria.

Los tutoriales pueden ser interactivos con presentación de espacios 3D que permitan al estudiante familiarizarse con los ambientes en los cuales se fabrican las muestras a baja escala y con el diseño y parámetros físicos usados a escalas nanométricas.

2. Generar grupos de trabajo interdisciplinario que permitan explotar las fortalezas de diversas instituciones o universidades a nivel experimental o teórico, y a su vez compartir colaboraciones internacionales.

3. Generar programas curriculares que incluyan cursos de micro y nanotecnologías a nivel de ciencias e ingeniería. La enseñanza de estos programas quizás involucre un cambio en la metodología de enseñanza que a su vez motiva y prepara al estudiante para desempeñarse en ambientes multidisciplinarios y para su interacción con otros grupos.

4. Realizar estudios de impacto socioeconómico y cultural de esta nueva tecnología, sobre lo cual apenas este año se conoce una publicación formal internacional¹² y explotar sus resultados en áreas artísticas o literarias.

Es claro que hacer parte del desarrollo de una nueva tecnología demanda compromiso de todos, es decir, de las instituciones académicas, los maestros y los estudiantes. Es necesario el trabajo integrado y multidisciplinario de las universidades y los centros de investigación para promover en mayor medida el desarrollo tecnológico de esta área. Se deben trazar objetivos y establecer un plan de acciones a largo plazo, que permita aprovechar la experiencia adquirida en casi una década de trabajo, para iniciar una nueva fase de producción científica y comercial.

Referencias

1. Conferencia dada en Caltech por Richard Feynman, titulada "There's Plenty of Room at the Bottom" (<http://www.zyvec.com/nanotech/feynman.html>). p. 57.
2. Binnig G, Rohrer H, Gerber Ch, Weibel E: *Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy*, Vol. 49, N.1, 1982.
3. Dreier E: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol.78, N. 9, pp 5275-5278.
4. Binnig G, Quate CF, Gerber Ch: *Atomic Microscope*, *Phys. Rev. Letters*, Vol 56, N.9, p 930, 1986.
5. <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html#stm10>
6. Jung TA, Schlittler R, Gimzewski JK, Tang H y Joachim C: *Science* 271(5246), 181-184, 1996.
7. <http://www.ceracusa.com>
8. <http://www.nano-tec.com/products/where.htm>
9. Alba Avila: Tesis: Diseño y Construcción de un STM. Centro Internacional de Física, Universidad de los Andes, 1995.
10. Yenny Hernández: Tesis: Producción y Caracterización morfológica de Nanotubos de Carbono por el método de arco de descarga eléctrica. Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia, 2003.
11. Giovanni Pinzón: Tesis: Producción de nanotubos de carbono por deposición química de vapor. Departamento de Química. Universidad Nacional de Colombia, 2004.
12. *Nanoculture Implications of New Technologies*, Ed. N. Katherine Hayles, mayo, 2004.
13. Johann Facelo Osma: Tesis de Maestría: Design of nanostructures for cellular interaction. Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad de los Andes, 2004.
14. Centro de Microelectrónica de la Universidad de los Andes, Eventos: <http://cmua.uniandes.edu.co/eventos/index.html>

Notas:

1 a-avila@uniandes.edu.co

2 j-osma@uniandes.edu.co

3 yrbernandez@unal.edu.co

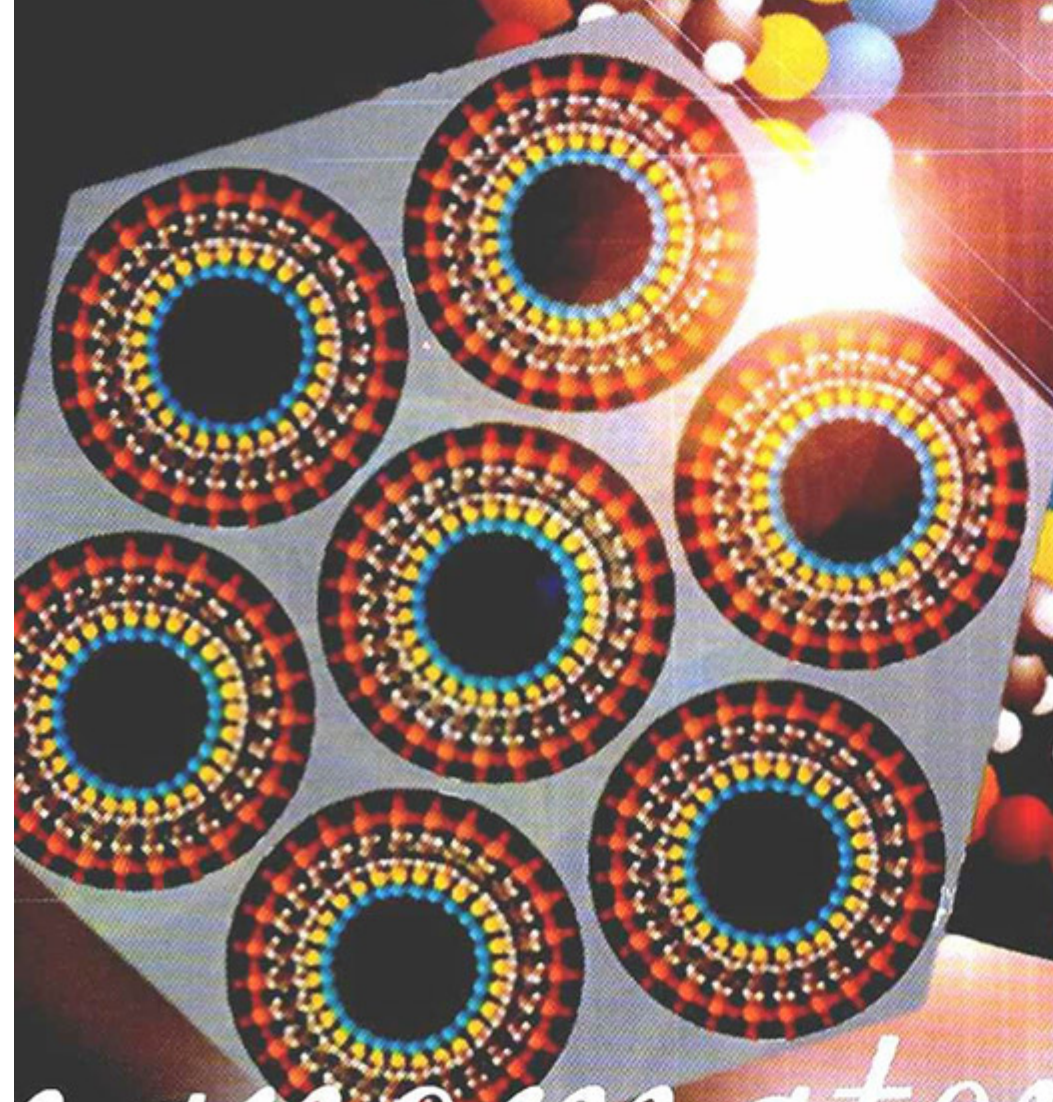
4 nano: prefijo que se utiliza para hablar de cantidades físicas del orden de 10⁻⁹ (por ejemplo: 10-9m = 1nm = 1 billonésima de metro)

5 "There's plenty of rooms in the bottom" 1959

6 <http://www.llnl.gov/str/Scan.html>

7 <http://www.cbe.utoleado.edu/nadarajab/>

de los materiales
artificiales
la economía
de los



de los materiales



Aminta Mendoza

*Física, PhD en Ciencias,
Instituto Interdisciplinario de las Ciencias,
Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia.
E-mail: amendoza@uniquindio.edu.co*

La UNESCO ha querido rendir un homenaje a la producción intelectual de Albert Einstein declarando el presente año como 'El año mundial de la Física'. De esta manera se pretende destacar significativamente la manera como los trabajos y el pensamiento de Einstein han contribuido a que la física haga del mundo y su entorno un sitio comprensible, con lo cual se pueda lograr y disfrutar de una vida plena y digna. En particular la tesis doctoral de Einstein dio una orientación a la manipulación de moléculas, su caracterización y evaluación desde el mundo macroscópico, siendo tal vez la base de la moderna nanotecnología.

Sin temor a equivocarnos se puede afirmar que la calidad y complejidad del conocimiento que se maneja en la actualidad hace que no se pueda vivir en sociedad sin contacto con la ciencia. A esta exigencia es a la que se debe el título del presente artículo. No solamente usamos a diario instrumentos y objetos resultado de la investigación científica y del desarrollo tecnológico, sino que también nuestras actitudes y creencias se derivan de aspectos conceptuales de la Ciencia. Aun y mucho más importante para el desarrollo de la sociedad es el método mediante el cual se adquiere el conocimiento científico. La verificación experimental, la reducción y la síntesis como elementos del método científico son también extraordinariamente útiles para el análisis de un buen número de problemas sociales y económicos. No ha sido desarrollado un mejor método para la



Figura 1.
Pintura rupestre
de Chiriquete.
(Cortesía de Julio
Betancourt, Director
Herbario del Instituto de
Ciencias Naturales).

adquisición del conocimiento que el que se usa en las Ciencias Naturales. El hecho real de que todos estemos expuestos a conceptos básicos y a la metodología de las ciencias modernas hace que la sociedad no sólo sea sensible a los procesos por los cuales se descubre sino y de manera muy importante, a la forma como se articulan los descubrimientos científicos con las tareas sociales y culturales de una sociedad en particular.

Los nuevos materiales

Desde los inicios de la humanidad, el hombre ha transformado la materia que ofrece la naturaleza, buscando mejorar sus propiedades naturales a partir de la creación de materiales artificiales. Entre los materiales artificiales más antiguos se incluyen el barro cocido en la fabricación de vasijas y la mezcla de diversas arcillas en la preparación de pinturas que han trascendido al paso del tiempo. Nuestro continente es rico en este tipo de vestigios, los cuales son estudiados no sólo desde el punto de vista arqueológico sino a partir de su composición y pro-

piedades fisicoquímicas. En la *figura 1* se presentan dibujos rupestres en el río Caquetá.

Como otro ejemplo de *Materiales Artificiales* fabricados desde la antigüedad, mencionamos la existencia de mezclas de puzolana y cal que utilizaban los etruscos 800 a.C. para la construcción de morteros. Sus importantes propiedades de dureza lo hicieron el material base para el desarrollo e investigación en mezclas calcinadas de arcilla y caliza (1750-1800). En 1824, Aspdin patentó el proceso de preparación del cemento en analogía con la piedra de Portland (Inglaterra). El vocablo “cemento” procede de “caement”, sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras, lo cual es interesante de mencionar aquí, si tenemos en cuenta que ese es el objetivo del desarrollo de nanomateriales.

El estudio de estos materiales artificiales se realiza a partir de la física, la química, la biología y la ingeniería a escala nanoscópica (magnitudes del orden de una millonésima de milímetro), pues su comportamiento aún no ha sido comprendido en todos sus

El estudio de estos materiales artificiales se realiza a partir de la física, la química, la biología y la ingeniería a escala nanoscópica.

aspectos, y es en la actualidad una importante rama de investigación y desarrollo tecnológico conocida como Ciencia de los Nanomateriales. Es de notar que en este punto del desarrollo de la ciencia, el trabajo debe ser interdisciplinario. Como ejemplo de ello, mencionaremos que dos temas de gran interés son la conexión de la nanotecnología con la química supramolecular y con la biología, así como la interacción de nuevos materiales con los sistemas biológicos en la medicina y en la

búsqueda de soluciones energéticas.

El desarrollo tecnológico de la última centuria se fundamenta en la fabricación de dispositivos fundamentales en el campo de la electrónica. Estos dispositivos se basan a su vez en nanomateriales con propiedades que han sido estudiadas desde la física fundamental. A continuación nos limitaremos a mencionar la que se constituye como una de estas líneas de la Ciencia de los Nanomateriales de más rápido desarrollo en el mundo.

Las nanopartículas

Las nanopartículas son estructuras de materia de dimensiones superiores a las moléculas. A corto



Figura 2. Mural Maya en la ciudad de Cacaxtla, estado Mexicano de Tlaxcala, el cual indica la permanencia del pigmento azul.

plazo son una de las aplicaciones más directas de la nanotecnología, si se considera que en la actualidad ya están disponibles en el mercado. Las nanopartículas tienen propiedades muy particulares y las leyes físicas por las que se rigen están actualmente en estudio pues no han sido descritas en su totalidad ni por la cuántica ni por la física clásica. Aunque el estudio de las nanopartículas es de muy reciente data, es interesante resaltar que las nanopartículas han sido fabricadas por el hombre desde tiempos inmemoriales.

El color "azul maya" encontrado en los murales de esta cultura, es un excelente ejemplo de un material increíblemente parecido a los nuevos materiales con estructuras nanométricas. Se trata de un pigmento fabricado a base de diferentes arcillas, fundamentalmente arcilla tipo paligorskita mezclada con pequeñas cantidades de sepiolita y montmorillonita (figura 2). Estas arcillas son polvos blancos que se tinturan con índigo natural orgánico (procedente según Torres, de una planta llamada xiuquilit). A diferencia del pigmento sintetizado por Van Olphen

índigo artificial, el azul maya es resistente a medios ácidos y a la biocorrosión, permaneciendo a

lo largo del tiempo. Un estudio para entender esta permanencia, fue realizado por Yacamán y su grupo a través de microscopía electrónica de barrido, y difracción de rayos X (figura 3). Como resultado de esta investigación se encontró, que el "azul maya" posee una estructura muy particular llamada superred. En ella, capas del espesor de unas cuantas moléculas cristalinas de

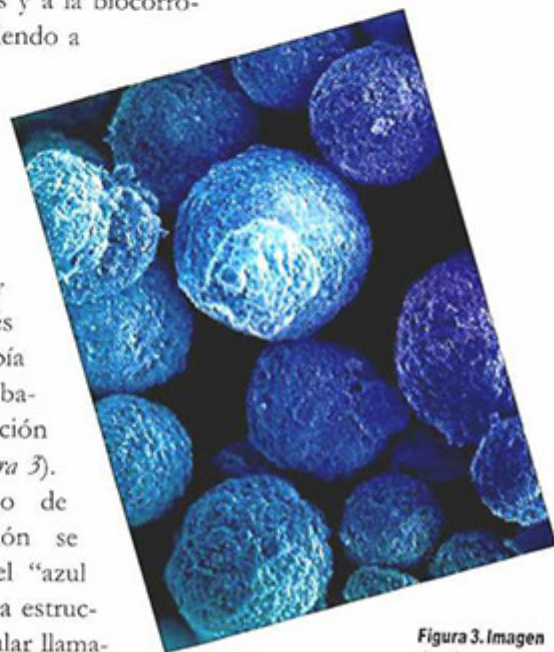


Figura 3. Imagen de microscopía electrónica de micropartículas de azul maya.

En relación con los nuevos materiales, las nanopartículas se constituyen en la mayor fuente de nuevos materiales con efectos directos sobre la economía.



Figura 4. Copa Lycurgus. Imagen del Museo Británico de Londres. La imagen izquierda es el resultado de la iluminación con luz blanca desde el interior de la copa. La imagen derecha ha sido obtenida iluminando con luz blanca la copa desde el exterior.

de un sólido amorfo que contiene partículas de dimensiones nanométricas y están formadas por Fe, Cr, Mn, Ti y V. Estas nanopartículas tienen forma, orientación y estructura cristalina bien definidas. Este tipo de ordenamiento periódico a escala nanométrica da nuevas propiedades a estos materiales, diferentes a las propias de su composición. A pesar de que estas nanopartículas metálicas se encuentran en pequeñas concentraciones (del orden de 0.005% - 0.01%) en el pigmento empleado por los mayas, influyen de manera significativa sus propiedades.

Gran cantidad de aplicaciones de las nanopartículas están dirigidas a la industria de la descontaminación del aire y el agua.

En este caso dan un color azul al pigmento, y permiten su estabilidad y permanencia por más de 15 siglos.

Además de la composición de las nanopartículas, son importantes su tamaño y forma. Un ejemplo del efecto del tamaño de las nanopartículas es su dependencia con la dispersión de la luz. Faraday en 1857 realizó un estudio sobre cómo a través de coloides de oro, la luz cambiaba de azul a verde amarillo. Sin saber su explicación, los romanos

conocían este efecto y utilizaron técnicas de inclusión de oro en silicio en la fabricación de vasijas. Hoy en día se conserva la copa romana que representa al mítico rey Lycurgus, la cual posee la propiedad de cambiar de color si es iluminada desde adentro (roja) o desde afuera (verde). Podría decirse que allí se inicia lo que hoy conocemos como nano-óptica (figura 4).

Física y economía

En relación con los nuevos materiales, las nanopartículas se constituyen en la mayor fuente de nuevos materiales con efectos directos sobre la economía. Sus aplicaciones abarcan desde electrónica, medicina, farmacéutica, medio ambiente, biotecnología, agricultura, computación y tecnología de la información hasta la búsqueda de soluciones energéticas en sustitución de los hidrocarburos. Como ejemplo podemos mencionar las nanopartículas de hierro, las cuales por sus dimensiones pueden penetrar las paredes de células cancerígenas (figura 5). De igual manera las partículas de plata están siendo utilizadas con grandes resultados en estudios contra el virus del VIH *in vitro*.

Incluso aplicaciones cotidianas se han lanzado al mercado como los textiles con nanopartículas con propiedades antimanchas, con efectos directos en la producción de detergentes y la reducción de contaminación de las aguas. En general, gran cantidad de aplicaciones de las nanopartículas están dirigidas a la industria de la descontaminación del aire y el agua. Las nanopartículas, por ejemplo, funcionan como absorbentes de metales pesados como el plomo y el mercurio en el agua, y mediante procesos químicos son recuperados para su reutilización. La estructura de estos nanocompuestos llamados mesoporosos se caracteriza por el autoordenamiento hexagonal cerrado como el presentado en la *figura 6*.

Nanocompuestos plásticos también están siendo utilizados por la industria automotriz para mejorar la dureza y la resistencia a los rayones en la carrocería de los automóviles, haciéndolos además más livianos, lo que mejora su fuerza y economiza combustible. La reducción en peso de las piezas es del 60% y las hace dos veces más resistentes a abolladuras y rayones.

En general, nanocristales de varios metales han demostrado ser entre 100% y 300% más duros que los mismos materiales a escala macroscópica. Como la resistencia al desgaste está definida a menudo por la dureza de un metal, las piezas que contienen nanocristales tienen mayor durabilidad que las piezas convencionales.

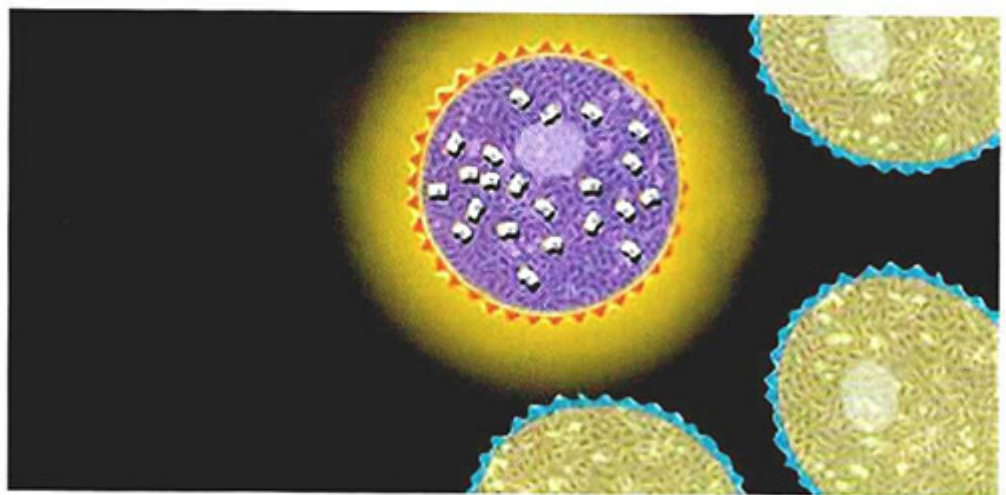
Así como lo hace la ciencia, toda actividad humana se enmarca en la más importante tarea del hombre, es decir, la conservación de la especie. En búsqueda de este objetivo la humanidad ha creado la economía y ésta a su vez ha generado los espacios culturales los cuales muestran diferentes grados de

Campos aparentemente lejanos de la física como la genética utilizan para el estudio de los genes la microscopía electrónica y atómica, cuya realización sólo fue posible gracias al desarrollo de la física atómica.

mes aportes al desarrollo tanto de la economía como de la cultura. Sociedades de poco desarrollo cultural poseen también una economía poco desarrollada, lo cual implica, aunque de manera indirecta, que el nivel y la calidad de la producción industrial dependen del desarrollo cultural. No es casual que se hable en este momento de la era de la informática o en el remoto pasado de la edad del bronce. Al no existir una clara separación entre economía y cultura, estas más bien forman un todo en el desarrollo de la humanidad.

El significado de la física para la economía es claro. La producción de semiconductores se fundamenta en la física del estado sólido. Los satélites para comunicaciones y estudios del clima, que orbitan alrededor de la tierra, exigen por lo menos algunos conocimientos sobre gravitación. La comuni-

Figura 5. Representación esquemática de la interacción de nanopartículas con células cancerosas.



cación con el satélite exige un conocimiento sobre las ondas electromagnéticas y su interacción con la atmósfera. Campos aparentemente lejanos de la física como la genética utilizan para el estudio de los genes la microscopía electrónica y atómica, cuya realización sólo fue posible gracias al desarrollo de

dos de producción energética no serían posibles sin la física nuclear y la física del plasma.

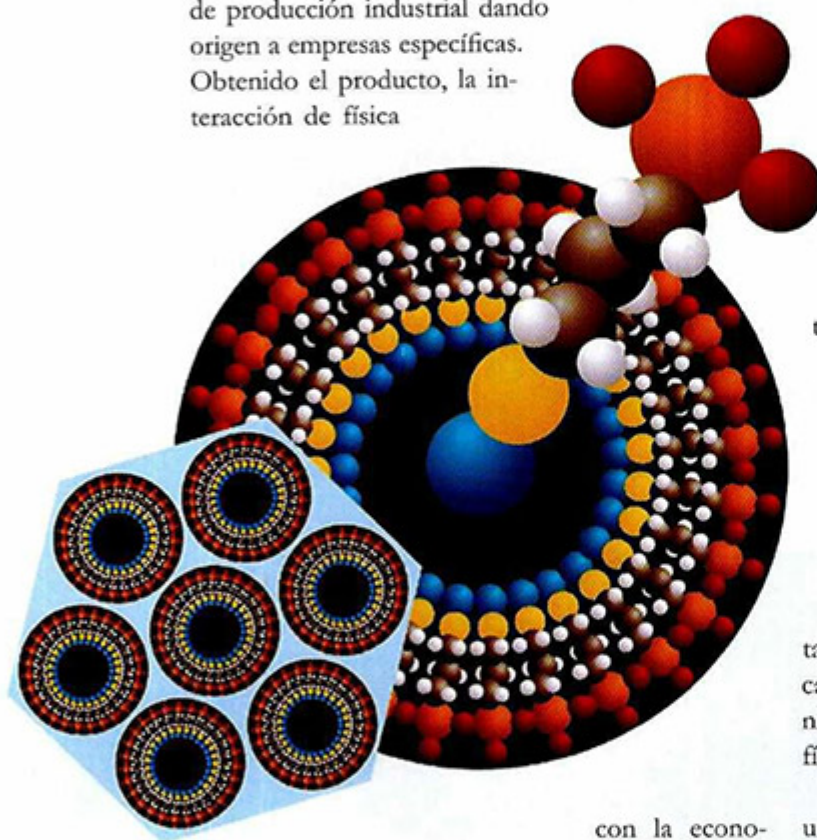
Si no se lograra un bienestar social que es lo que se pretende con la economía, no existiría la financiación de la investigación y por ende los grandes centros de investigación de la física. Ella interviene en la economía fundamentalmente con ideas nuevas; el que una idea sea relevante económicamente sólo se sabe cuando una vez establecida científicamente, sea incorporada de manera planificada al proceso de producción industrial dando origen a empresas específicas. Obtenido el producto, la interacción de física

da entre las personas que suelen preguntar para qué sirve la física. A la sociedad de físicos e investigadores en general nos preocupa además de la pregunta anterior, lo que debe ser bueno para la física en nuestro medio, dejando de lado todo lo relacionado con la infraestructura, la financiación de postgrados y los grupos de investigación. A la física en nuestro medio le sería muy útil la permanente discusión pública en todos los estamentos de la sociedad sobre ciencia y tecnología, por dos razones: En primer lugar, la discusión pública fortalece nuestro espacio técnico-cultural de manera autónoma con base en el talento y la creatividad nacional y en segundo lugar, ayudaría a construir la voluntad política necesaria para que la financiación de la investigación se garantice a largo plazo.

Un ejemplo extremo pero muy ilustrativo cuando comparamos nuestro desarrollo tecnológico con el de países desarrollados consiste en recordar que este año se celebra el centenario de los trabajos de Einstein. Son más de 100 años de una política de inversión en ciencia, de esos países, que hoy se ve claramente reflejada en desarrollo y avance científico. En nuestro país hay grupos de investigación que orientan sus trabajos en el estudio de nanomateriales, tanto desde el punto de vista experimental como teórico, aportando al conocimiento universal de los materiales, capacitando y formando recursos humanos de alto nivel y creando escuelas de pensamiento desde la física, la química o la biología.

Algunos de estos grupos de investigación han unificado sus esfuerzos en el estudio de nanomateriales alrededor de un plan estratégico de desarrollo nacional, llamado Centro de Excelencia en Nuevos materiales (CENM). Este centro liderado por el físico Pedro Prieto de la Universidad del Valle, reúne prestigiosos grupos de investigación de 10 universidades del país: la Universidad del Valle, la Universidad Industrial de Santander, la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad del Quindío, la Universidad de Antioquia, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Cauca, la Fundación Universidad del Norte, la Universidad del Tolima y la Universidad Autónoma de Occidente. Adicionalmente, dicho centro recibirá el apoyo internacional de renombrados institutos mundiales de investigación de materiales, como son: el Cen-

Figura 6.
Ordenamiento hexagonal de las nanopartículas autoensambladas.



con la economía se puede considerar como terminada. La relación física-economía no sucede de manera directa. La creación de nuevas ideas no es una actividad que se pueda planificar. Las nuevas ideas surgen fundamentalmente de los individuos y de la misma manera como una empresa considera inoportuna la materialización económica de una idea, la motivación hacia la creación de nuevas ideas no puede estar subordinada sólo a la utilidad económica que estas puedan generar a una empresa que aparecerá en el futuro. De esta manera el mundo de las nuevas ideas y la creatividad e innovación son necesariamente el soporte cultural de la física.

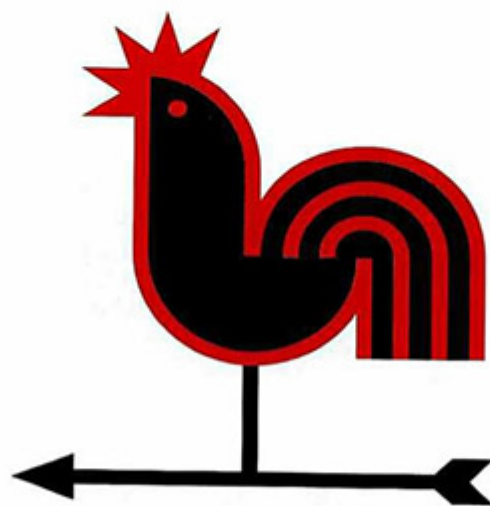
En este aparte hemos indicado además algunas

tro de Nanotecnología de la Universidad de North Western en Chicago, Illinois; el Grupo de Nanotecnología y Películas Delgadas de la Universidad de California en San Diego; el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Michigan en Ann Arbor y el Centro Internacional para Investigación Interdisciplinaria en Materiales, CIMAT, en Santiago de Chile.

La necesidad de enfrentar estos problemas de frontera requiere la disponibilidad de todas las técnicas modernas de caracterización, lo cual se puede lograr a través de la integración de gran número de instituciones en un objetivo común, en este caso, el desarrollo de nanomateriales. En estos laboratorios se continúa el desarrollo de nanocompuestos para aplicaciones industriales, recubrimientos duros, estudio de estructuras de multicapas, superredes semiconductoras, superconductoras y magnéticas, pozos y puntos cuánticos, y de dispositivos optoelectrónicos.

Referencias

1. Urbina-Rangel, F: *Mitos y petroglifos en el río Coquetá*. Boletín del Museo del Oro, No 30, 1991.
2. Yakamán MJ, Rendón L, Arenas J, Serra Puche MC: *Maya Blue Paint An ancient Nanostructured Material Science*. 273: 223-225, 1996.
3. Hubbard B, Kwang W, Moser A, Facey G.A, Detellier C: *Structural study of maya blue: textural, thermal and solid-state multinuclear magnetic resonance characterization of the palygorskite-indigo and sepiolite-indigo adducts*, *Clays and Clay Minerals*; 51:No. 3, 318-326, 2003.
4. Torres L: *Materials issues in art and archeology*. E. Sayze, P. Vandiver, J. Druzik, C. Stevenson, Eds. (MRS Symposium Proc. 123, Material Research Society, Pittsburg, 123-128, 1968.
5. Faraday M: *Experimental relations of gold (and other met- Als) to light*". *Philos. Trans. R. Soc. London* 147: 145-181, 1857.
6. Schlapbach L, y Zuttel A: *Hydrogen-Storage Materials for Mobile applications*, *Nature* 414: 353, 2001.
7. Osseo-Asare K: *Microemulsion mediated synthesis of nanosize oxide materials*. In Kumar P., Mittal K.L. (eds) *Handbook of Microemulsion Science and Technology*. Marcel Dekker, New York: 549-603, 1999.
8. Barbé C, Bartlett J, Kong L: *Silica particles: a novel drug delivery system*. *Advanced Materials*. 16- 1959, 2004.



EL MUNDO EN BOGOTÁ
89.9 F.M. ESTEREO


Desde 1950 una emisora para la inmensa minoría

La óptica experimental

Jáder Guerrero Bermúdez, María del Carmen Lasprilla Álvarez, Arturo Plata Gómez, Jaime Meneses Fonseca y Yezid Torres Moreno.

*Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales,
Escuela de Física,
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga-Santander, Colombia.*

“En marzo volvieron los gitanos. Esta vez llevaban un catalejo y una lupa del tamaño de un tambor... Sentaron una gitana en un extremo de la aldea e instalaron el catalejo a la entrada de la carpa. Mediante el pago de cinco reales, la gente se asomaba al catalejo y veía a la gitana al alcance de su mano. La ciencia ha eliminado las distancias - pregonaba Melquíades”.



Hacia la óptica del siglo XX

Desde el principio la luz ha desempeñado un papel fundamental en la dinámica del Universo. En sentido amplio, luz es toda forma de radiación electromagnética, lo cual incluye los rayos gamma (γ), los rayos X y las ondas de radio; sin embargo, estrictamente hablando, el término luz designa la radiación electromagnética correspondiente a la parte de la radiación ultravioleta próxima a la región visible del espectro, la luz visible y la radiación infrarroja cercana a la visible. En ambas acepciones encontramos un vasto escenario para verificar el papel protagónico de la interacción de la radiación y la materia en la evolución cósmica y en particular en la formación de la vida.

Inicialmente el estudio de la luz estuvo estrechamente relacionado con la visión, la capacidad del hombre, aunque no exclusiva, de impresionarse de manera directa y relativamente pronta con su entorno mediante la formación de imágenes en su cerebro. La tradición en la Grecia antigua presenta para explicar el mecanismo de la visión dos modelos encontrados y centrados alrededor del problema emisor-receptor. El primero atribuye a los objetos extensiones a modo de tentáculos que en el contacto con los ojos de los seres humanos le permiten a un individuo tener la noción de la forma de los objetos; el segundo propone que de los ojos emergen rayos que “palpan los objetos” dando cuenta de su forma. Ambos resultan inexactos para los argumentos actuales, pero igualmente prematuros para su época. En estos modelos se encontró el germen para la noción de rayos y la posibilidad de incorporar la geometría para la descripción de la trayectoria de la luz.

El impulso medieval dado a la fisiología de la visión, la descripción formal de las leyes de la reflexión y la refracción de la luz y la aplicación de los mismos, llegaría de la cultura árabe. Sobresale el trabajo de Ibn al-Haitham (965-1038), conocido en Occidente como al-Hazen, el erudito iraquí que se adelantaría cerca de seis siglos a la óptica del renacimiento europeo. Es entonces en la cultura islámica donde por primera vez se adquiere claridad en la explicación del mecanismo de la visión y se separa de la óptica, que inicialmente tendría como objeto de estudio la trayectoria de los “rayos luminosos” en el diseño de los instrumentos ópticos.

El hombre del renacimiento europeo incorporaría el método científico, consolidaría la óptica como disciplina de estudio derivada de las ciencias físicas y organizaría el potencial de sus aplicaciones en la exploración de lo infinitamente grande, lo infinitamente pequeño y la satisfacción

ejemplos, la astronomía recibiría el tributo del telescopio, el instrumento pionero en la exploración del universo. Una contribución no menos importante sería dada a la biología con la lupa y el microscopio. La óptica como disciplina científica tendría ahora un puente entre su descripción teórica y sus aplicaciones; ese puente es la óptica experimental, es decir, la posibilidad de reproducir los fenómenos ópticos en condiciones controladas.

En sus inicios aparecieron notables representantes de la óptica, tanto en el componente teórico como en el experimental. Entre ellos ocuparon puestos destacados René Descartes (1596-1650), Christian Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727). Newton fue un excelente óptico experimental, trabajó sobre casi todos los fenómenos ópticos de su época que pudieran ser efectuados en condiciones controladas. Se le atribuye a él, el primer reporte sobre la dispersión de la luz por un prisma, la generación del color blanco a partir de la rotación de círculos coloreados, la observación prematura del efecto túnel óptico y la generación de los anillos de interferencia con luz blanca. Pero el estudio de la luz acusaba tener claridad no sólo sobre los fenómenos ópticos sino también sobre la naturaleza misma de la luz, y en esto Newton tenía parcialmente la razón.

El problema de la naturaleza de la luz fue durante mucho tiempo una competencia de pulso entre la autoridad científica de Newton y la celebridad de Huygens. El primero proponía un modelo corpuscular, en el cual la luz se comporta con todas las propiedades mecánicas de un flujo de partículas. Por su parte, Huygens proponía un modelo ondulatorio, que veía en la luz un fenómeno similar al sonido. Ambos modelos podían explicar la reflexión y la refracción de la luz, conocidos ya desde la antigüedad; pero el modelo corpuscular se imponería por un buen tiempo. La controversia sobreviviría a sus protagonistas; la aparición de nuevos fenómenos, algunos de ellos reportados a partir de observaciones fortuitas y otros bajo el rigor del protocolo experimental, provocarían la crisis del modelo newtoniano. La interferencia de la luz visible, que el mismo Newton había reportado, daría los primeros argumentos para elevar el nivel de consideración a favor de una teoría ondulatoria de la luz. La crisis del modelo corpuscular sería mayor al tratar de explicar la difracción, la polarización y la dispersión.

El modelo ondulatorio de la luz, para el hombre moderno, requería establecer un medio de propagación. Por mucho tiempo ese medio hipotético, con propiedades mecánicas exóticas existió en los modelos teóricos, era el éter y su inexistencia favoreció a la ciencia en Occidente. La naturaleza de las ondas luminosas no tenía parecido alguno con las ondas sonoras. En el trabajo experimental de Heinrich

Hertz (1857-1894) y el teórico de James C. Maxwell (1831-1879) se encontraría el argumento correcto: la luz es una onda, una onda electromagnética. La óptica que se consideraba hasta entonces como una disciplina aislada, quedaba ahora unida y regida por las mismas leyes del electromagnetismo.

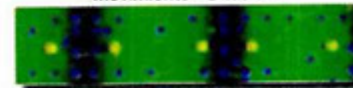
La crisis del modelo ondulatorio de la luz llegaría por su incapacidad de explicar nuevos fenómenos asociados con la interacción de la luz con la materia; la explicación de los espectros de emisión de los cuerpos incandescentes, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton requería retomar argumentos más relacionados con un comportamiento corpuscular que con el comportamiento ondulatorio, surgiendo así la idea del quantum de luz. En el año maravilloso y milagroso de la física, 1905, Albert Einstein (1879-1955) propondría una apropiada y novedosa explicación del efecto fotoeléctrico y un argumento a favor de la luz formada por corpúsculos, con lo que la luz mostraba entonces su naturaleza dual. Para el hombre contemporáneo, de principios del siglo XX, la controversia sobre la naturaleza de la luz había llegado a su fin en ese momento y por lo menos hasta nuestros días.

La consolidación de la teoría electromagnética como componente fundamental de la física, permitió a la óptica teórica alcanzar una pronta madurez para la correcta explicación de los fenómenos ópticos conocidos. La evolución de la mecánica cuántica y la mecánica estadística, llevaría a la predicción de procesos que deberían esperar más de medio siglo para su verificación experimental y pos-

Iluminación no uniforme - Foto-ionización



Movimiento - Difusión



Entrapamiento de electrones



Campo de carga espacial



Red de índices de refracción



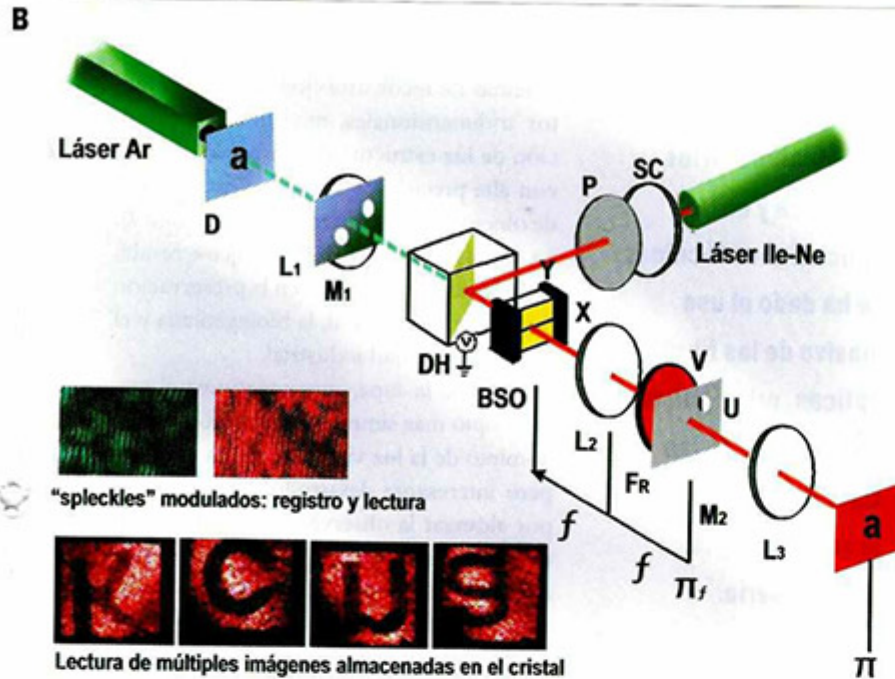


Figura 1. Registro de hologramas en un cristal, fotorrefractivo. En (a) cuando dos ondas planas interfieren dentro del cristal ellos dan origen a una distribución de intensidad de forma sinusoidal. Esta distribución crea fotoconductores en la banda de conducción y con un campo eléctrico aplicado ellos se mueven libremente dentro del cristal. En aquellas áreas donde hay oscuridad los centros aceptores los atrapan y se obtiene un campo de carga espacial periódico. El efecto electro-óptico lineal modula entonces el índice de refracción y así se crea un holograma de fase-volumen. En (b) se muestra el esquema experimental de la técnica de multiplexado en un cristal BSO basada en la modulación de los granos de speckle; se utiliza un láser de Ar (verde) para el registro. La lente que forma la imagen posee una pupila con doble apertura circular. En este caso, la distribución de intensidad registrada en el cristal conduce a un campo de carga espacial el cual produce una modulación del índice de refracción. El espectro de la imagen generada en el cristal se expresa en términos de la función de autocorrelación de la pupila. La orientación de las aperturas de la pupila brinda un parámetro para efectuar almacenamiento. El tamaño, forma y separación de aquellas determinan la estructura de la distribución de speckle que recibe el cristal y por lo tanto controlan la capacidad de registro múltiple. Las imágenes almacenadas se leen con un láser de He-Ne (rojo).

teriormente un poco menos para tomar parte de la física aplicada. La predicción del efecto láser (del inglés: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) esperó por lo menos cuatro décadas para materializarse en un laboratorio y en menos de un lustro se convirtió en toda una promesa para la física aplicada. El láser llegaría a ser una fuente de radiación con una alta monocromaticidad, direccionalidad e intensidad, propiedades que lo harían una fuente especial e imprescindible en muchas experiencias ópticas del futuro.

La óptica experimental actual

Las últimas décadas han sido cruciales para la óptica, que no presenta fronteras claras con otras disciplinas de la ciencia y la ingeniería, verbigracia: la fotónica, la optoelectrónica y el tratamiento de imágenes. La incorporación del formalismo del tratamiento de señales y la disponibilidad de elementos tecnológicos cada vez más elaborados, como las fuentes de radiación, los medios de transmisión y los dispositivos de registros, han impulsado sin precedentes las contribuciones de la óptica en el ámbito técnico y científico.

El tratamiento de la luz como una señal con propiedades espacio-temporales ha permitido registrar y procesar en paralelo grandes volúmenes de información y a una alta velocidad. De hecho, la holografía y la óptica difractiva se ofrecen como

herramientas para un fiel registro de la información portada en un frente de onda. Los hologramas son cada vez de mayor uso en mecanismos de seguridad, reconocimiento de patrones y almacenamiento masivo de información. El empleo de moduladores espaciales de luz, basados en tecnologías de cristal líquido y en cristales fotorrefractivos ha permitido a las técnicas holográficas el registro y la reconstrucción de hologramas en tiempo real. Al mismo tiempo, las técnicas de multiplexado han aumentado la cantidad de información que puede ser almacenada. El efecto fotorrefractivo es un fenómeno no lineal que se presenta en ciertos cristales y otros materiales que responden a la luz alterando su índice de refracción (figura 1). Este efecto suele usarse para almacenar temporalmente hologramas borrables y resulta útil en el almacenamiento de datos. La óptica difractiva, por su parte, encuentra en el disco compacto el medio de registro más económico para el almacenamiento digital de datos (figura 2).

Paralelo al crecimiento del empleo del láser en los laboratorios de óptica y en las aplicaciones técnicas, se ha dado el uso masivo de las fibras ópticas, principalmente en el campo de las telecomu-

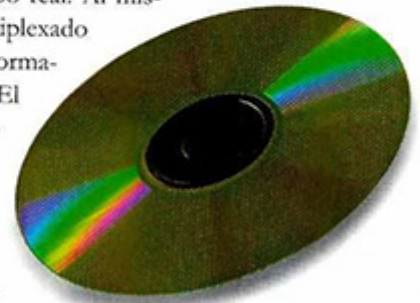


Figura 2. Actualmente el disco óptico compacto o simplemente CD, constituye uno de los medios de almacenamiento de información más económico y versátil.



Figura 3. Las fibras ópticas se han convertido en el medio más empleado para conducir información mediante la luz visible y la radiación infrarroja.

nicaciones, la sensorica y la bioingeniería. Las fibras ópticas son guías para vehicular la luz y su alta inmunidad electromagnética, relativo bajo costo, peso ligero, pequeño espesor y un extenso ancho de banda, permiten canalizar una enorme cantidad de información y llevan la ventaja en la transmisión de datos, voz e imágenes en los sistemas de telecomunicación actuales (figura 3). Además, cuentan con un vasto escenario de materias primas, los cristales fotónicos y los inexplorados fenómenos lineales y no lineales que pueden ser observados en ellos.

Otro campo de intensa actividad experimental es la metrología óptica, que utiliza las propiedades de la luz coherente e incoherente para medir todo tipo de variables físicas. Particularmente los



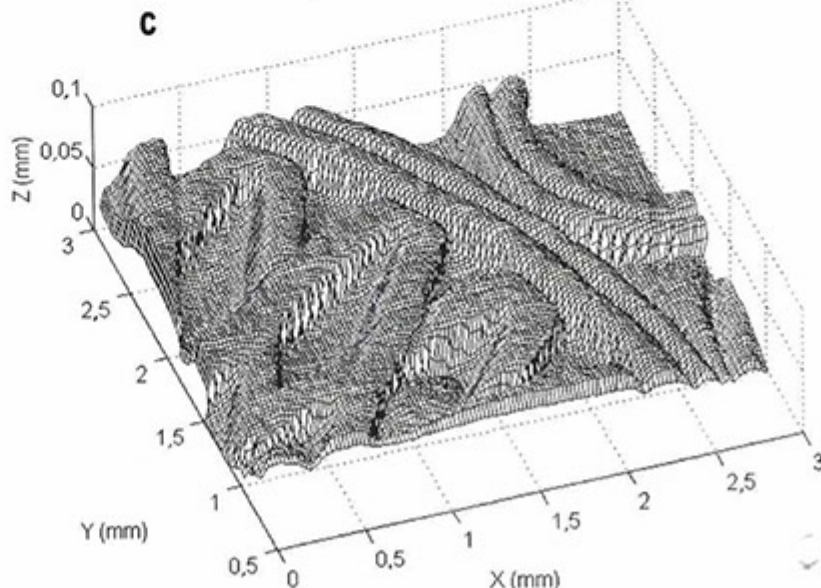
Paralelo al crecimiento del empleo del láser en los laboratorios de óptica y en las aplicaciones técnicas, se ha dado el uso masivo de las fibras ópticas, principalmente en el campo de las telecomunicaciones, la sensorica y la bioingeniería.

Figura 4. Los sistemas de triangulación con línea láser constituyen una herramienta para la reconstrucción digital de microtopografías. En (A) el recuadro negro indica la región con topografía reconstruida digitalmente. En (B) se muestra un gráfico de la reconstrucción tridimensional y en (C) se codifica la misma topografía reconstruida en niveles de gris.

sistemas de reconstrucción digital de objetos tridimensionales, mediante la proyección de luz estructurada, permiten obtener con alta precisión y velocidad, topografías de objetos micro y macroscópicos (figura 4). La reconstrucción digital de objetos resulta un área de interés mayor en la preservación de la herencia cultural, la bioingeniería y el control de calidad industrial.

Desde la lupa, que constituye el microscopio más simple, la microscopía en el dominio de la luz visible presenta un lento pero interesante desarrollo. En su carrera por alcanzar la observación de estructuras cada vez más pequeñas, logró tan sólo dos décadas atrás superar el límite de resolución lateral impuesto por la difracción para la luz que se propaga. Debido a la difracción, la imagen de dos puntos adyacentes, con una distancia entre ellos menor que la mitad de la longitud de onda con que se iluminan, no puede ser separada. El problema se resuelve con las técnicas de microscopía con sonda local en el campo cercano, ubicando un sensor en las proximidades de la muestra y recuperando la información topográfica y espectral en el campo luminoso que no se propaga y por consiguiente no se encuentra limitado por la difracción. El sensor de esta clase de microscopios permite observar dos puntos por debajo de la mi-

Reconstrucción 3D Moneda \$1000



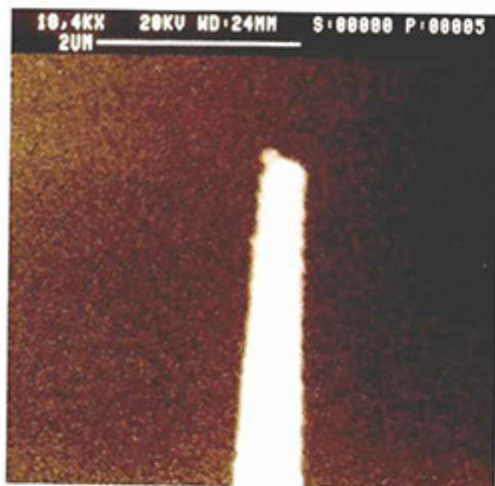


Figura 5. La microscopía a sonda local en el campo cercano permite la observación, con luz visible, de estructuras con periodos espaciales cercanos a los 10 [nm]. Un sensor para un microscopio de barrido en campo cercano, como el que aparece en la figura, se fabrica a partir del estiramiento de una fibra óptica fundida seguido de una inmersión en ácido.

tad de la longitud de onda utilizada. En la práctica, el límite de resolución en este tipo de microscopía lo impone el tamaño de la sonda (figura 5).

No sólo es la resolución lo que hace interesante la microscopía óptica. Su potencial comprende, entre otros aspectos, la posibilidad del estudio *in situ*, la manipulación de especímenes biológicos vivos y la

posibilidad de realizar caracterizaciones espectrales en el dominio visible.

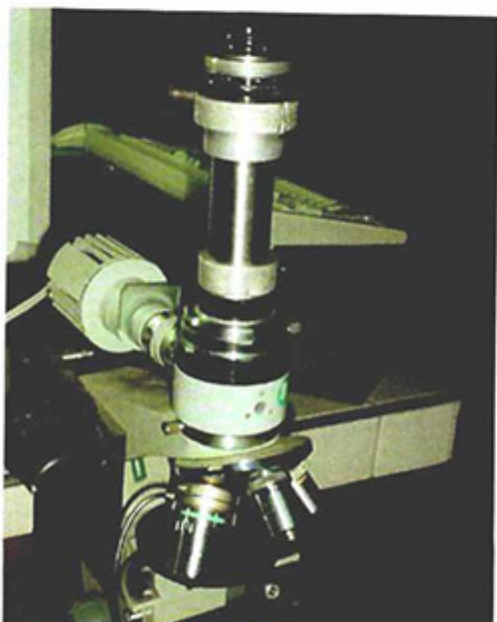
Además de la microscopía con sonda local, existen numerosas técnicas que obtienen información en paralelo de gran cantidad de puntos de la superficie observada y con una alta resolución. La microscopía interferométrica, por ejemplo, emplea interferómetros acoplados a los objetivos de microscopios, permitiendo la obtención de patrones de interferencia que codifican las topografías de dimensiones nanométricas. Cuando la iluminación es con una fuente de amplio espectro, la localización de máximos de interferencia proporciona sin ambigüedad y con una alta resolución axial las dimensiones de la superficie de la muestra.

¿Y el futuro?

Naturalmente se espera que la ola creciente de las contribuciones de la óptica y en particular de la óptica experimental al mundo de la ciencia y de la tecnología no se detenga. El procesamiento híbrido óptico-digital ha mostrado ser una tendencia sólida en el mundo de la informática y de las telecomunicaciones. En exploración de nuevos materiales y en el descubrimiento de nuevos fenómenos no se divisan límites en el futuro cercano.



Figura 6. En (A) un interferograma con luz blanca obtenido mediante objetivos de microscopio tipo Mireau mostrados en (B).



Referencias:

- Malacara D.: *Óptica tradicional y moderna, Segunda edición, Fondo de cultura económica, México D.F., 126 P. 1997.*
- Cetto A.: *La luz, segunda edición, fondo de cultura económica, México D.F., 132 P. 2000.*
- Saleh, B. y Teich, M.: *Fundamentals of photonics, John Wiley & sons, Inc. New York, 966 P. 1991.*
- Pérez, J. P.: *Optique, fondements et applications. Avec 220 exercices et problèmes résolus,*

Caos y complejidad

Caos y Complejidad

**Historia
y aplicaciones**

Diógenes Campos Romero

*Profesor Titular,
Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia;
Miembro de Número,
Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales,
Bogotá, D.C., Colombia.
E-mail: dcanposr@unal.edu.co*

El físico Heinz R. Pagels (1939-1988) quien fue Director Ejecutivo de la Academia de Ciencias de Nueva York, escribió en su libro "The Dreams of Reason": "Estoy convencido que las naciones y la gente que dominen la nueva ciencia de la complejidad llegarán a ser superpotencias económicas, culturales y políticas del nuevo siglo". En términos similares se pronunció Stephen Hawking, uno de los físicos más destacados del presente, en una conferencia en el Instituto Santa Fe en el año 2000, que tituló: "Pienso que el próximo siglo será el siglo de la complejidad".

Estas visiones del futuro, formuladas por personajes de la ciencia, motivan la escritura de información divulgativa sobre la teoría del caos, teoría que se proyecta hacia un universo de nuevos conceptos y aplicaciones: ciencia no lineal, procesos deterministas y aleatorios, ciencia de la complejidad, vida artificial, sistemas emergentes, entre muchos otros. Sin embargo, para evitar la deserción temprana del lector, en este trabajo sólo se presentan elementos históricos, se describen conceptos básicos y se ilustra la teoría con aplicaciones en unas pocas disciplinas.

Para ubicar el trabajo en un contexto apropiado, es de anotar que en las últimas décadas la ciencia clásica, que se fundamenta en las disciplinas científicas tradicionales, ha ampliado de manera radical su perspectiva tradicional con base en nuevos elementos que provienen de la ciencia del caos y la complejidad. Una comparación sucinta nos lleva a los siguientes enunciados:

1. La ciencia clásica, que predominó en los siglos XIX y XX, y aún hoy en día en los inicios del siglo XXI, se orienta por una visión mecanicista y reduccionista de la naturaleza. Cada sistema (físico, biológico, económico, etc.) se descompone en partes con la idea de que cada una de ellas es más simple y fácil de entender si se estudian por separado sus propiedades y su comportamiento. Este enfoque metodológico, que ha tenido gran éxito en

lidad de diversidad de disciplinas científicas. La ciencia clásica hace énfasis en el estudio de los comportamientos estables, de situaciones de equilibrio, de fenómenos lineales, en el principio de superposición y en el carácter reproducible de los fenómenos. El mecanismo de un reloj y el movimiento de la tierra alrededor del sol son ejemplos clásicos.

2. La ciencia del caos y la complejidad, que carece aún de una definición simple y universal, pero que es una área del conocimiento que está en un rápido proceso de evolución, la entendemos como la ciencia dedicada al estudio de los sistemas complejos. Un sistema de esta naturaleza es aquel que está compuesto por gran número de partes o elementos que interactúan de manera no lineal y entre los cuales existen fuertes interdependencias. El carácter no lineal de las interacciones conlleva a que el caos, es decir, el comportamiento caótico, sea un ingrediente fundamental de los sistemas complejos. Pero en este punto, cabe anotar que el caos aparece aún en sistemas de pocos grados de libertad, como es el caso de un péndulo extensible: una masa colocada en el extremo de un resorte, en presencia de un campo gravitacional como el de la tierra. Por otro lado, la fuerte interdependencia entre las partes de un sistema complejo es el origen de ricas y variadas características: estructuras fractales, comportamientos dinámicos complejos, complejidad espacial, complejidad espacio-temporal, estructuras disipativas, procesos de auto-organización, complejidad organizacional, fenómenos de no equilibrio, entre otros. El cerebro es por excelencia un sistema complejo, pero existen también muchos sistemas biológicos, geofísicos, sociales y económicos que son de esta naturaleza.

Entre la variedad de conceptos anotados, el presente trabajo se centra en lo siguiente: modelos

En las últimas décadas la ciencia clásica, que se fundamenta en las disciplinas científicas tradicionales, ha ampliado de manera radical su perspectiva tradicional con base en nuevos elementos que provienen de la ciencia del caos y la complejidad.

tamiento caótico. Este es el punto de partida para el estudio de sistemas complejos y es un hecho que prácticamente todos los sistemas que conforman el universo tienen una propiedad en común: la de ser sistemas no lineales y presentar, en consecuencia, comportamiento caótico.

La ilusión mecanicista

La palabra caos aparece en contextos religiosos, filosóficos y físicos. Si se consulta el diccionario, caos es “el estado amorfo e indefinido que se suponía anterior a la constitución del cosmos”. En general, desde los tiempos antiguos este término ha sugerido misterio, incertidumbre, complejidad, confusión y desorden. En el presente trabajo, el término caos se usa como un concepto técnico que se define en la matemática y en las ciencias naturales.

Tal como lo enunció von Neumann, la ciencia tiene como uno de sus propósitos el modelamiento del mundo natural. Se trata de comprender el comportamiento de los sistemas físicos, del corazón, del sistema nervioso, de las tormentas, de los ecosistemas, de los temblores de tierra, de la turbulencia y, en general, de los sistemas simples y de los sistemas complejos, mediante la construcción de modelos matemáticos que describan de manera simplificada el sistema objeto de estudio.

Un modelo matemático es una representación esquemática de la realidad que conecta las cantidades fundamentales por medio de leyes que adoptan la forma de ecuaciones matemáticas (ecuaciones algebraicas, diferenciales, parciales, estocásticas, etc.). El modelo produce figuras y números que al ser interpretados generan una descripción cualitativa de la realidad. El concepto científico de caos está asociado de manera directa con ciertos modelos matemáticos con los que se describen procesos dinámicos. Es un concepto riguroso que surge en la matemática y que trae sus consecuencias en el modelamiento matemático del mundo natural.

Isaac Newton (1642-1727), al formular las leyes fundamentales de la dinámica clásica y la ley de gravitación universal, y poder explicar con ellas la

modelamiento matemático de los sistemas mecánicos, es decir, sistemas físicos compuestos por partículas (y/o cuerpos rígidos) que interactúan entre sí. Estos sistemas se modelan mediante el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias, que permiten describir la manera como evolucionan con el tiempo las variables de estado, cómo son las posiciones y las velocidades de las partículas en cada instante de tiempo.

La herramienta que se usa para el estudio cuantitativo de los modelos es el cálculo, herramienta conceptual y operativa que inventaron Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) hace más de tres siglos, casi de manera simultánea. El cálculo usa la notación $y = F(t)$ para indicar que, dado un valor numérico del tiempo t , existe un mecanismo bien definido que permite encontrar el valor numérico de y ; es decir, y está determinado por t de manera única. La idea fundamental del cálculo se basa en la propiedad de suavidad que se le exige a la función $F(t)$, lo que técnicamente describen los matemáticos con conceptos como el de continuidad. Por su lado, las ecuaciones diferenciales ordinarias permiten propagar la información desde un instante de tiempo inicial t_0 hacia tiempos futuros t ($t > t_0$), creando así un mecanismo determinista que permite predecir el futuro con base en el modelo matemático que esté en consideración.

Según lo anterior, la ley de gravitación y el cálculo incrementaron el poder de predicción del hombre y permitieron, en particular, el conocimiento de las órbitas de los planetas. Así, Halley (1656-1742) observó en 1682 el cometa que lleva hoy en día su nombre, calculó su órbita y predijo que regresaría en 1758, lo cual se confirmó y se convirtió así en uno de los primeros grandes éxitos de la teoría de Newton. Un éxito aun más espectacular ocurre en 1845 y 1846 cuando, en trabajos independientes, John Couch Adams (un joven de 24 años) y Urbain Le Verrier predicen la existencia del planeta Neptuno. Éxitos como éstos conllevaron en la ciencia al fortalecimiento de la idea de un universo determinista y predecible, que Pierre Simon Laplace (1749-1827) había enunciado así:

Debemos pues considerar el estado presente del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que debe seguirlo. Una inteligencia que en un instante dado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza y la situación res-

El concepto científico de caos está asociado de manera directa con ciertos modelos matemáticos con los que se describen procesos dinámicos.

parte, fuera suficientemente amplia como para someter esos datos al análisis, abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y la de los átomos más ligeros; nada le sería incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante ella.

En la primera parte del siglo XIX, el determinismo y la predictibilidad estaban fuertemente arraigados en la ciencia y existía la idea colectiva de que el cálculo era el lenguaje natural para la descripción de la naturaleza. Dado un sistema mecánico formado por un conjunto de N partículas con fuerzas de interacción conocidas, y dadas las condiciones iniciales de posición y velocidad, se pensaba que con el uso de las ecuaciones diferenciales y en virtud de la unicidad de su solución, se podía determinar la posición y la velocidad de las partículas para cualquier instante de tiempo. De acuerdo con el clima intelectual de la época se pensaba que el universo era un sistema gigante cuya dinámica se podía resolver completamente: con que alguien tuviera la motivación, la inteligencia y la tenacidad suficientes, tarde o temprano tendría éxito en solucionar el problema de N cuerpos.

El ocaso de dos mitos newtonianos

Damos ahora un salto en la historia para ubicarnos en los años 1885-1886, cuando el Rey Óscar II de Suecia y Noruega abre una convocatoria internacional para saber si el sistema solar es estable o inestable: en particular se estudia un sistema de tres cuerpos considerados como objetos puntuales que se atraen de acuerdo con la ley de gravitación de Newton (por ejemplo, el sistema sol-tierra-luna).

Henri Poincaré (1854-1912) gana la convocatoria en 1889 y publica sus resultados en 1890. Los elementos fundamentales se pueden resumir así:

1. En el sistema objeto de estudio no existe un número suficiente de constantes de movimiento que permitan reducir el problema a uno soluble de menor dimensión. Este resultado contradice la filosofía predominante en la época, según la cual los sistemas mecánicos tienen, en principio, un

En la primera parte del siglo XIX, el determinismo y la predictibilidad estaban fuertemente arraigados en la ciencia y existía la idea colectiva de que el cálculo era el lenguaje natural para la descripción de la naturaleza.

movimiento para permitir la solución de las ecuaciones de movimiento por cuadratura.

2. Poincaré usa con gran eficacia una aproximación geométrica en el espacio de fase: por ejemplo, en lugar de examinar completamente la órbita de un planeta (una partícula), mira las veces que el planeta pasa a través de una superficie perpendicular a la órbita, introduciendo así lo que se conoce hoy en día como *sección de Poincaré*.

3. Bajo ciertas condiciones, el sistema presenta un fenómeno conocido con el nombre de resonancia, el cual da origen a un movimiento inesperado, altamente irregular (caótico, en lenguaje mo-

derno) que se caracteriza por una fuerte sensibilidad a cambios de las condiciones iniciales. Sobre este fenómeno, Poincaré se refiere en 1908 en su trabajo *Ciencia y método*, así:

Una causa muy pequeña, que se nos escapa, determina un efecto considerable que no podemos prever, y entonces decimos que dicho efecto se debe al azar.

En conclusión, gracias a los trabajos de Poincaré, desaparece el mito de Laplace sobre la predictibilidad y el mito de que el determinismo y el azar son fenómenos irreconciliables. Ahora se sabe que:

- La descripción determinista del mundo (leyes de Newton) da lugar de manera natural al azar y que es necesario incorporar en la descripción un tratamiento de carácter probabilístico.

- La sensibilidad a pequeños cambios en las condiciones iniciales hace que la predicción del futuro distante sea imposible en un sistema no lineal, ya que una pequeña modificación de la condición inicial conduce a grandes cambios en la evolución posterior del sistema.

Una revolución científica pospuesta

Los descubrimientos de Poincaré son el fundamento de la teoría moderna de los sistemas dinámicos. Pero estas ideas permanecieron inactivas durante décadas hasta que Andrei Nikolaevich Kolmogorov (1954), Vladimir Igorevich Arnold (1963)

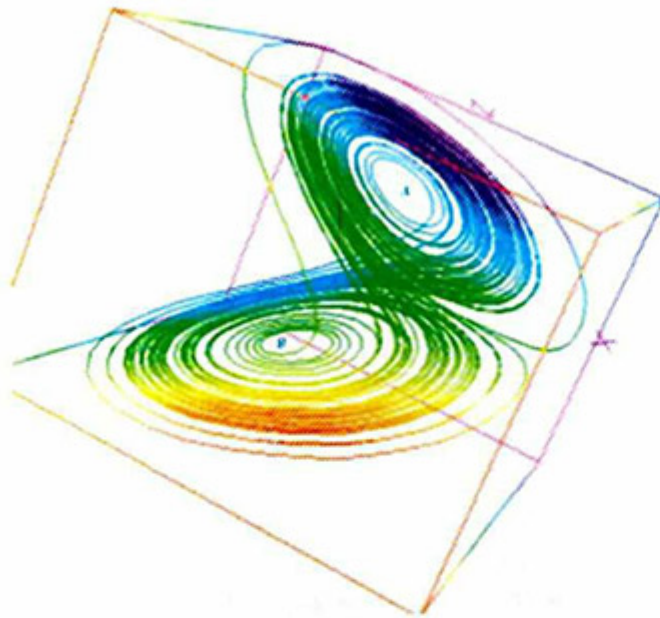


Figura 1: Trayectoria que genera el sistema dinámico de tres ecuaciones diferenciales no lineales que usó E. N. Lorenz. El color indica el tiempo de permanencia en una región del espacio de estados.

tes, hicieron nuevos desarrollos que conllevaron al teorema KAM, pieza fundamental dentro de la investigación moderna de sistemas mecánicos con comportamiento caótico.

En este punto se debe afirmar que los trabajos de Poincaré y el teorema KAM dejan en plena vigencia la mecánica newtoniana, pero cambian de manera radical las implicaciones conceptuales de la misma. Estas implicaciones se extienden además a todas las ciencias que hagan uso de modelamientos dinámicos de carácter no lineal. En efecto, las consecuencias sobre la ingeniería y las ciencias naturales, entre otras, se pueden resumir así:

- Estas ciencias hacen uso de la medición de cantidades observables.
- En general, no existen instrumentos de medida que hagan mediciones con precisión infinita.
- Debido a que pequeños errores de medición generan grandes cambios en el futuro distante, en sistemas no lineales no se puede garantizar la reproducibilidad de muchos fenómenos ni la predictibilidad del futuro. Así, el caos interviene en todas estas ciencias por derecho propio.

Obsérvese que las ideas de Poincaré no tuvieron consecuencias en el lapso entre 1890 e inicios de la década de 1960; es decir, durante 70 años sus

cos de la época. Desde el punto de vista histórico, este hecho se puede entender hoy en día por las siguientes razones:

1. A comienzos del Siglo XX se da la revolución de la relatividad y de la mecánica cuántica. Los físicos se dedican a estas ciencias que modificaban de manera significativa el mundo newtoniano y que han revolucionado la ciencia, la tecnología y la manera como entendemos el universo.

2. El desarrollo tecnológico era insuficiente y aún el computador no se había inventado. Sólo a comienzos de la década de 1940, en el marco de la Segunda Guerra Mundial, alcanza un desarrollo preliminar con el ENIAC que utilizaban para calcular tablas balísticas para la artillería. El transistor sólo se desarrolla en 1947. El famoso IBM 360 sólo aparece en abril de 1964.

En este contexto tecnológico aparece en 1963 el matemático y meteorólogo Edward N. Lorenz (1917-) quien desarrolló un modelo simplificado para estudiar el proceso de convección del calor en la atmósfera. Usó para ello un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales ($\sigma = 10, r = 40, b = 3$):¹

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -\sigma x + \sigma y, \\ \frac{dx}{dt} &= -xz + rx - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz,\end{aligned}$$

Al usar un computador para realizar largos y dispendiosos cálculos, Lorenz encontró que si modificaba la tercera o cuarta cifra significativa de las variables de estado, se generaban grandes cambios en el futuro del sistema. Prácticamente por accidente, pero con alta persistencia y con riguroso cuidado científico, había encontrado evidencia contundente de la alta sensibilidad a pequeños cambios en las condiciones iniciales en sistemas no lineales. Apareció así en la ciencia, por primera vez, lo que actualmente se denomina el *atractor caótico de Lorenz*, es decir, un conjunto de estados en el espacio de fase (o espacio de estados) que se parece a una mariposa (figura 1) y que tiene propiedades muy especiales:

- Cualquier condición inicial que esté en la cuenca del atractor termina inevitablemente en el atractor.

• Una vez que el sistema está sobre el atrac-

manera exponencial. Así, después de un tiempo suficientemente largo, como consecuencia de la amplificación sucesiva no lineal de las pequeñas diferencias iniciales, el futuro estado del sistema llega a ser impredecible.

Para describir este efecto de alta sensibilidad a pequeños cambios en las condiciones iniciales en sistemas no lineales, se acuña el término de efecto mariposa: el batir de las alas de una mariposa en Estados Unidos puede ser suficiente para producir una tormenta en Colombia. ¡Así son los sistemas no lineales!

- A pesar de que las trayectorias dentro del atractor se separan de una manera impredecible, el atractor como un todo tiene una elegante estructura geométrica estable y ordenada. Es decir, el comportamiento caótico de las trayectorias de un sistema en el espacio de estados genera una estructura ordenada.

- Considérese que la trayectoria parte de un punto de la región A ; entonces, a medida que el

tiempo transcurre, la superficie del atractor se divide primero en dos superficies (A y B), éstas a su vez se subdividen en cuatro, éstas en ocho y así sucesivamente, para generarse así un conjunto de infinito número de superficies. El atractor es entonces un objeto fractal, es decir, su estructura es extremadamente compleja y tiene dimensión no entera. Para caracterizar su dimensión, a un fractal se le asocia la dimensión de Hausdorff, que en el caso del atractor de Lorenz parece ser 2,0627160.

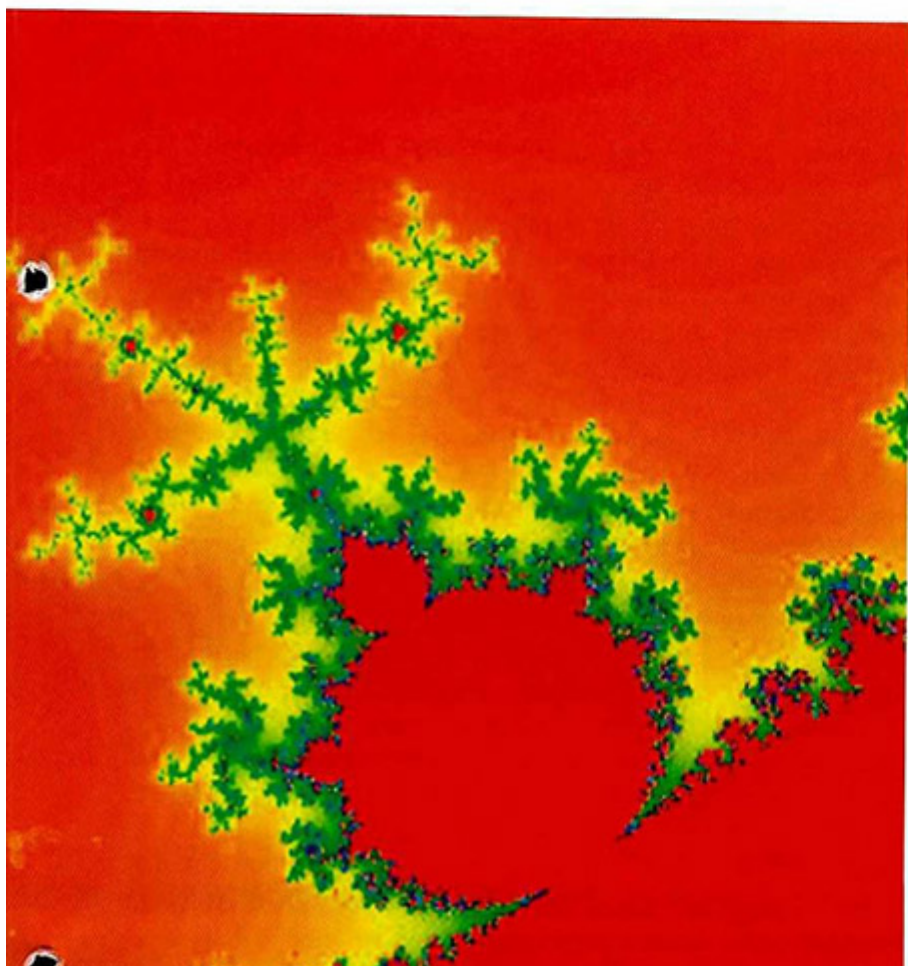
Caos y objetos fractales

La forma de las nubes y de las montañas, la estructura zigzagueante de las costas, el comporta-

Figura 2: Conjunto fractal de Mandelbrot que se obtiene mediante la iteración de $z_{n+1} = z_n^2 + c$, en la cual la variable z y la constante c son números complejos.

miento de los precios de las acciones en la bolsa, el fenómeno de turbulencia, la estructura compleja del atractor de Lorenz, el conjunto de Mandelbrot que se muestra en la figura 2, entre muchos otros objetos, no se pueden describir mediante las funciones suaves del cálculo y las formas geométricas regulares de la geometría de Euclides (triángulos, círculos, etc.). Se requiere de la geometría fractal a la que Benoit Mandelbrot (1924-) dio origen, con sus libros de 1975 y de 1982. A propósito, un fractal es un objeto geométrico cuyas partes no llegan a ser más simples cuando se descompone en partes cada vez más pequeñas; es decir, su estudio no se facilita mediante el enfoque tradicional de la ciencia al que ya se hizo referencia.

La geometría fractal crea una revolución de la matemática y de la ciencia ya que, además de los objetos fractales construidos por el hombre, existe abundancia de objetos fractales en la naturaleza. El comportamiento caótico y los objetos fractales forman un



La universalidad del caos

Los sistemas dinámicos no lineales aparecen en todas las disciplinas que hacen uso de modelos matemáticos con ecuaciones diferenciales o con ecuaciones de recurrencia. Entonces, lo natural es que en todos estos sistemas aparezca comportamiento caótico, fractales, atractores (caóticos y no caóticos) e impredecibilidad. A propósito, (i), un sistema dinámico siempre se forma de dos partes: un espacio de fase, que consta de todos los estados posibles del sistema físico, y unas reglas que describen la manera como cambia el estado del sistema con el tiempo (como ejemplo, ver la *figura 1* y las ecuaciones 1 que describen el modelo de Lorenz); (ii) la dinámica de los sistemas caóticos siempre tiene lugar en una región acotada del espacio de fase; (iii) los sistemas caóticos tienen un comportamiento no periódico.

Se presentan a continuación ejemplos de las implicaciones o de las aplicaciones de los sistemas dinámicos en diferentes disciplinas. Es de anotar que la literatura científica abunda en propuestas metodológicas y en el desarrollo de algoritmos que buscan aplicar las propiedades de los sistemas caóticos, así:

- *Control del caos* o supresión del mismo, que es un mecanismo para transformar un sistema caótico en uno no caótico.

- *Anticontrol del caos*, o caotificación, que es un mecanismo para transformar un sistema que tiene comportamiento regular (no caótico) en un sistema caótico. Este proceso se usa para encriptar información, para comunicaciones de banda ancha y para cálculos con números pseudoaleatorios.

- *Sincronización caótica*, es decir el ajuste de ritmos de osciladores periódicos autosostenidos a través de pequeñas interacciones entre ellos. Por ejemplo, en experimentos con junturas Josephson, las regiones de sincronización se manifiestan como escalones en las curvas corriente-voltaje, que se conocen como los escalones de Shapiro.

- Análisis no lineales de *series de tiempo* para entender la dinámica (determinista o estocástica) que subyace al sistema objeto de estudio. A título de ejemplo: precios de las acciones, datos meteorológicos, estudios de encefalogramas o electrocardiogramas. Los electroencefalogramas (EEG) reflejan la actividad eléctrica en el cerebro y, aún en personas saludables, indican la presencia de caos en algunas regiones. La hipótesis es que el estu-

dio de la dinámica no lineal que subyace al sistema nervioso es útil para entender la aparición de periodicidades patológicas (epilepsia, mal de Parkinson, psicosis maniático-depresivas) y para ayudar en su tratamiento.

Caos, un reto para los pilares de la ciencia

La teoría del caos genera un reto para la ciencia ya que en los sistemas no lineales la evolución temporal puede cambiar de manera significativa como consecuencia de pequeñas modificaciones en el estado inicial del sistema (separación exponencial de trayectorias). En efecto, en las ciencias experimentales la veracidad de los resultados se fundamenta en dos principios:

1. Debe ser posible reproducir los experimentos (se incluyen los computacionales, es decir, cálculos asociados con estudios numéricos de los sistemas dinámicos).

2. Los resultados de los experimentos pueden ser verificados o confirmados empleando otros experimentos que se basen en ideas completamente independientes. Por ejemplo, obsérvese que la determinación de la velocidad de la luz depende del número de dígitos confiables que proporcione el experimento, puesto que en la ciencia cada uno de los dígitos es objeto de un proceso de validación o refutación de carácter independiente.

En sistemas caóticos lograr la reproducibilidad de resultados es un proceso técnicamente complicado que requiere que confluyan muchas circunstancias afortunadas. Como ejemplo, en un estudio de la estructura fractal del atractor de Lorenz de 2004 y después de hacer el proceso de redondeamiento de cifras significativas, el autor relaciona los datos para el cálculo de una órbita periódica con $\varepsilon = 27$ y período T , con 100 dígitos de precisión, que invito al lector a reproducir:²

$$x = -13,763610682134200525014401054361653864100864854092368453537864292120282774726811585294023934639503828,$$

$$y = -9,974395112827182734516188428170964301381594712594830103556702553883086852225373223436220212323688956,$$

$$T = 1,5586522107161747275678702092126960705284805489972439358895215783190198756258880854355851082660142374.$$

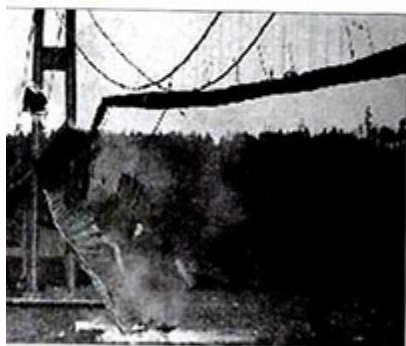
Industria aeroespacial

Afortunadamente el 'control' del caos, que se logra modificando condiciones iniciales o los valores de los parámetros del sistema, permite diversas aplicaciones tecnológicas. Por ejemplo, en la industria aeroespacial los aviones de combate se diseñan para que tengan una dinámica inestable que les permita una alta capacidad de maniobra bajo condiciones extremas de vuelo. Los aviones se estabilizan de manera artificial bajo condiciones normales de vuelo. Las propiedades de inestabilidad local de trayectorias (maniobras rápidas) y estabilidad global de órbitas (seguridad) se encuentran con frecuencia en los sistemas no lineales caóticos.

El puente de Tacoma

El primer puente colgante de Tacoma (Washington) para vehículos fue diseñado para tener una estructura delgada, flexible y liviana, que permitiera vibraciones transversales de gran amplitud. Después de cuatro meses de servicio, el efecto del

Figura 3:
Puente de Tacoma.



forzamiento del viento sobre el puente condujo al colapso de esta estructura el 7 de noviembre de 1940. Todo indica que la causa del desastre se debe a efectos no lineales asociados con el acoplamiento entre diferentes modos de vibración de la estructura, que condujeron a amplitudes superiores al umbral previsto en el diseño.

La ingeniería aprendió e incrementó sus precauciones a raíz de este hecho desafortunado, pero el tema es aún objeto de estudio.

Ecología

Los fractales se usan para el estudio de fenómenos espaciales y temporales, pero naturalmente su aplicación se extiende a diferentes ámbitos. Por ejemplo, en ecología, considérese una región (o paisaje) que se forma por zonas (bidimensionales

o tridimensionales) que se diferencian por ciertos rasgos característicos de homogeneidad espacial. La heterogeneidad de los recursos ambientales conduce a zonas de diverso tipo y tamaño y con fronteras de variadas formas. Las características de estas zonas pueden ser factores importantes en diversidad, estabilidad y función ecológica. Existen estudios ecológicos que analizan los patrones que forman las zonas y miden la geometría fractal de ciertas regiones, incluyendo fractales geométricos, temporales (o dinámicos), estadísticos, o de información, entre otros. Entre los elementos importantes de un fractal se tienen la heterogeneidad, la autosimilaridad, la presencia de una escala característica de longitud y la dimensión fractal, dada por:³

$$D_f := \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)},$$

donde $I(\epsilon)$ es la información de Shannon⁴

$$I(\epsilon) := - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i,$$

donde p_i es la probabilidad de observar la i -ésima elemento empleando unidades de muestreo de tamaño ϵ .

La interacción huésped-parásito es un ejemplo de una interacción interespecífica entre dos especies, que se puede modelar por un sistema dinámico en tiempo discreto:⁵

$$N_{n+1} = N_n \exp \left[r(1 - N_n) - \frac{aT P_n}{1 + aT_b N_n} \right],$$

$$P_{n+1} = N_n \exp \left[1 - \frac{-aT P_n}{1 + aT_b N_n} \right],$$

donde N_n y P_n son las poblaciones de huéspedes y parásitos en la generación n ; r , T , T_b y a son parámetros apropiados. Este modelo da origen a una dinámica muy compleja con múltiples atractores, con cuencas de atracción con propiedades fractales y con transientes caóticos. De nuevo, una característica fundamental en la dinámica caótica de las poblaciones es la alta sensibilidad de la dinámica con respecto a las poblaciones iniciales que, como ya se indicó, se conoce como el efecto mariposa. Sin embargo, debido a los múltiples atractores y al carácter

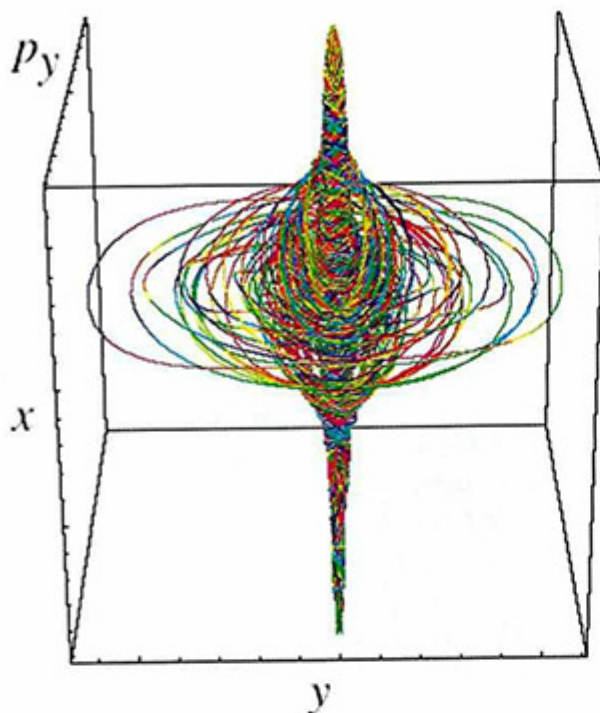


Figura 4: Trayectoria caótica de una partícula en la cosmología de Bianchi, proyectada en un espacio tridimensional con ejes x, y, p_y .

fractal de las cuencas de atracción es muy difícil predecir el atractor final al que llega una trayectoria, si no se conoce con alta precisión el estado inicial. La investigación en ecología tiene posiblemente en este tipo de estudios todo un problema que superar.

La propagación de una infección a través de una población se puede modelar mediante un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales, que describen cómo cambian con el tiempo las poblaciones de los susceptibles, los infectados y los recuperados de la enfermedad. Similarmente, en 1911 Ronald Ross consideró un modelo de ecuaciones diferenciales para describir una epidemia de malaria sobre la base de dos poblaciones: la de humanos infectados y la de mosquitos infectados, incluyendo efectos de retardo en el tiempo (0,5 y 0,6 meses para humanos y mosquitos, respectivamente).

Cosmología

La evolución del universo primitivo es un enigma. En la cosmología de Luigi Bianchi (1856-1928) se considera, por ejemplo, una partícula con hamiltoniano:⁶

$$H(x, y, p_x, p_y) = \frac{1}{2} \left(p_x^2 + \frac{1}{2} p_y^2 + 2y^2 x^2 + y^4 \right)$$

que se mueve en un pozo de potencial con dos canales abiertos en las direcciones positiva y negativa

de la variable x . La figura 4 muestra una trayectoria caótica que evoluciona según las ecuaciones de Hamilton que están asociadas con el hamiltoniano anterior. Este ejemplo y muchos otros indican que la naturaleza de las órbitas (caóticas o regulares) son fundamentales para entender el comportamiento dinámico de objetos cósmicos.

Condensados de Bose-Einstein

El fenómeno de condensación de bosones predicho por Albert Einstein en 1925, se presenta a temperaturas extremadamente bajas cercanas al cero absoluto; el fenómeno sólo se observó experimentalmente en 1995. Hoy en día el condensado de Bose-Einstein (CBE) es un nuevo estado de la materia con propiedades fascinantes que se describen con base en la ecuación de Gross-Pitaevskii (GP). Ésta involucra contribuciones no lineales en la función de onda (a diferencia de la ecuación de Schroedinger) que dan origen a un comportamiento caótico. Por ejemplo, en el estudio de efectos Josephson caóticos en dos condensados de Bose-Einstein acoplados, el problema se puede reformular en términos de un hamiltoniano:⁷

$$H(\theta, \zeta) = \frac{\Lambda}{2} \zeta^2 + \Delta E \zeta - \sqrt{1 - \zeta^2} \cos \theta,$$

donde θ designa una diferencia de fase, $\zeta = (N_1 - N_2)/(N_1 + N_2)$ es la diferencia fraccional de poblaciones entre los condensados y Λ y ΔE son parámetros del sistema.

Otras áreas de aplicación

La lista de ejemplos de sistemas caóticos es interminable. Por razones de espacio es suficiente anotar que existe variada literatura científica sobre el comportamiento caótico en física de sistemas turbulentos, física del láser y óptica, física del plasma, física molecular, mecánica, biología y ecología, economía y finanzas, medicina, ingeniería eléctrica y química, circuitos electrónicos, telecomunicaciones y sistemas de información, geofísica (atmósfera, clima y cambio global, hidrología, oceanografía, ciencia espacial) o neurología (por ejemplo, el modelo de Hodgkin-Huxley o el de FitzHugh-Nagumo para describir la propagación de impulsos eléctricos en-

tre las neuronas). En cada uno de estos campos los especialistas desarrollan los modelos que son de su interés, pero el hecho a destacar es la universalidad del comportamiento caótico que aparece en los diferentes modelos y la existencia de técnicas comunes para caracterizar la presencia o ausencia del comportamiento caótico (secciones de Poincaré, exponentes de Lyapunov, entropía de Kolmogorov).

Conclusiones

Los ejemplos que se han esbozado buscan mostrar el gran impacto que tienen los sistemas dinámicos no lineales en diferentes disciplinas. Ahora, para concluir, se presenta un resumen de las principales ideas que emergen de estos estudios, indicando que el tema de la complejidad amerita un tratamiento independiente debido a las limitaciones de espacio en este artículo:

1. Ecuaciones no lineales intervienen en diversas formas en todas las ramas de la ciencia, la ingeniería y la tecnología, al igual que en campos como la economía y la dinámica social.
2. La teoría del caos y de la complejidad contribuye de manera transversal a las diferentes disciplinas al proporcionar un marco conceptual unificador.
3. La presencia de términos no lineales (X^2 , xy , potencias o funciones más complicadas) en las ecuaciones de evolución temporal es requisito indispensable para la aparición de comportamiento caótico.
4. El caos es una propiedad presente aun en sistemas muy simples. Prácticamente todos los sistemas dinámicos de tiempo continuo, con tres o más variables de estado, presentan comportamiento caótico; en sistemas de tiempo discreto, el caos aparece incluso en sistemas con sólo una variable de estado.
5. En la primera parte del siglo XX, al igual que en los siglos anteriores, el énfasis se dio en el estudio de los sistemas lineales y es un hecho que éstos nunca presentan comportamiento caótico.
6. Con la invención del computador, con la geometría fractal y con los grandes avances teóricos que se han dado, es posible estudiar hoy sistemas no lineales. Un nuevo paradigma ha emergido en la ciencia: el mundo es no lineal, caótico y complejo. Este paradigma contrasta con la visión lineal que predominó en la ciencia en el pasado.
7. El cambio en el valor de un parámetro de un sistema no lineal puede dar origen a bifurcaciones que hacen que el sistema cambie dramáticamente su comportamiento, de regular a caótico.
8. Los sistemas no lineales, el comportamiento caótico y la existencia de estructuras fractales son características normales en la naturaleza; el comportamiento regular y las estructuras geométricas euclidianas son la excepción.
9. En sistemas caóticos, el determinismo no conlleva predictibilidad del futuro distante, es decir, el punto de vista de Poincaré predominó sobre el de Laplace.
10. El caos puede ser extremadamente útil, pues puede ser controlado o inducido, y es objeto de interés para nuevas aplicaciones tecnológicas.
11. El estudio de sistemas complejos, en el sentido que se definió en la primera parte de este artículo, conlleva una acción recíproca entre caos y complejidad. En los sistemas complejos (el cerebro, el cuerpo humano, la familia, los grupos sociales, una colonia de hormigas) están presentes interacciones no lineales entre las múltiples partes que los conforman, existe interdependencia entre ellas y presencia de diversas escalas de tiempo. La transición de comportamiento regular a comportamiento caótico en estos sistemas podría ser similar a las transiciones de fase que se

Referencias

1. Gleick J: *Chaos: Making a new science*. Penguin Books, New York, 1987.
2. Flake GW: *The Computational Beauty of Nature*. The MIT Press, Cambridge, 1999.
3. Campos D & Isaza JF: *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002.
4. Campos DH: "Non linear time series analysis of the EEG during sleep". *Rev. Acad. Colomb. de Ciencias* 20 491, 1996.
5. Campos D: "Modelo logístico: Un paradigma en la teoría del caos". *Rev. Acad. Colomb. de Ciencias* 20 503, 1996.
6. Campos D: "Determinismo, caos e impredecibilidad". *Rev. Acad. Colomb. de Ciencias* 26 85, 2002.
7. Viswanath D: "The fractal property of the Lorenz attractor". *Physica D* 190 115, 2004.
8. Álvarez-Ramírez J, Solís-Dañá J, Puebla H: "Control of the Lorenz system: Destroying the homoclinic orbits". *Phys. Letts. A* 128, 2005.
9. Kaitala V, Ylikarjula J, Heino M: "Non-unique population dynamics: basic patterns". *Ecological Modelling* 135 127, 2000.
10. Ju-Hua C, y Yong-Jin W: "Chaos in Bianchi I cosmology". *Chinese Physics* 14 1282, 2005.
11. Fang J, Hai W, Chong G, Xie Q: "Chaotic Josephson effects in two-coupled Bose-Einstein condensates". *Physic-*

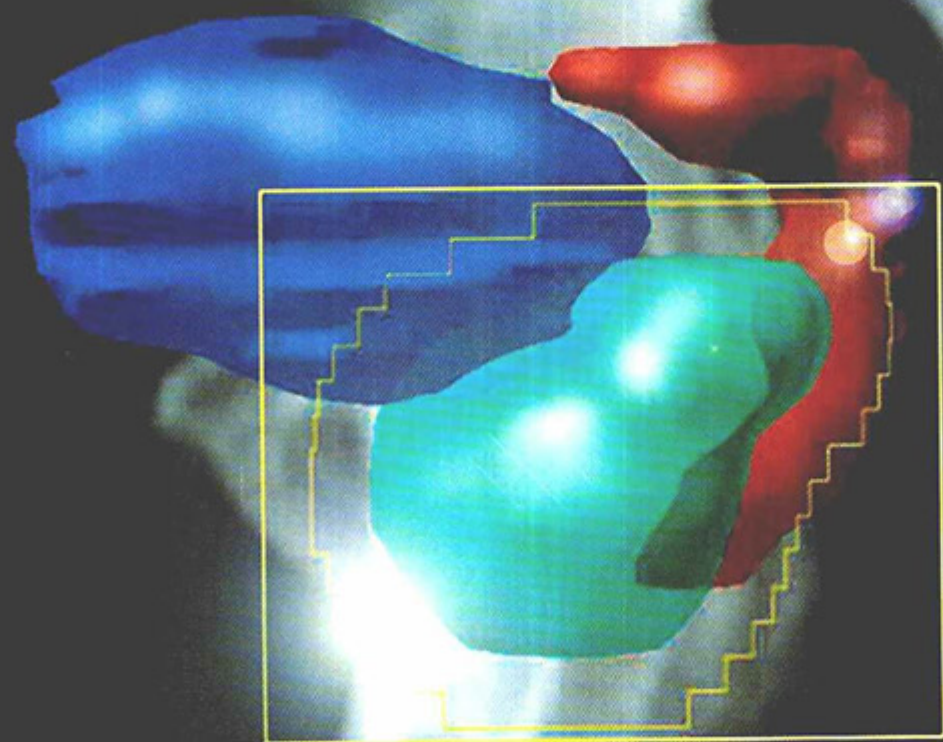
María Cristina Plazas

*Coordinadora, Grupo de Física Médica,
Departamento de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C., Colombia.
E-mail: mcplazas@unal.edu.co*

Harold Machado

*Coordinador, Grupo de Física Médica,
Instituto Nacional de Cancerología,
Bogotá D.C. Colombia.
E-mail: hmachado@incancerologia.gov.co*

Física. médica...



*Más
de un siglo*

“Usted tiene cáncer”. Con esta frase pronunciada por un profesional de la medicina, se inicia un agudo drama personal que afecta las esferas familiar, laboral, escolar y social de más de setenta mil personas cada año en Colombia, que son diagnosticadas con esta enfermedad (sin incluir el cáncer de piel), que constituye una de las patologías más complejas a que se enfrenta la humanidad. Se define como el crecimiento acelerado de tejido, originado por la proliferación continua de las células anormales, con capacidad de expansión y destrucción local e invasión de otros tejidos. Se distinguen tres tipos principalmente, los carcinomas que afectan tejido epitelial, los sarcomas que afectan tejidos conjuntivos y las neoplasias hematolinfoides que incluyen las leucemias.

Esta enfermedad en general se identifica con la nomenclatura TNM (tumor, nódulo, metástasis), que da cuenta del estado de avance de la enfermedad.

Según el Instituto Nacional de Cancerología (INC), los tumores malignos constituyen la tercera causa de muerte en nuestro país, luego de las enfermedades cerebro-cardio-vasculares y las causas externas (violencia, accidentes, etc.) calculándose que cada año 30.000 colombianos mueren por esta causa.

Alternativas de la física para la medicina

La Física Médica aparece como una rama del conocimiento con más de un siglo de historia, para prestar apoyo a las ciencias de la salud en las áreas de radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear y protección radiológica. Desarrollos cruciales en la medicina como la terapia con radiaciones ionizantes (que al interactuar con la materia generan iones que son átomos o moléculas con carga eléctrica), la Resonancia Magnética Nuclear (RMN), la Tomografía Axial Computarizada (TAC), imágenes por ultrasonido o ecografías, que hacen posible visualizar órganos internos y el desarrollo prenatal, se han dado gracias al avance de esta disciplina cien-

Así, la física amplía cada vez más sus horizontes en el trabajo investigativo, prestando apoyo a otras disciplinas y áreas del conocimiento como es el caso particular del Grupo de Óptica aplicada del Departamento de Física de la Universidad Nacional, que trabaja en el desarrollo de prototipos útiles en el diagnóstico preciso de defectos en la córnea y aberraciones de la visión causadas por alteraciones de las estructuras oculares, o el Departamento de Ingeniería Mecánica donde el estudio y el desarrollo de aplicaciones útiles en ortopedia, con base en investigaciones en biomecánica, parten en gran medida de los conocimientos en física.

Las radiaciones ionizantes

En general así se denominan partículas y tipos de fotones capaces de ionizar los átomos. Rayos gamma, beta, alfa, X y ultravioletas de alta energía se encuentran dentro de esta categoría, que con longitudes de onda de 10 nanómetros –nm- (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro) o menos tienen energía suficiente para expulsar electrones de los átomos y romper enlaces químicos, incluidos los del ADN.

Estas son radiaciones de alta frecuencia. Como referencia, el espectro visible va de las longitudes de onda 400 nm (violeta) a 800 nm (rojo).

Dentro del grupo de partículas que constituyen radiaciones ionizantes están los haces de electrones y partículas cargadas, los neutrones y radiaciones de fuentes de radionúclidos.

Una perspectiva histórica

Desde que el físico alemán Wilhelm C. Roentgen descubrió los Rayos X, al iniciar el invierno de 1895 en la Universidad de Würzburg, el estudio de las radiaciones y su interacción con la materia biológica ha tenido avances vertiginosos.

Pierre y Marie Curie junto con Henri Becquerel

Durante el siglo XX, numerosos científicos apuntaron sus investigaciones a los efectos de la radiación sobre la materia biológica y a desarrollar novedosas tecnologías para uso clínico.

por lo que les fue otorgado el Premio Nobel de física en 1903.

Marie Curie, quien nació en Polonia, fue la primera mujer en recibir este Premio al que agregó el Nobel de Química en 1911. Veintitres años después falleció a causa de una anemia severa ocasionada por sus prolongadas exposiciones a radiaciones ionizantes. Sólo un año después de su desaparición su hija Irène Joliot-Curie recibió el Premio Nobel de Química por méritos en esta misma área de trabajo.

Regresando a los albores del Siglo XX, en 1901 Henri Danlos, médico dermatólogo del Hospital de San Luis de París, publicó resultados del tratamiento de lupus con radiaciones de radio, abriendo horizontes a la radioterapia, mientras ante las evidentes lesiones que sufrían los científicos expuestos a este tipo de radiaciones, en 1908 P. von Villar creó el concepto de la radioprotección, estableciendo dosis tolerables de exposición.

Durante el siglo XX, numerosos científicos apuntaron sus investigaciones a los efectos de la radiación sobre la materia biológica y a desarrollar novedosas tecnologías para uso clínico.

Intervención interdisciplinaria

La Física Médica es sólo un área de las tantas que intervienen en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades haciendo uso de radiaciones, así como en la protección ante la emisión de estas, que afectan tanto al personal que por razones ocupacionales frecuenta áreas expuestas, como a los pacientes.

De otro lado, son los radioncólogos, médicos nucleares y radiólogos los médicos especialistas que toman, en últimas, las decisiones de diagnóstico y tratamiento, apoyándose en el trabajo de, entre otros, radiólogos, ingenieros nucleares y físicos médicos, así como de personal de tipo operativo.

Las áreas de la física médica

Radiodiagnóstico

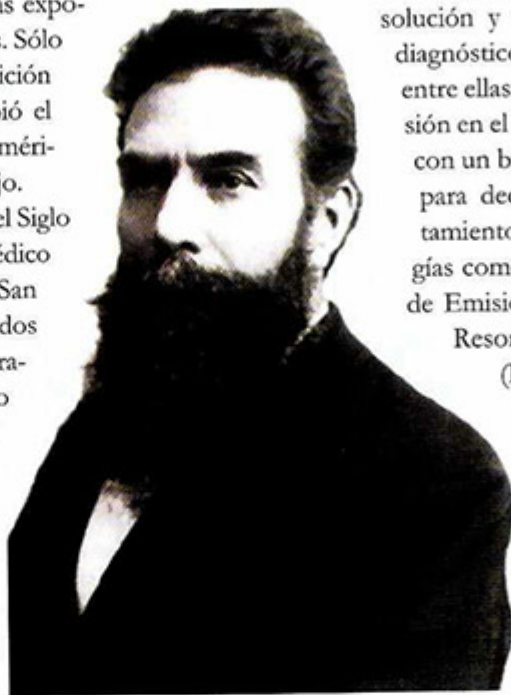
Imágenes bidimensionales y tridimensionales en placas o digitalizadas de alta resolución y fidelidad apoyan el estudio diagnóstico de diversas enfermedades, entre ellas el cáncer, permitiendo precisión en el dictamen médico y contando con un buen volumen de información para decidir acerca de posibles tratamientos. La aparición de tecnologías como actualmente la Tomografía de Emisión de Positrones (PET) y la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) en la década de 1970, transformaron ese campo al permitir a los médicos registrar la estructura y función de cualquier órgano del cuerpo, como el cerebro, el bazo o el tracto gastrointestinal, e incluso el desarrollo de tumores.

Lo deseable en radiología es lograr la mejor calidad de imagen con la menor dosis absorbida posible por el paciente.

Medicina nuclear

Su desarrollo científico se inicia en la década de 1930 con la producción de fósforo radiactivo en una máquina llamada ciclotrón, para utilizarlo en tratamiento de pacientes con desórdenes sanguíneos. Esta área médica avanzó con la invención del reactor nuclear en 1940, gracias al cual se podían generar sustancias radiactivas fácilmente. El tratamiento con yodo radiactivo detenía por completo la propagación del cáncer de tiroides en los pacientes.

Los radiofármacos (principios activos que incluyen isótopos radiactivos útiles en el tratamiento del cáncer) empezaron a utilizarse en la década de 1980, posibilitando el desarrollo de nuevos compuestos radioactivos, de aplicaciones tanto diagnósticas como terapéuticas.



Wilhelm C. Roentgen.

Radioterapia

Es la exposición de tejidos a radiaciones ionizantes para el tratamiento de patologías. Se usan fuentes naturales o artificiales de radiación que generan radicales libres nocivos para las estructuras vitales de las células cancerígenas.

La teleterapia (irradiación a distancia) y braquiterapia (tratamiento invasivo que consiste en la implantación de fuentes radioactivas cerca de o en contacto con la zona del volumen tumoral) son estrategias aplicadas para lograr un efecto de control sobre las células cancerígenas o en casos paliativos (alivio de síntomas).

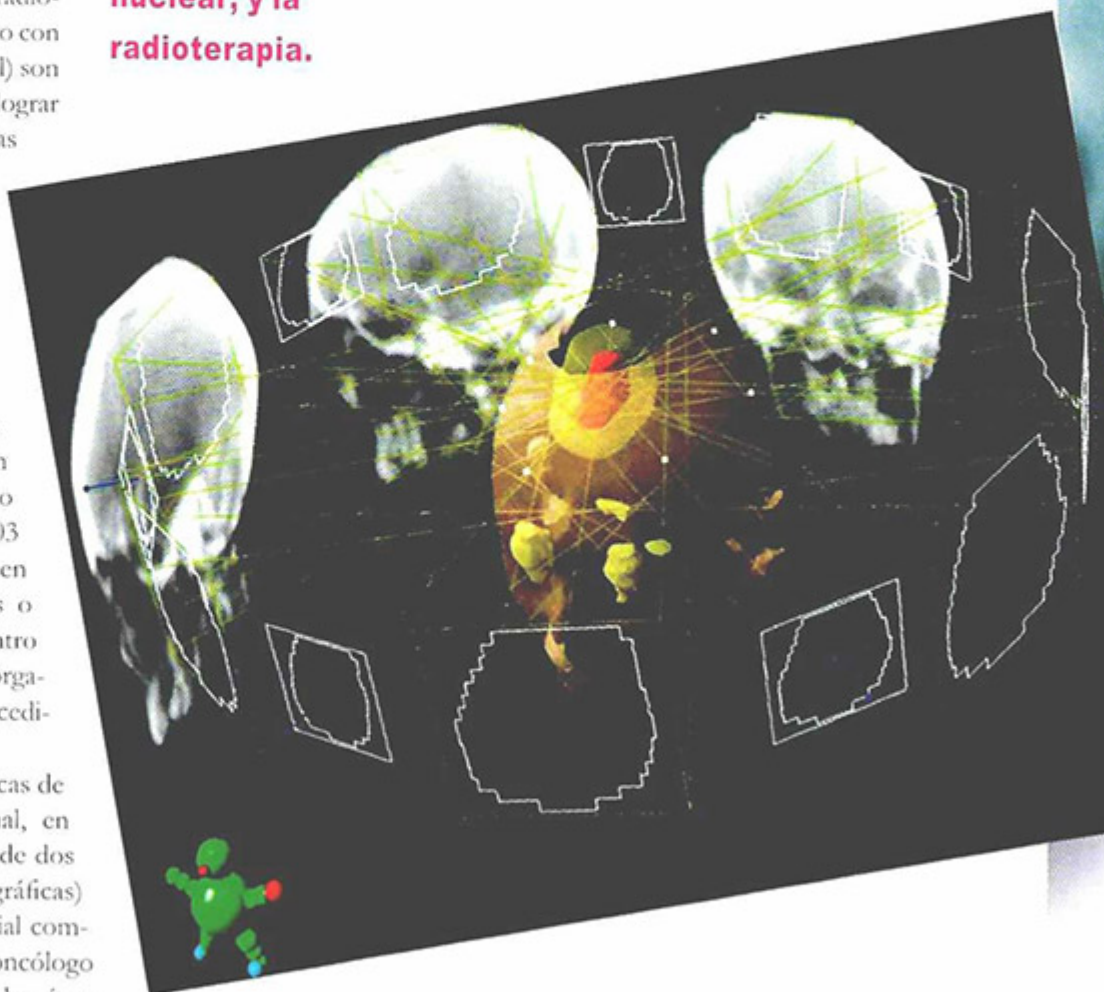
En teleterapia se emplean fuentes como el isótopo Cobalto 60 (^{60}Co), mientras que en braquiterapia se cuenta con fuentes selladas de radiación que emplean isótopos como Iridio 192 (^{192}Ir), Paladio 103 (^{103}Pd) y Yodo 125 (^{125}I) en forma de semillas, tómulos o alambres que se ubican dentro del tumor o cavidades del órgano afectado, mediante procedimientos quirúrgicos.

Existen diferentes técnicas de radioterapia: la convencional, en la que a partir de imágenes de dos dimensiones (placas radiográficas) o estudios de tomografía axial computarizada, el médico radioncólogo elige el volumen a irradiar y los órganos a proteger. En el caso del cáncer de próstata se pueden utilizar diferentes técnicas; una de ellas es conocida como la técnica de cajón que consiste en cuatro campos pélvicos (anterior, posterior y laterales) centrados en la próstata, los cuales incluyen el lecho tumoral y sus áreas de drenaje linfático. El volumen irradiado podrá ser reducido posteriormente de acuerdo a la evolución de la

La radioterapia conformal incorpora la inmovilización del paciente, el planeamiento computarizado de la irradiación en tres dimensiones y sistemas de tratamiento para producir altas dosis en volumen tumoral. Es altamente específica porque aproxima la zona de irradiación a la forma del tumor, evitando afectar tejidos adyacentes, en el caso del cáncer de próstata serían la vejiga, el recto o las cabezas femorales.

En esta técnica es necesario practicar en el paciente una TAC en la mis-

Entre las áreas de la física médica están el radiodiagnóstico, la medicina nuclear, y la radioterapia.



ma posición en que será tratado, a partir de la cual el médico radioncólogo define el volumen a tratar y la dosis prescrita. En ocasiones se adquieren además imágenes de Resonancia Magnética para realizar una fusión que ayuda al médico a definir más claramente el volumen de tratamiento.

En los últimos años se ha desarrollado una nueva técnica basada en el movimiento de los co-

irradiar, permitiendo así la modulación de la fluencia de fotones en el volumen irradiado de manera que se pueden entregar dosis bajas en regiones en las cuales el haz de radiación encuentra a su paso estructuras críticas definidas previamente por el médico radioncólogo y dosis más altas en regiones en las que el haz no atraviesa dichas estructuras o la tolerancia del tejido a la radiación es mayor.

Un punto interesante en esta técnica es que la planeación se realiza de forma inversa. Esto quiere decir que el radioncólogo define los valores de dosis máximos y mínimos a alcanzar por cada uno de los órganos en riesgo y los volúmenes de tratamiento. Un algoritmo de cálculo basado en métodos numéricos señala al físico médico los patrones de movimiento de las multihojas para cumplir con las condiciones impuestas. Esta radioterapia conocida como de Intensidad Modulada o con la sigla IMRT de las iniciales del nombre en inglés, tiene su fundamento en el hecho de que publicaciones internacionales señalan que en ciertos tumores la elevación de la dosis ha demostrado llevar a un mayor control tumoral. El reto es garantizar que alcanzando estos valores se puedan mantener los límites de dosis en las estructuras de riesgo. En esta técnica la inmovilización juega un papel muy importante, así como la verificación de que el volumen planeado será realmente el irradiado.

Protección radiológica

Estas técnicas deben ser

Principales responsabilidades del Físico Médico

- Participar en la elección y compra de equipos adecuados para diagnóstico, terapia con radiaciones ionizantes y protección radiológica.
- Legalizar y realizar las pruebas de aceptación de los diferentes equipos.
- Crear y aplicar protocolos en el manejo de radiaciones ionizantes (rayos gamma, haces de electrones y partículas cargadas, neutrones y radiaciones de fuentes de radionúclidos sellados), radioterapia y radiodiagnóstico.
- Hacer parte del grupo interdisciplinario en la planeación.
- Participar en programas de garantía y control de calidad para radioterapia, radiología y medicina nuclear.
- Vigilar el permanente cumplimiento de normas de protección radiológica, así como tomar parte en programas de formación y entrenamiento.
- Llevar a cabo medidas físicas relacionadas con la evaluación de las dosis recibidas por los pacientes y optimizar las condiciones que conduzcan una reducción de dosis en los tratamientos.
- Participar activamente en la optimización de los equipos y de los tratamientos vigilando la correcta postura del paciente en la exposición a la radiación, así como los arreglos geométricos adecuados de la máquina.
- Apoyar la adecuada administración de radiofármacos en bien de la seguridad del paciente y, en el caso ambulatorio, de quienes conviven con él.

mendaciones y protocolos de organismos como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (que es asumida en Colombia como primera referencia) para evitar accidentes a causa del uso inadecuado de fuentes radiactivas. Estas normas básicas de seguridad se aplican en medicina, agricultura, hidrología, geología y producción farmacéutica.

El físico médico

Es un físico con título de posgrado, altamente especializado en aplicar tecnologías en las ciencias de la salud. Su formación integral involucra aspectos éticos y humanos que le permiten desarrollar una adecuada relación con el paciente. Su conocimiento y entrenamiento en física de la radiación le permite asesorar y actuar sobre todos los aspectos en radioterapia, imágenes diagnósticas, medicina nuclear y protección radiológica. Como consecuencia, el Físico Médico tiene un objetivo profesional que no puede ser confundido con el de radioncólogos, radiólogos, ingenieros de servicio u otras profesiones. En últimas, podría definirse como el farmacólogo de las radiaciones.

El Instituto Nacional de Cancerología (INC) y la Universidad Nacional de Colombia

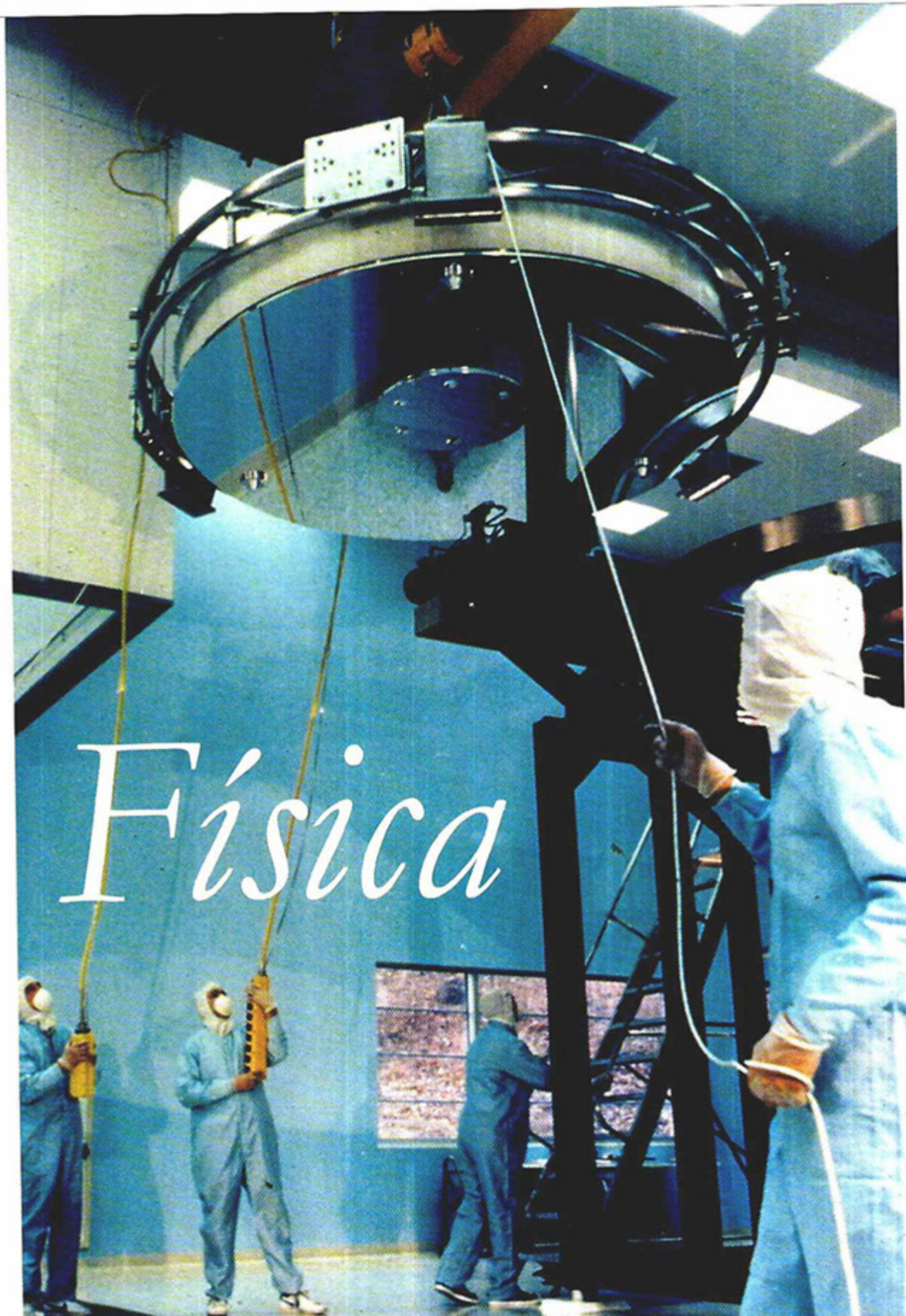
Desde 1983 el INC emprendió acciones institucionales tendientes a crear un posgrado en física radiológica y médica, proceso que resultó en un Convenio Docente Asistencial pactado entre las dos instituciones y que permitió formar Especialistas en Física Radiológica desde 1986. En 1991, se creó la Maestría en Física con línea de investigación en Física Radiológica, contribuyendo así a generar la masa crítica que requiere el país en el área de Física Médica. De hecho, tres de los profesionales de esta disciplina que ejercen funciones en el Grupo de Física Médica del INC, han sido formados en esta maestría que, a su vez, funciona bajo la responsabilidad del Grupo de Física Médica del Departamento de Física de la UN.

Este grupo en su historia ha formado a 16 profesionales en el nivel de maestría, seis en el nivel de especialización y 25 en el de pregrado. Ha adelantado acciones investigativas en las líneas de dosimetría clínica, instrumentación, protección radiológica y radiobiología y ha emprendido acciones académicas de colaboración con instituciones de Francia, Inglaterra, Estados Unidos, Cuba, Ecuador y Nicaragua.

Con base en esta trayectoria investigativa, el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional ha propuesto a las autoridades universitarias la Maestría en Física Médica, que se espera inicie actividades académicas en 2006.

Bibliografía

1. <http://fisica.ciencs.unv.vc/postfismed/historya.html>
2. www.incancerologia.gov.co
3. *The role of a physicist in radiation oncology*. American Association of Physics in Medicine, Rep. No. 38, 1993.
4. *The role of the medical physicist in diagnostic radiology*, American Association of Physics in Medicine, Rep. No. 42, 1994.
5. *The practice of medical physics in radiation oncology*. American Association of Physics in Medicine, Rep. No. 43, 1994.



Física

Jorge Hernando Panqueva A.

Director,

Corporación para la Investigación
de la Corrosión, C.I.C.,

Bogotá, D.C., Colombia.

E-mail: corincor@telecom.com.co

El tema de la Física y su relación con la Industria, en particular en aquellos países como Colombia, cuyo desarrollo tecnológico se encuentra muy lejos del nivel que profesan las naciones industrializadas, ha sido en múltiples oportunidades, durante las últimas tres décadas, objeto de muchos análisis, foros, seminarios, congresos, etc.

Todo lo que allí se ha dicho y discutido podría enmarcarse en dos visiones: desde el punto de vista de los físicos, cuya actividad profesional está circunscrita, en su gran mayoría, a la investigación académica y científica en las universidades y donde la disyunción entre la Física y la Industria tiene lugar debido a la baja capacidad que posee el sector industrial para absorber los conocimientos y resultados frutos de su labor investigativa; y desde el punto de vista de los industriales, quienes también han participado en los eventos realizados con este fin donde la razón de ser del distanciamiento entre la ciencia y la industria radica fundamentalmente en la desarticulación espacio temporal que existe entre las soluciones que ellos requieren y los productos que se generan en el sector científico.

Aunque el problema es claro y reconocido por las partes, su solución no lo ha sido. En este sentido es muy poco lo que hemos avanzado en los últimos treinta años. Como ilustración, podemos señalar un ejemplo: en los años setenta y principios de los ochenta, en todas las universidades donde existía la carrera de física se comenzó a trabajar en "películas delgadas". La motivación era obvia: la microelectrónica estaba en auge y aquella rama de la física del

estado sólido constituía una facilidad extraordinaria para su desarrollo. Treinta años después, no hemos construido en Colombia un solo transistor, pero sí hemos tenido que importar conocimiento y tecnologías para la exploración, explotación y transporte de petróleo, gas y carbón. Hemos tenido que vender minerales sin valor agregado; la industria tuvo que enfrentar sin soporte tecnológico un proceso de 'apertura económica' y hoy, *ad portas* del Tratado de Libre Comercio, el país enfrenta un panorama lleno de incertidumbres por los niveles de calidad y competitividad que ello implica.

Con este artículo quisiera contribuir con algunas ideas sobre el "qué hacer" para superar la brecha que persiste entre el conocimiento científico que generan los físicos en Colombia y las necesidades tecnológicas que requiere el sector industrial del país.

¿Cómo actúa la Medicina?

De la Medicina podemos aprender fácilmente la relación que debe existir entre el conocimiento y la solución de problemas, que es, en definitiva, el punto esencial a resolver en el tema que nos ocupa acerca de la compatibilidad entre la Física y la Industria.

La fuente primaria del conocimiento en la Medicina son los pacientes. Todos los desarrollos que han logrado las ciencias médicas en forma de medicamentos, vacunas, tratamientos, cirugías, etc., han tenido una única finalidad: curar a los pacientes o mejorar sus condiciones de vida. Es a través de esta búsqueda que la Medicina en todo el mundo y a lo largo de los años ha generado su conocimiento y el punto de partida es el paciente. En los centros de investigación se complementa, se amplía y se profundiza en el problema del paciente, para entender más, para mejorar y optimizar las soluciones primarias. No conocemos el médico que actúe en

e industria

dirección contraria, es decir, que a partir de sus conocimientos teóricos identifique enfermedades para las cuales desarrolle soluciones y al tenerlas, busque los pacientes que padecen dicha enfermedad para aplicar en ellos el resultado de sus investigaciones.

Dicha metodología es universalmente aplicada por la Medicina. Por esta razón, en Colombia es una ciencia que compete internacionalmente en la frontera del conocimiento y su nivel es bastante reconocido en el exterior, a Colombia vienen pacientes de países desarrollados con el fin de utilizar los servicios y facilidades que ofrecen importantes centros nacionales del sector de la salud.

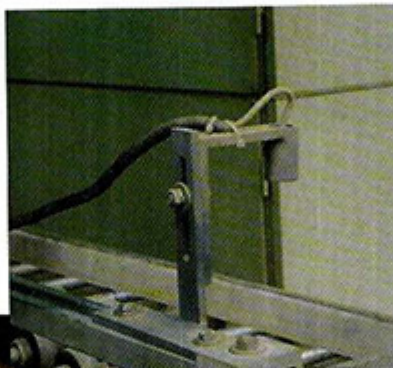
¿Qué sucede con la Física en Colombia?

La necesidad de 'medir y contar' hizo evolucionar al hombre primitivo hacia los números, constituyéndose su aparición en la primera actividad matemática y, seguramente, en el origen de las ciencias naturales. Lo que conocemos

hoy como ciencia y tecnología lo podemos asimilar como un gran edificio en construcción cuya primera piedra fue el surgimiento de los números, con una arquitectura direccionada por la tendencia natural del ser humano hacia el mejoramiento de sus estándares de calidad de vida y cuya ingeniería está sustentada en el conocimiento, no solamente generado en su esfuerzo por entender y controlar lo desconocido, sino también estructurado coherentemente por él mismo.

El ciclo de generación del conocimiento se origina en las necesidades y/o problemas, frente a lo cual el reto del ser humano es entenderlos y controlarlos. Posteriormente, el investigador debe aventurarse en el ejercicio de búsqueda de una respuesta o solución, lo que significa para él una incursión en lo desconocido. Seguidamente, el conocimiento nuevo debe ser estructurado para ser involucrado coherentemente en el edificio de la Ciencia y la Tecnología. Finalmente, con el desarrollo de su aplicación en forma de tecnología se concluye el proceso y se inicia un nuevo ciclo, pues la tecnología, que es la colección de medios y equipos que facilitan las

Sensor de humedad y secadero (Cortesía del Centro Internacional de Física, CIF).



aplicaciones prácticas para que el ser humano mejore su calidad de vida, aporta nuevas ideas asociadas a nuevos problemas y nuevas herramientas para entender y controlar mejor lo descubierto o predecir situaciones desconocidas donde debe incursionar. En esta última fase del ciclo de generación del conocimiento es donde nace y se desarrolla la ciencia básica.

Toda las ciencias contribuyen a la ampliación, actualización o rediseño de ese gran edificio de la ciencia y la tecnología. La Física, en particular, lo ha hecho en muchas oportunidades y con gran frecuencia, porque ella se encuentra en todas partes y su estudio nos proporciona la capacidad para entender e incursionar en lo desconocido, que no es otra cosa que la búsqueda de una respuesta o solución a una necesidad o problema determinado. Cada vez que los físicos aprenden a entender y controlar un evento y evolucionan como semilla de un grupo de especialistas encargado de hacer útil la adquisición

lograda, aparece una nueva opción para la tecnología y, en definitiva, para el ser humano. Enfrentar este reto es justamente la misión de los físicos.

Analicemos en este contexto la pregunta que nos formulamos al inicio del artículo: ¿cuál es el motivo por el cual la Física y el desarrollo tecnológico no logran entrar en concordancia en Colombia? La respuesta es que los interrogantes de los cuales se nutre la investigación en Física en Colombia, tienen como punto de referencia los que las sociedades científica y tecnológicamente desarrolladas le plantean a la Física para superar sus necesidades y problemas. Por esta razón, no es de extrañar que muchos de los logros alcanzados por los investigadores en Colombia sean avalados internacionalmente, mas no en el ámbito nacional. La aceptación de un artículo en una revista especializada, transforma el conocimiento publicado en una contribución al esfuerzo por entender y controlar algún evento para dar respuesta a una necesidad o problema. El usuario de este conocimiento es el grupo de especialistas encargado de hacer útil la adquisición lograda. El beneficiario de la aplicación o tecnología resultante es el entorno social donde surgió la necesidad. Y finalmente, a pesar de la contribución realizada, nosotros sólo llegamos a ser el objetivo del último eslabón de esta cadena productiva que es la comercialización.


La Física se encuentra en todas partes y puede engendrar nuevos conocimientos y aplicaciones prácticas en un entorno social, independientemente de su nivel de desarrollo. Lo importante es desarrollar el ciclo completo de generación del conocimiento, a partir de sus necesidades y problemas. Por ejemplo: todo ciudadano enfrenta en Colombia el problema de la calidad de los productos nacionales que ofrece el mercado. Si un individuo desea comprar en una ferretería 50 tornillos con sus respectivas tuercas, deberá probarlos y seleccionarlos por parejas para cerciorarse de que cada tuerca enrosque correctamente por lo menos en un tornillo. ¿Por qué? En un país desarrollado no sucede esto. Con absoluta seguridad el problema no es de



Puente peatonal.

estamos equivocados. El problema radica seguramente en el proceso de producción, en el manejo de la precisión, los errores y las tolerancias, en la selección del material, en la homogeneidad y propiedades mecánicas del mismo, en la producción de la materia prima, en los estándares de calidad, en el aseguramiento de la misma, etc. Todos estos temas constituyen espacios del conocimiento donde el físico puede contribuir a entender y controlar el problema, a adaptar eficientemente una tecnología o a generar ideas, con la certeza que sus resultados serán avalados en el ámbito nacional y, seguramente también en el internacional.

En conclusión, los físicos debemos seguir los pasos trazados por la Medicina y generar conocimiento a partir de la búsqueda de soluciones a las necesidades y problemas latentes en el sector productivo nacional. Sólo de esta manera, será posible lograr fundamentar el desarrollo del país en el conocimiento.



que se aprende
una
contribución
para
comprender
el mundo?

Dino Segura R.

*Escuela Pedagógica Experimental,
Bogotá, D.C., Colombia.
E-mail: apriori@multiphone.net.co*

Los problemas que se plantean aquí para el debate no nos pertenecen, sino en cuanto son prácticas que han sido interiorizadas como propias. La manera como funciona nuestra escuela es una herencia de hace siglos y comparte los mismos problemas que vive en todas partes la escuela occidental. Los fracasos universales de la escuela en cuanto a que no es un lugar para el conocimiento, ni para la convivencia para el desarrollo humano, han llevado a muchos a anotar que la escuela es anacrónica. ¿Será que como se dice (Colom y Melich, 1997), la escuela es moderna mientras los estudiantes son posmodernos? Sin embargo, las generalidades de esta situación problemática no pueden ocultar las

especificidades de nuestros contextos. Una cosa son los contextos europeos y norteamericanos y otra, nuestras condiciones. En nuestro medio tenemos muchos jóvenes que desean ser científicos, tendencia que no se encuentra en los países altamente desarrollados; en nuestro país existe un saber ancestral inexplorado y una diversidad incomparable que podrían convertirse en fuentes de conocimiento y desarrollo alternativos. Estas especificidades pueden traducirse en avenidas de posibilidad si logramos evadirnos de paradigmas limitantes y construir nuestras propias opciones de escuela, con sus metas, formas de trabajo y líneas de investigación convenientes.

Introducción

Las razones que tenemos para incluir la enseñanza de las ciencias y, en particular, la enseñanza de la física, en los planes de estudio se han expuesto muchas veces. Sin embargo, parece ser que tales consideraciones no se traducen en prácticas concretas si nos atenemos a los re-

sultados que se obtienen y se manifiestan en las quejas acerca de lo que la escuela no logra y en las añoranzas por lo que podría lograrse. En vez de referirnos a los especialistas para aproximarnos al tema, consideremos lo que se responde cuando, a manera de taller, se pregunta a los maestros: ¿Para qué la ciencia en el currículo? Ellos señalan que lo que se desea es que los estudiantes:

- Logren un acercamiento a (o un manejo de) las disciplinas científicas,
- Tengan herramientas para comprender el mundo en que vivimos,
- Se preparen para responder por las evaluaciones (censales, de estado, etc.),
- Tengan elementos para tomar decisiones ante las opciones que plantea el mundo contemporáneo, por ejemplo en su vida como ciudadanos,
- Logren elementos de la cultura científica, para responder mejor a las exigencias de la vida y del país en su perspectiva de ciudadanos,
- Se entrenen en la habilidad para elaborar modelos de explicación y
- Elaboren fundamentos para afianzar la identidad nacional y la confianza en sí mismos y en sus posibilidades.

Al estudiar estas opiniones, nos encontramos con que algunas de las razones se refieren claramente a metas, mientras otras tienen que ver con lo que se logra en los procesos. Por ejemplo, los tres últimos enunciados (que logren elementos de la cultura científica, se entrenen en la habilidad para elaborar modelos de explicación o elaboren fundamentos para afianzar la identidad nacional y la confianza en sí mismos), son aprendizajes relacionados más con los caminos y formas de aprender que se siguen, que con metas explícitas de la clase. Atendiendo a esta distinción sólo nos referiremos por ahora a los cuatro primeros enunciados y dejaremos los comentarios de los otros para más adelante. Consideremos estos objetivos más de cerca.

1. Por una parte, es deseable que los individuos comprendamos el mundo en que vivimos. Una mayor comprensión nos permitirá tener menos zozobras e incertidumbres, poder anticiparnos a los acontecimientos, remplazar una mirada inspirada en el azar y la magia por otra en la que las cosas y acontecimientos se articulan comprensivamente en un todo racional. Aun más, en la sociedad en que vivimos, en la que los artefactos tecnológicos inundan la cotidianidad y aparecen a diario nuevas formas de comunicación y de comportamiento, la comprensión es tal vez lo único que nos permitirá oponernos a miradas fatalistas. De otra parte, es posible que los seres humanos que están dispuestos a preguntarse el por qué de los acontecimientos y a embarcarse en los búsquedas

de explicación correspondientes, estén mejor dotados para ser transformadores de la realidad que quienes simplemente aceptan lo que sucede y automáticamente se adaptan a ello.

2. En segundo término, en cuanto somos seres sociales que vivimos o queremos vivir en el ámbito de la democracia, la sociedad misma nos exige que tomemos decisiones acerca de la vida, del presente y del futuro. Y esas decisiones que nos exige la sociedad están cada vez más irrigadas por los desarrollos en la ciencia y la tecnología. Tal es el caso de decidir sobre los consumos y las fuentes de energía, la clonación, los recursos naturales, la contaminación o, incluso, las relaciones afectivas. Para optar por decisiones que correspondan ética, estética y cognitivamente a lo que queremos que sea nuestro mundo, requerimos de una formación que lo posibilite. La formación científica puede ser una contribución para ello.

3. Con respecto a la introducción en las disciplinas científicas, tenemos las dudas que surgen del significado de las disciplinas. El asunto es que ordinariamente como disciplina científica se entienden los contenidos de los textos. De acuerdo con tal acepción saber las fórmulas y ecuaciones y saberlas utilizar para solucionar los problemas de final de capítulo, que son usuales en los libros de texto, es sinónimo de "manejar las disciplinas". Así, de quien exhibe tales cualidades se dice que sabe física o biología o química. A nuestro juicio ese significado toma en consideración solo una parte de lo que son las disciplinas. Sobre este punto volveremos luego.

4. Finalmente, con respecto al tercer objetivo, que en algún momento podemos pensar que no existió, o no era tan determinante, debemos decir que aunque es lamentable, realmente es el elemento que en la mayoría de los casos orienta el trabajo del maestro: se enseña la física para que los estudiantes den cuenta de las evaluaciones; inclusive, en algunos casos, la clase se convierte en un espacio de adiestramiento para ello. Ahora bien, como las pruebas están elaboradas pensando en la solución de problemas en el contexto disciplinar, para esta opción son válidas las consideraciones que plantearemos con respecto al significado de las disciplinas y su relación con el mundo en que vivimos.

Las disciplinas

Es conveniente hacer algunos comentarios acerca de las disciplinas, por dos razones. En primer lugar, porque tanto la enseñanza, en la perspectiva de las evaluaciones, como la que se orienta a la formación disciplinar se centran en las disciplinas; por otra parte, mientras se entien-

su dominio no contribuirá a las metas que planteamos en los puntos 1 y 2 del apartado anterior, esto es, a la comprensión y a la capacidad para tomar decisiones. Es más, pueden convertirse en elementos antagónicos.

La distancia entre las disciplinas y el mundo en que vivimos

Anotemos, para comenzar, que los fenómenos y objetos que se estudian en una disciplina, no pertenecen al mundo en que vivimos, sino al mundo de la disciplina, por ejemplo, al mundo de la Física.

En el ámbito de nuestra experiencia no existen péndulos simples, ni movimientos en ausencia de fuerzas externas, ni tubos de Bernoulli, ni caídas libres, ya que los fenómenos que se presentan son mucho más complejos.

El asunto podría plantearse sintéticamente de la siguiente manera: cuando los físicos emprendieron el estudio del péndulo identificaron las variables de las que dependía su periodo de oscilación y con ellas armaron una ecuación para dar cuenta de su movimiento. Una vez lograda tal ecuación, cayeron en la cuenta de que la matemática disponible no era suficiente para solucionarla. Comenzaron entonces a eliminar términos, hasta lograr una expresión cuya solución matemática era posible. Esa expresión no correspondía al péndulo que existe en el mundo de la experiencia cotidiana, sino a un péndulo sin fricción, sin resistencia del aire, que oscilaba con amplitudes muy pequeñas y cuya cuerda es inextensible, entre otras diferencias. A este péndulo, al que puede darse un tratamiento matemático riguroso y que como consecuencia posee soluciones, se le denominó péndulo simple. Este es el péndulo que existe en el ámbito disciplinario, pero no en nuestra experiencia cotidiana.

Un proceso semejante se da en todos los objetos de estudio de la física. La ecuación de Bernoulli, por ejemplo, se refiere al flujo estacionario, laminar, no turbulento de un fluido incompresible. Es claro que tal flujo no existe en la vida diaria, pero es el que se puede estudiar con la matemática que poseemos. Tal es, entonces, el fluido que se estudia y que se encuentra en la disciplina.

A propósito, I. Stewart (2001) anota:

D'Alembert llevó a cabo un análisis general de la cuerda vibrante: suponiendo que la amplitud de la vibración es pequeña (para eliminar términos indeseables de las ecuaciones, una práctica a la que retornaremos después), escribió una ecuación diferencial que debía ser satisfecha

En parte, lo que queremos afirmar es que los objetos que existen en el ámbito disciplinario no son aquellos con los que nos encontramos en nuestra vida diaria. Esta afirmación que puede parecer evidente para muchos, se olvida con frecuencia, hasta tal punto que muchos maestros tratan de inventar montajes de laboratorio para “demostrar” o “ilustrar” las afirmaciones de la teoría, esto es, de la disciplina y tal derrotero, conduce, como lo ilustramos en otra parte (Segura, 1993) a que en los montajes se escondan a los ojos de los estudiantes, las variables no descadas, con el resultado pernicioso de hacer creer que el objeto de estudio de la física como disciplina, son los objetos y fenómenos de la experiencia cotidiana (o del laboratorio).

Las relaciones entre las disciplinas y el mundo en que vivimos

Lo que hemos afirmado hasta aquí, con relación a la necesidad de diferenciar los objetos que existen en los dos mundos, no puede llevarnos a pensar que existe una total independencia entre ellos. Si bien ellos son distintos, las intenciones de los físicos al inventar los objetos de la física apuntan a lograr explicarse el mundo de los fenómenos cotidianos para conseguir, a la vez, la comprensión y la posibilidad de anticipación y de utilización de ellos. Podría decirse que piensan mas o menos de esta manera: no entendemos cómo funcionan las cosas de nuestra experiencia, pero puede ayudarnos a comprenderlo el que sepamos cómo funcionan los fenómenos que hemos construido y que son una versión simplificada de ellos. En tal sentido, no sabemos cómo funciona el péndulo concreto que oscila delante de mí, pero me puede ayudar a comprender el asunto el que sepa cómo funciona un péndulo simple.

Por otra parte, para la elaboración del objeto físico, son absolutamente necesarios los datos de la experiencia. Entre el objeto que se construye y el objeto que tenemos al frente, existen las denominadas relaciones de inteligibilidad. Para que comprendamos el péndulo simple utilizamos el mismo lenguaje con que describimos el péndulo de nuestra experiencia. Hablamos entonces de período, frecuencia, oscilación, etc. y tales términos poseen sentido cuando nos referimos al péndulo simple, porque los hemos elaborado a partir de nuestras experiencias con el péndulo de nuestra cotidianidad. El lenguaje natural es entonces el portador de significados para el estudio de los objetos físicos. Y aquí suele presentarse otra dificultad cuando no estamos atentos a la existencia de los dos mundos y a sus diferencias. El caso es que algunos físicos llegan a involucrarse de manera tan íntima con sus objetos, que pretenden que el lenguaje de la cotidianidad

En parte, lo que queremos afirmar es que los objetos que existen en el ámbito disciplinario no son aquellos con los que nos encontramos en nuestra vida diaria.

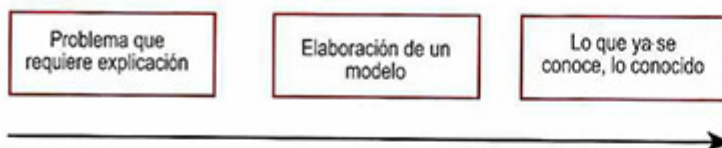


Figura 1.
La explicación al problema se elabora a partir de lo que ya se conoce. El modelo sin embargo no es un reflejo de la situación que se estudia, es más bien una construcción apropiada y conveniente.

posea los significados precisos y encasillados del lenguaje de la disciplina. De ahí que, para situaciones cotidianas, el maestro insista en que “recuerden que sólo existe trabajo, si existe una fuerza en la dirección del desplazamiento”. Y esto se afirma olvidándose de que los términos trabajo, fuerza y desplazamiento (al menos estos) poseen significados diferentes en los dos mundos (*figura 1*).

Lo que hemos dicho con respecto al péndulo simple es válido para la comprensión de todos los términos en las disciplinas, que son creaciones de ellas y que han resultado tan exitosos que llegamos a pensar que poseen existencia efectiva en el mundo de nuestra cotidianidad. Es el caso de las moléculas y su movimiento caótico o de las fuerzas intermoleculares. Tal imagen del mundo ha llegado a ser tan pintoresca y útil para explicar, que casi nadie duda de su existencia “real”; de tal suerte, que podríamos pensar en personas que imaginan que poseyendo los instrumentos apropiados, podrían llegar a las moléculas haciendo divisiones sucesivas. La referencia que hacemos a la Teoría Cinética de los Gases (TCG) es ilustrativa también para enfatizar en los vínculos que existen entre los comportamientos que asignamos a los entes que imaginamos al inventar un modelo y nuestra vida cotidiana. Si se imaginan las moléculas como lo propone la TCG es porque tal forma de comportamiento puede imaginarse a partir de lo que se ha vivido en nuestra experiencia de todos los días: Imaginar “un enjambre de partículas que se mueven caóticamente” seguramente no hubiera sido posible si no hubiésemos conocido en el mundo de nuestra experiencia los enjambres de abejas (Segura, D. 2002). Es así como nuestra experiencia cotidiana encapsulada en el lenguaje, permite la teorización, al hacer útiles (y posibles) las metáforas que se construyen.

Con respecto a ésta aseveración, es conveniente reflexionar sobre las dificultades adicionales que resultan en el aprendizaje de la ciencia por el uso que se hace, en los modelos de explicación, de imágenes, que en el momento en que fueron propuestas, eran de la vida ordinaria pero que para nuestros estudiantes ya no lo son. Esta consideración es similar a la que se plantea cuando los modelos (y con ello las teorías) que son acuñadas en un entorno cultural muy bien determinado, se llevan de una sociedad a otra en la cual las metáforas no son válidas.

Las relaciones entre las disciplinas y el mundo en que vivimos no se reducen a la flecha que apunta del mundo a la teoría. Vale la pena considerar también, la dirección

inversa, esto es, la flecha que va de la teoría al mundo. Y aquí nos referimos a lo que los filósofos denominan las reglas de correspondencia (Hempel, 1976).

Volvamos al proceso que se sigue para la elaboración de un modelo. Se tiene como punto de partida un problema, lo que puede sintetizarse brevemente diciendo que existe algo que requiere una explicación. En la ciencia, la explicación se logra cuando se inventa un modelo cuyo funcionamiento tiene consecuencias similares al fenómeno que queremos explicar. Se produce así un fenómeno en el ámbito disciplinar que funciona o se comporta de manera similar al que motivó las búsquedas y que pertenece a nuestro mundo de la experiencia (Maturana, H. y Varela, F., 1990).

Ahora se establecen las relaciones entre las variables que se han introducido en el modelo y sus comportamientos y esas relaciones son lo que se denominan las reglas de correspondencia.

En la *figura 2* se ilustra la manera como el modelo da cuenta del fenómeno que se quería explicar. Es cuando se dicen expresiones como: “el movimiento del proyectil describiría una parábola si se cumplieran estas y estas condiciones”. Como en los lanzamientos usuales el movimiento no se da en tales circunstancias, entonces no podemos esperar que en la vida cotidiana tengamos parábolas, pero sí trayectorias muy parecidas a ellas. Estos procedimientos son comunes en la ingeniería en donde la solución a los problemas es posible por la existencia de tablas empíricas y no son un asunto exclusivo de las ciencias básicas.

Si no se establecen las reglas de correspondencia, la teoría que se ha inventado no nos sirve para explicar lo que queríamos; si ese es el caso, la ciencia que se enseña y se aprende es completamente inútil para uno de nuestros objetivos, la comprensión.

Hasta aquí hemos adelantado una discusión en torno a las disciplinas y su relación con nuestra cotidianidad para, a partir de ello, hacer algunos comentarios orientados a establecer las posibilidades de la clase de física y así dar cuenta de los objetivos planteados al comienzo.

Si por física (la disciplina científica) entendemos el conjunto de modelos y formas de explicación que se han propuesto y aceptado por la comunidad de físicos, conjuntamente con las estrategias de razonamiento (procedimientos), ecuaciones y sintaxis algebraica o en general, la matemática que se utilizan para explicar la realidad,

lo que Khun (1973) denomina los ejemplares y acertijos, esto es, los problemas típicos de la disciplina (por ejemplo, el plano inclinado) y nada más, es muy pobre la contribución que se hace para que quien se forma en esta disciplina pueda a partir de ella comprender el mundo en que vivimos y, por supuesto, para opinar y decidir ante problemas vivenciales.

Antes de cerrar, con consideraciones críticas y la búsqueda de alternativas, veamos los otros objetivos planteados en un principio, que como ya lo dijimos, tienen que ver más con los procesos y el ambiente de la clase.

Los procesos

Como lo anotamos al comienzo, entre las metas de la clase de ciencias, los maestros plantean que ésta debe contribuir a una transformación cultural, esto es, proponen que las conductas y formas de proceder de quienes de verdad se forman en las ciencias deben estar irrigadas por una cultura científica. También se estima que con la clase de ciencias se deben lograr habilidades para elaborar modelos de explicación y fundamentos para afianzar la identidad nacional y, finalmente los estudiantes deben construir confianza y seguridades en sí mismos y en sus posibilidades.

Estas metas se relacionan más con aspectos caracteriológicos, esto es, con la formación del self, que con los contenidos explícitos que se buscan con la clase. Es por ello pertinente considerar los planteamientos de Gregory Bateson (1998) con respecto a la existencia, en cualquier aprendizaje, de muchos otros aprendizajes. En el texto, él introduce su exposición con una referencia a la antropóloga M. Mead quien, dice, ha afirmado que:

“Hemos aprendido en nuestra inserción cultural a clasificar las conductas en ‘fines’ y ‘medios’, y si seguimos definiendo los fines como separados de los medios y aplicando las ciencias sociales como medios crudamente instrumentales, usando las recetas de la ciencia para manipular personas, llegaremos a un sistema de vida totalitario, no a un sistema democrático”. La solución que ella propone es que miremos la “dirección” y los “valores” implícitos en los medios, en vez de mirar más allá de una meta definida en un plan de acción y reflexionar sobre

esta meta preguntándonos si justifica los medios empleados en la manipulación. G. Bateson, citando a M. Mead. (Bateson, 1998,188).

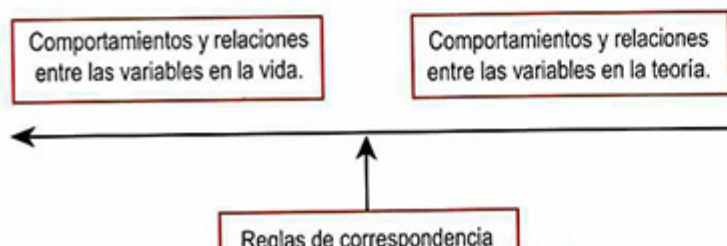
La consideración es pertinente debido a que las preocupaciones de los maestros y, en general, del sistema educativo porque se logren los aprendizajes que proponen los planes de estudio o buenos resultados en las evaluaciones, han llevado a que se utilicen o apliquen los medios que sean para conseguirlos. Y esta aplicación “inocente” y aparentemente neutral de ciertos medios, centrada en la consecución de los fines, puede estar proyectando una formación que no es la que en últimas se desea. En este sentido, es importante puntualizar, que más que físicos, lo que se forman en nuestras aulas son personas y ciudadanos. Es por eso, como lo afirma Mead, que debemos habituarnos a buscar la “dirección” y el “valor” en el acto escogido y no en las metas definidas.

De nuestra experiencia, sabemos que cuando se soluciona un crucigrama o un rompecabezas, por ejemplo, no sólo se resuelve el problema concreto que nos ocupa, esto es, el crucigrama o el rompecabezas específicos sino que, además, estamos aprendiendo a resolver rompecabezas y crucigramas.

Sabemos, además, que este aprendizaje es más duradero y que puede ser más importante que haber resuelto el acertijo. Bateson (op. cit.) denomina a los aprendizajes que se relacionan con las metas, protoaprendizajes y a los que se relacionan con los medios y caminos que se siguen, deuteroaprendizajes. En estos términos, nos referiremos a los deuteroaprendizajes que acompañan las actividades en la clase de ciencias y a las posibilidades que se vislumbran desde allí para la formación de una actitud científica, concepto que de alguna manera sintetiza los llamados que anotábamos por la formación en la cultura científica, la habilidad para elaborar explicaciones y modelos y las seguridades y sentido de protagonismo que logren los estudiantes.

Lo que queremos mostrar es que las prácticas usuales de enseñanza y sus correspondientes estrategias de aprendizaje, desencadenan deuteroaprendizajes indeseables para los propósitos explícitos de la clase. En otras palabras, los medios y caminos que se eligen para cumplir con las metas, en términos de exigencias curriculares, evaluaciones y motivaciones externas y la repetición y memorización, conducen a formas de “aprender a aprender” de muy bajo perfil si lo que se busca es consolidar confianza en sí mismos a través del protagonismo de los sujetos involucrados. Además, en cuanto las razones del aprendizaje y el significado del conocimiento son externos, una y otra se devalúan hasta tal punto que al avanzarse en la escolaridad, las razones que se aducen para justificar lo

Figura 2.
El modelo puede explicar en la medida en que sea posible darle significado en el mundo de la experiencia a las entidades y relaciones que se postulan en el mundo de la teoría (en el modelo)



que se enseña y lo que se debe aprender son cada vez más ajenas a los individuos y a sus urgencias de vida.

Refirámonos, para comenzar, a las prácticas usuales de enseñanza, centradas en las concepciones de transmisión. En este caso, cuando la repetición y la memoria son las formas privilegiadas de aprendizaje en el aula, los estudiantes no solo aprenden lo que quieren aprender, esto es los propósitos de la memorización, sino que aprenden a aprender.² Sin duda, una de las metas más importantes de la clase es que los estudiantes aprendan a aprender. Sin embargo, existen muchas formas de aprender. Se puede aprender haciendo, inventando, por descubrimiento, por intuición, cometiendo errores (en procesos de ensayo y error), etc. Entre todas estas posibilidades, el aprendizaje de más bajo nivel es, tal vez, el que se sustenta en la repetición y la memoria, fundamentalmente porque en este tipo de aprendizaje el individuo que aprende es completamente pasivo frente a lo que aprende, ya que los contenidos están ahí, independientes de la vida del sujeto, para ser aprendidos por él. Esto es lo que sucede cuando la enseñanza se centra en el aprendizaje de las disciplinas, como las caracterizamos inicialmente; en este caso, éstas están perfectamente definidas para ser aprendidas: las teorías y explicaciones, los principios, los procedimientos, los algoritmos y, por supuesto, los ejercicios y los problemas. Así pues, centrar la clase en el aprendizaje de estas nociones (y destrezas) es, no solamente estar viviendo el mundo más bajo de los aprendizajes posibles, sino ratificar en la práctica que los estudiantes no piensan. En otras palabras, lo que se aprende tiene que aprenderse independientemente de lo que se piense, de las explicaciones que puedan proponerse, de las experiencias anteriores de cada uno, etc.

Para complementar este cuadro lamentable, anotemos que de acuerdo con algunos educadores (y propuestas universales, como ciertas variedades de constructivismo (Novack, 1990) sí hay que tener en cuenta el pensamiento de los alumnos, sus formas de explicación, etc., con el convencimiento de que los estudiantes sí piensan, pero que piensan mal, con lo que el paradigma escolar se centra en lograr un cambio conceptual, esto es, en derrotar las explicaciones espontáneas y erróneas de los estudiantes e instaurar las explicaciones científicas (las del texto). Y esta convicción puede conducir en situaciones concretas a que en la dinámica de la clase cuando se pida a los estudiantes sus explicaciones ante circunstancias cotidianas, se rehúsen a opinar, diciendo: ¡para qué lo hacemos si siempre pensamos mal!

Detrás de este planteamiento didáctico se encuentra, por una parte, el desconocimiento de lo que es la ciencia como actividad (por ejemplo la gran complejidad que

norancia con respecto a los niveles de elaboración y eficacia del pensamiento de los niños, que entre otras cosas no es muy diferente del pensamiento de los científicos, sólo que cuentan con experiencias colectivas y personales distintas y con intenciones y lenguajes también diferentes (Arca M. y otros, 1990). Es también sorprendente la manera como se argumenta la precariedad del pensamiento de niños y jóvenes: al énfasis que se hace en “los errores conceptuales” se añade que eso se debe a que se apoyan en una metodología “de la superficialidad” y que es por ello que ... 20 siglos después... los estudiantes proponen explicaciones aristotélicas, ¡como si Aristóteles pensara mal! Finalmente, lo que se consigue con estos planteamientos es que se coloque el pensamiento científico en una posición de privilegio frente a otras formas de pensamiento, y a quienes lo practican como personas especiales, con la consecuencia de que la ciencia no es para una persona común y corriente.

Con respecto a las consideraciones anteriores anotemos que cuando se propone a los estudiantes que expliquen un acontecimiento que está sucediendo ante sus ojos, tal suceso pertenece a la vida cotidiana y no a la teoría; de tal suerte que las explicaciones posibles tienen sus orígenes en la cotidianidad, en la experiencia personal y se dan en el lenguaje de todos los días. Juzgar, entonces, las explicaciones de los niños desde la disciplina constituida es problemático por varias razones. En primer lugar, una cosa están viendo los estudiantes y otra el maestro, quien posiblemente asume que los acontecimientos deben darse de acuerdo con la teoría. Por otra parte, los términos que se utilizan en los discursos poseen contextos muy bien

Imagen:
Experiencia 2005.



definidos. Así que no puede asignársele al discurso fresco y espontáneo del estudiante un tratamiento semántico desde la teoría (que además él está muy lejos de haber construido). Finalmente, al afirmar sistemáticamente que está equivocado, lejos de reconocer la importancia y el mérito de haber logrado articular una explicación, se le crean inseguridades en sí mismos y un distanciamiento ante la ciencia.

Tenemos pues dos consecuencias que cuestionan estas prácticas (transmisionistas): por una parte, el que se instaure de manera privilegiada el aprendizaje memorístico como prototipo de lo que es aprender y, por otra, que en el proceso, el individuo se sitúe en una posición de pasividad. Ésta no es resultado sólo de la práctica que criticamos, sino también de la organización de los contenidos, esto es, de los planes de estudio. En condiciones normales, el estudiante debe aprender lo que está determinado que aprenda y esto se da aunque existan interrogantes e inquietudes de parte de los estudiantes y a pesar de que, como consecuencia de los procesos y actividades de aula, resulten preguntas u otros intereses. Sucede con frecuencia que como estas preguntas pueden desviar el interés del maestro y las metas de la clase, se convierten en preguntas indeseables. Así, la tensión emotiva que ca-



racteriza las búsquedas en la ciencia no existe en el aula, hasta tal punto que si se le pregunta al niño por qué hace lo que hace, responderá que es un mandato del maestro o del texto, pero no dirá que con ello logra comprender algo que de verdad lo cuestiona o consiga resolver una pregunta que es su propia pregunta; en otras palabras, no es posible que se dé la apropiación por lo que se hace.

Para que el proceso funcione en estas circunstancias,

al proceso. Si no se busca o se trabaja por gusto, esto es, impelido por sus propios intereses, deberán existir otros y es por ello que nos encontramos entonces con que los estudiantes estudian y “aprenden” por lo que recibirán a cambio: calificaciones, puntajes en las pruebas de estado, promociones de un grado a otro o reconocimientos en términos de felicitaciones y regalos, etc.

Así, el proceso termina pervertido, el conocimiento ya no es la meta, todo lo que se aprende (como protoaprendizajes) pertenece al ámbito de la información. En medio de esto, el pensamiento propio no es importante, ya que lo que debe memorizarse es lo que pensaban otros.

Estos aprendizajes son el resultado del ambiente de la clase y de las actividades que se dan en el camino del aprendizaje, pero no son metas explícitas del aprendizaje. Que los muchachos logren seguridades y confianza en sí mismos, que conciban la disciplina, en nuestro caso, la física, no como una colección de resultados sino como una actividad, que logren la habilidad para enfrentar un problema mediante la elaboración de modelos de explicación o para refutar una propuesta mediante argumentos lógicos y propios de la disciplina, no son asuntos que se aprenden a partir de una exposición. Se trata del resultado de experiencias vividas.

De la misma manera, el llamado que nos hace J. L. Villaveces (2002) sobre la necesidad de formar a nuestros estudiantes en una cultura científica, no puede ser el resultado de exposiciones y conferencias, sino de prácticas reiteradas y sistemáticas de trabajo y de acción. Si queremos que antes de emprender una tarea o un proyecto exista una actividad exigente de diseño y planeación y que la tarea se enfrente con pleno convencimiento y con conocimiento de las posibilidades y de los riesgos que se corren, la vida de la escuela debe ser así. Si queremos que los estudiantes sientan que la vida es una construcción individual y no un permanente choque azaroso con la realidad, debemos construir en la escuela situaciones y actividades que posibiliten la construcción de este mundo.³

Consideraciones sobre la enseñanza

Los planteamientos anteriores ponen en duda la conveniencia de muchas prácticas que se han establecido tradicionalmente y que posiblemente tienen sus orígenes en una racionalidad moderna convertida en evidencia. Entre dichas prácticas mencionamos las siguientes:

- Se piensa que los resultados de la ciencia son importantes y deben aprenderse porque son verdades definitivas acerca del mundo en que vivimos.

A nuestro juicio las cosas son distintas. Los resultados de la ciencia son importantes en cuanto nos ayudan

a entender lo que sucede, esto es, en cuanto podemos utilizarlos para explicarnos el mundo, anticiparnos a los acontecimientos, planear, diseñar, etc.

- Suele afirmarse que lo más importante de la ciencia son los resultados, esto es, teorías, fórmulas y procedimientos de cálculo.

Nosotros pensamos que entre los asuntos verdaderamente importantes está la manera como se logra enunciar una teoría a partir de lo que sabemos y cómo, con su ayuda, podemos luego orientar nuestras acciones cuando queramos comprender y modificar el mundo.

- Con frecuencia se afirma que la actividad científica es ajena a la imaginación y la creatividad, es más, que está sujeta a la aplicación sistemática de un método.

Lo que nos enseña la historia de la ciencia es que existen muchos momentos en la práctica de la ciencia. Cuando tenemos un conjunto de fenómenos o situaciones inexplicadas, la invención de un modelo que nos ayude a comprender es una tarea tan imaginativa y plena de creatividad como el arte; cuando tenemos un candidato a explicación (hipótesis) y queremos someterlo a la validación, existen procedimientos muy bien definidos por la comunidad científica para aceptarla como explicación científica. En todo momento se articulan de manera íntima aspectos como la disciplina de trabajo, el compromiso con lo que se hace y la pertenencia a un colectivo o comunidad.

Ahora bien, con respecto al aprendizaje, existen también ciertas diferencias de opinión.

En primer lugar, sin cuestionar la importancia que tiene el ejercicio de la memoria, creemos que en la escuela debe propenderse por aquellos aprendizajes en los que quien aprende sea más activo, esto es, más comprometido y con un papel protagónico en las tareas que realiza.

En segundo lugar, el compromiso de la escuela desde la perspectiva disciplinaria está en lograr: (1) que los estudiantes aprendan a acceder a la información disponible (y en particular, a los enunciados disciplinarios) y consigan utilizarla en el proceso de comprensión y aplicación al mundo de la experiencia y (2) que en el proceso de elaboración de explicaciones comprendan el carácter de las disciplinas y su distancia y provisionalidad con respecto al mundo de la experiencia.

En tercer lugar, la consecución de metas como la actitud y la cultura científicas, por una parte, y la seguridad

logran en los procesos (en las dinámicas de aula) y en el ambiente educativo que se logre construir en la escuela.

Finalmente, mientras para algunos los proyectos de aula son una buena alternativa para aprender las disciplinas y, en particular, la física, para nosotros los proyectos de aula poseen su valor en sí mismos y el papel de las disciplinas es subsidiario al contribuir a su realización.

A nosotros nos parece que una buena manera de introducir al estudiante en el quehacer de la física es proponerle actividades interesantes (para el estudiante y para el maestro) que se conviertan en problemas genuinos, esto es, en verdaderos problemas que exijan para su solución la búsqueda de información. Así, las contribuciones de la imaginación, la experiencia y la conversación conducirán no solo a la solución del problema que originó las búsquedas, sino a la construcción disciplinaria, la vivencia

en hábitos de trabajo característicos de la ciencia, seguridades y protagonismo y, fundamentalmente, gusto y compromiso por lo que se hace (*figura 3*).

Las dificultades de todo esto se derivan del carácter transdisciplinario que suelen caracterizar los problemas cuando son genuinos y, por consiguiente, de la necesidad de enfoques interdisciplinarios para buscar las soluciones de los múltiples interrogantes que acompañan los procesos, para los cuales con frecuencia el maestro no tiene respuesta y de la necesidad de definir parámetros que permitan al maestro y al estudiante tener evidencias de aprendizaje.

Los obstáculos somos nosotros mismos, esto es, nuestras concepciones convertidas en conductas, que en todo momento tienden a orientar los procesos desde una actitud "profesoral". También son obstáculos las incertidumbres derivadas de los caminos inciertos que se emprenden puesto que éstos no poseen para nosotros el derrotero inflexible del plan de estudios. La comunidad que espera de la escuela los resultados, los problemas y las repeticiones de siempre.

Para ilustrar lo que estamos diciendo valga un ejemplo tomado de la clase de ciencias. Es muy distinto que los estudiantes estudien el ciclo del agua como se encuentra en los textos, es decir, como una postal con sus cambios de estado y fenómenos atmosféricos, que estudiar la ocurrencia de inundaciones por causa de la lluvia. Cuando nos dedicamos a investigar este fenómeno (esta calamidad

**Los obstáculos
somos nosotros
mismos; esto
es, nuestras
concepciones,
convertidas en
conductas, que
en todo momento
tienden a orientar los
procesos desde una
actitud "profesoral".**

Figura 3.
Las disciplinas contribuyen a las búsquedas propias del proyecto pero el proyecto en sí mismo es mucho más que una estrategia, sobre todo por sus retroalimentaciones en la construcción disciplinaria y el afianzamiento de valores y actitudes.



ciclo del agua como una necesidad en el ámbito de la explicación, sino con los procesos de erosión y desertificación, con los problemas de deforestación y de pobreza, etc. (Rodríguez y otros, 2001). Estudiar de manera aislada el ciclo del agua es vivir en la disciplina; estudiar las inundaciones es vivir el mundo de la experiencia. Mientras lo primero es neutral, lo segundo es comprometido. Mientras en el estudio del ciclo del agua tenemos que ver con generalidades, al estudiar las inundaciones tratamos con problemas específicos. En el primer caso se privilegia la disciplina, en el segundo se apunta a comprender el mundo y a elaborar posibilidades de intervención.

Esta propuesta es una alternativa divergente respecto de las prácticas usuales, de las cuales no todas son tradicionales. Por ejemplo, Alberto Christin, comentando los trabajos de Y. Chevallard en el contexto de la transposición didáctica, anota que:

...Como célula primaria está la terna didáctica. Esta terna está formada por un enseñante, un saber y un aprendiz.

Ya no se trata de una relación enseñante - alumno (o enseñanza aprendizaje) sino que se ha agregado el saber, como elemento constitutivo fundamental.

Eso lleva, como primera consecuencia, a la Didáctica de la Matemática como ciencia autónoma, y es aquí donde Chevallard establece ciertas normas epistemológicas como "toda ciencia debe asumir, como primera condición, pretenderse ciencia de un objeto, de un objeto real, cuya existencia es independiente de la mirada que lo transformará en objeto de conocimiento". (Christin, A. 2005).⁴

En este planteamiento podría verse la dinámica del aula en términos de las interacciones que surgen entre maestro, estudiante y conocimiento, en la cual el problema del sentido (en términos, por ejemplo, de situaciones de la experiencia) es una condición para llegar a las disciplinas. De acuerdo con lo que hemos anotado, la tríada estaría conformada en nuestra propuesta por el maestro, el estudiante y el problema de la experiencia en torno al cual se hacen las indagaciones. En este caso, surge el co-

nocimiento, en particular la disciplina, como resultado de las interacciones que se dan.

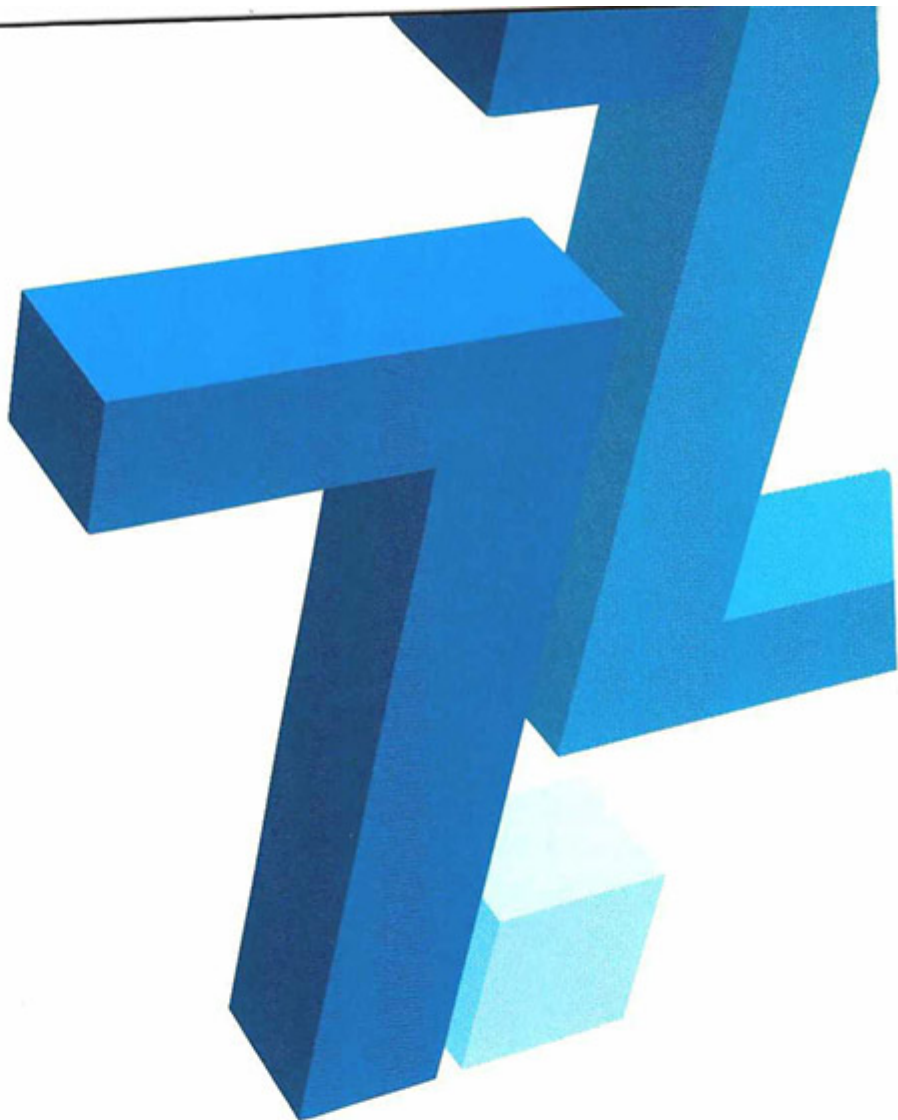
La distinción no es trivial; más bien nos parece que con ella se apunta a un problema crucial: ¿para qué la ciencia en la escuela? En este sentido nos reafirmamos en lo dicho: debe aprenderse física como una contribución para comprender el mundo, transformarlo y enriquecerlo con el propósito fundamental de hacer nuestras vivencias y las de nuestros semejantes más humanas y satisfactorias.

Bibliografía

- Aris M. y otros: *Enseñar ciencia*, Barcelona: Paidós-educador. 1990.
- Bateson G: *Pasos hacia una ecología de la mente, Una aproximación revolucionaria a la auto-comprensión del hombre*. Buenos Aires: Lohlé-Lumen. 1998.
- Colom A. y Melich J.: *Después de la modernidad. Nuevas filosofías de la educación*. Barcelona: Paidós. 1997.
- Chaparro C.I., Pedreros R.I. y otros: *Los sistemas dinámicos en la clase de física. En III coloquio Internacional sobre Currículo. Paradigmas contemporáneos sobre educación en América Latina*. Popayán, Memorias del evento. 2004.
- Christin A.: <http://serbal.pntic.mec.es/~%7cconozco11/christin.htm>. 2005.
- Díaz T.: *La interpretación histórico-cultural de la transposición didáctica como puente de emancipación del aprendizaje y la enseñanza*. Revista Praxis N° 3, Noviembre de 2003. www.revistapraxis.cl. 2003.
- Hempel G.: *Filosofía de la ciencia natural*. Barcelona: Alianza. 1976.
- Kuhn T.: *La estructura de las revoluciones científicas*. México, Fondo de Cultura Económica. 1973.
- Maturana, H, Varela, F (1990) *El árbol del conocimiento*. Madrid: Debate.
- Novack J. D.: *Constructivismo humano, un consenso emergente*. En *Planteamientos en Educación* Vol 1 No 1. Bogotá: EPE. 1990.
- Rodríguez J. y otros: *La interacción: hacia una alternativa para la transformación de la enseñanza en física primaria*. Inf. Final Proyecto de investigación (154-2000), Bogotá: Colciencias. 2001
- Segura D.: *La enseñanza de la física, dificultades y perspectivas*. Bogotá: Fondo Editorial, Universidad Distrital. 1993.
- Segura D.: *Enseñanza de la ciencia en Colombia*. En *Innovación y ciencia*. Vol X, No 3 y 4 Bogotá: ACAC. 2002.
- Stewart I.: *¿Juega Dios a los dados?* Barcelona: Crítica. 2001.
- Villaverde J. L.: *Cultura científica. Factor de supervivencia nacional*. En *Innovación y ciencia*. Vol X, No 3 y 4 Bogotá: ACAC. 2002.

Notas:

- Con los nuevos métodos que han surgido de la posibilidad de hacer múltiples operaciones recurrentes mediante los ordenadores, en procedimientos de simulación están surgiendo nuevas posibilidades y se están considerando en la solución variables hasta ahora excluidas. En otras palabras, estamos cambiando de modelos en la medida en que la matemática disponible nos permite otras cosas. Ver, por ejemplo, los trabajos en complejidad y caos adelantados en nuestro medio, Chaparro y otros, 2004).
- Al comentar los deuteroprocedimientos que acompañan a diferentes tipos de aprendizaje, Bateson (ibid, p. 200) anota que: "No cabe duda que para un pavloviano "puro" sólo sería imaginable un fatalismo muy limitado. Verá todos los acontecimientos como preordenados, y se concebirá a sí mismo como obligado por el destino sólo a buscar augurios, ya que no puede influir en el curso de los acontecimientos, como capaz tan sólo, partiendo de la interpretación de los augurios, de ponerse en un estado adecuadamente receptivo (por ejemplo mediante la salivación) antes de que ocurra lo inevitable."
- A nuestro juicio, muchos eventos ocurridos en la escuela pueden ser el resultado de la planeación colectiva, de tal manera que lo que acontece cotidianamente puede convertirse en la concreción de lo que hemos planeado, de aquello para lo cual nos hemos preparado, ya sea una salida pedagógica, una actividad, una celebración, etc. Si continuamos organizando la escuela para que el papel de los estudiantes sea sólo cumplir con lo que otros han dispuesto, ¿qué posibilidad tienen de sentirse protagonistas, de aprender lo que realmente les interesa o de realizar lo que verdaderamente los compromete?
- Aunque los planteamientos de la transposición didáctica se plantearon originalmente para la didáctica de las matemáticas, sus fundamentos generales se han proyectado a otras didácticas y disciplinas. Ver como ejemplo Díaz A. Tatiana, 2003.



interlat
g r o u p

Empresa latinoamericana enfocada a la investigación, desarrollo e implementación de Negocios Electrónicos innovadores y rentables en la Internet.

Miembros

eproyectos

www.eproyectos.biz

mercar[®]
nunca fue tan fácil

www.mercar.org



eMarketing para los dos
www.eplus2.com

LINUX  **LAT**

www.linuxlat.com

Avenida Carrera 15 No. 122-51 of 206.
Teléfono: 57(1) 6 29 08 06

www.interlat.org
info@interlat.org
Bogotá - Colombia

Algunos de Nuestros Negocios

DVDs  **COLOMBIA**
.com

www.dvdcolombia.com

Dupli
Kioskos

www.duplikioskos.com

Otoño Porteño

TANGO

Lento

Música de ASTOR PIAZZOLLA



**LA MENTE BUSCA COMPRENDER LA NATURALEZA
Y SE MARAVILLA ANTE SU BELLEZA.**

En la Fundación Mazda para el Arte y la Ciencia llevamos 15 años apoyando la inteligencia y el talento de los jóvenes colombianos, otorgando más de 189 becas para estudios de postgrado en Colombia o en el exterior, en las áreas de matemática pura y física teórica, y también para pregrado de música clásica en Colombia.

Mayor información: Fundación Mazda para el Arte y la Ciencia. Compañía Colombiana Automotriz S.A.
Calle 13 # 38-54. Teléfono 5960900, ext. 339. Bogotá, Colombia. www.mazda.com.co

