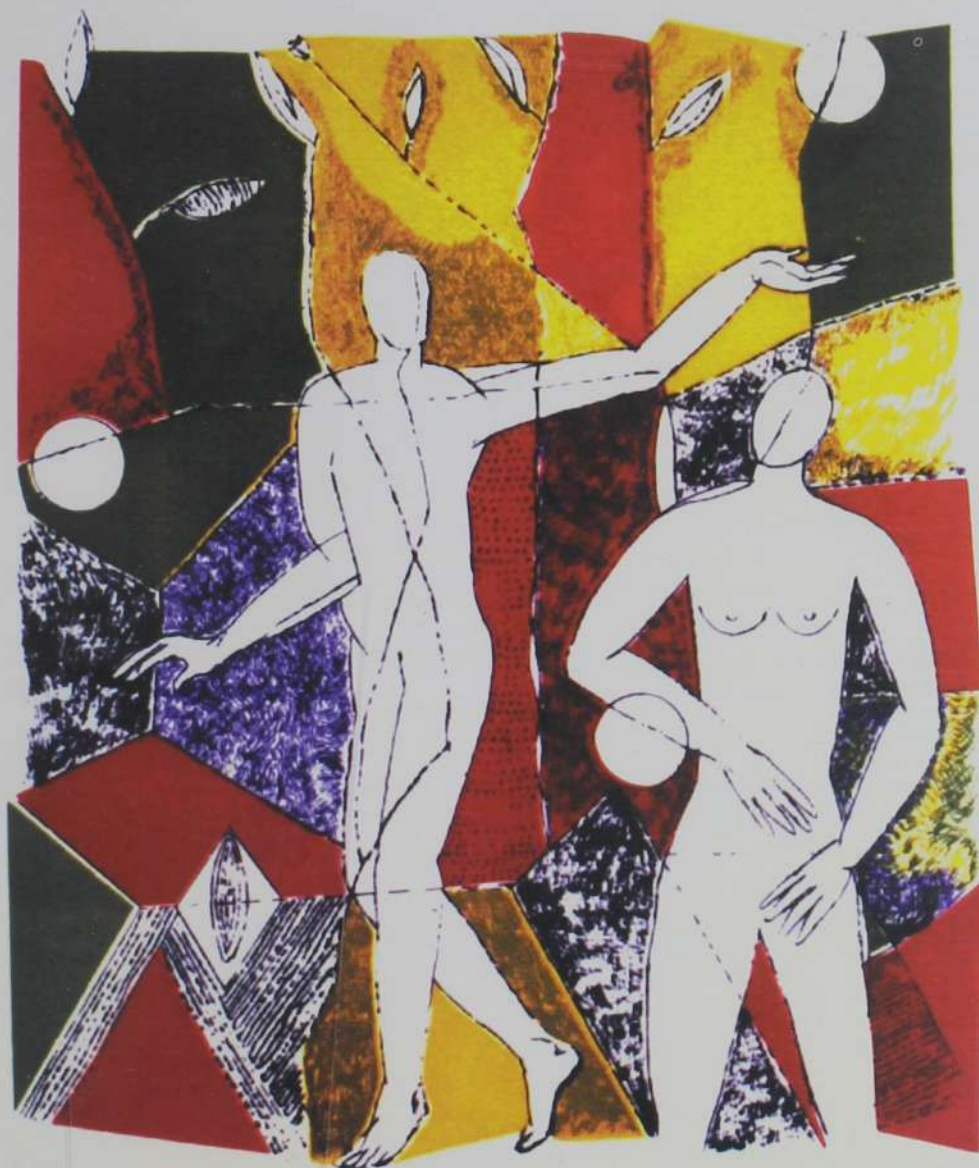


avance y PERSPECTIVA

ÓRGANO DE DIFUSIÓN DEL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I. P. N.



2005

Año Internacional de la Física





Alzheimer

De la normalidad a la enfermedad

CURSO INTERNACIONAL SOBRE DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DE LA ENFERMEDAD.

Del 2 al 4 de febrero, Hotel Fiesta Americana, Mérida, Yucatán.
Costo: \$ 1000 pesos.

CURSO NACIONAL SOBRE EL MANEJO DE LA DEPRESIÓN.

Del 30 de enero al 3 de febrero, Universidad Autónoma de Yucatán.
Costo: \$ 750 pesos.

CURSO NACIONAL PARA CUIDADORES DE ENFERMOS CON ALZHEIMER.

Del 30 de enero al 4 de febrero, Universidad Autónoma de Yucatán.
Costo: \$ 500 pesos.

VIGENCIA DE COSTOS HASTA EL 15 DE DICIEMBRE DE 2004.

► Para mayor información en los teléfonos: (55) 50 20 51 00/01
(55) 26 14 64 40

(55) 50 61 38 00 ex. 5105.

► o en los correos electrónicos: veronica.ramos@aesculap.com; elozanod@salud.gob.mx
rmena@fisio.cinvestav.mx; ehernandez@finku.uady.mx



Alzheimer



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV



Portada

De la serie "Hablar del silencio", 2003

La obra que se reproduce en las fotografías incluidas en este número es del pintor y escultor **Francisco Huazo**, a quien agradecemos su colaboración. arteobjeto@prodigy.net.mx

Avance y Perspectiva, órgano de difusión del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV, es una publicación trimestral. El número correspondiente a octubre-diciembre de 2004, volumen 23, Núm. 4, se terminó de imprimir en diciembre de 2004. El tiraje consta de 5,000 ejemplares. *Editor responsable:* Susana Quintanilla. Oficinas: Av. IPN No. 2508 esquina calzada Ticomán, apartado postal 14-740, 07000, México, D.F. Certificados de litud del título del No. 1001 otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Reserva de Título No. 577-85 otorgado por la Dirección General del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Publicación periódica: Registro No. 01603-89, características 220221122, otorgado por el Servicio Postal Mexicano. *Negativos, impresión y encuadernación:* Gama sucesores, S.A. de C.V., ingenieros civiles No. 94, delegación Iztapalapa, C.P. 09420, México, D.F. *Avance y Perspectiva* publica artículos de divulgación y notas sobre avances científicos y tecnológicos. Los artículos firmados son responsabilidad de los autores. Las instrucciones para los autores que deseen enviar contribuciones para su publicación aparecen en la última página de esta revista. Se autoriza la reproducción parcial o total del material publicado en *Avance y Perspectiva*, siempre que se cite la fuente. *Avance y Perspectiva* se distribuye en forma gratuita a los miembros de la comunidad del CINVESTAV y a las instituciones de educación superior. Suscripción personal por un año: \$150.00

CINVESTAV

Rosalinda Contreras Theurel
Directora General

José Mustre de León
Secretario Académico

Luis Alfonso Torres Gómez
Secretario de Planeación

Enrique Campesino Romeo
Secretario Administrativo

AVANCE Y PERSPECTIVA

Susana Quintanilla
Directora editorial

Gabriel López Castro
Coordinación de este número

Ricardo Salas & Frontespizio
Iván Ávalos
Diseño y cuidado de la edición

Verónica Arellano y Ma. Eugenia Ávila
Apoyo editorial

Josefina Miranda López
María Gabriela Reyna López
Captura

CONSEJO EDITORIAL

J. Víctor Calderón Salinas
Bioquímica

Luis Capurro Filograsso
Unidad Mérida

Marcelino Cerejido
Fisiología

María de Ibarrola Nicolás
Investigaciones Educativas

Eugenio Frixione
Biología Celular

Jesús González
Unidad Querétaro

Luis Herrera Estrella
Unidad Irapuato

Gabriel López Castro
Física

Luis Moreno Armella
Matemática Educativa

Ángeles Paz Sandoval
Química



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN
CINVESTAV

avance@mail.cinvestav.mx
T/F 57 47 70 76
www.cinvestav.mx/publicaciones

SUMARIO

AVANCE Y PERSPECTIVA

Presentación editorial 5

Gabriel López Castro

La influencia de Einstein en la física moderna 7

Hugo García Compeán y Tonatiuh Matos

Manipulando el mundo atómico: 19

Ingeniería Cuántica

Oscar Rosas-Ortiz

Descubriendo la estructura del universo 29

Gerardo Herrera Corral

Física de partículas elementales 41

Arnulfo Zepeda

Física estadística 47

José Miguel Méndez y Pedro González

MATICES

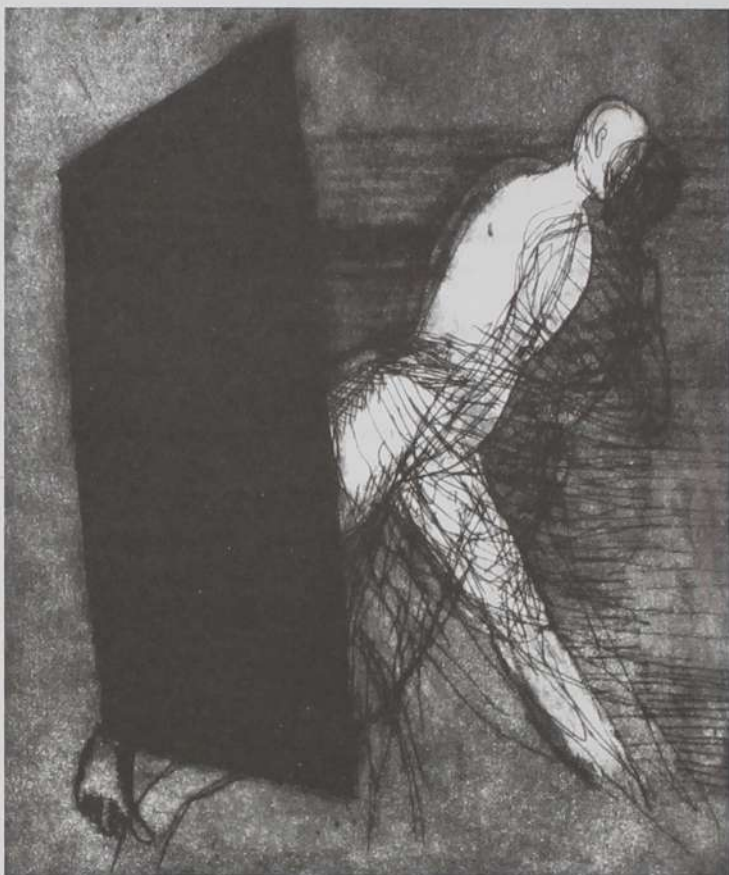
Termoelectricidad: refrigeradores y fuente de corriente 55

Gabino Espejo-López y Yuri Gurevich

¿Qué es realmente la turbulencia? 65

Jorge Javier Castro

NOTICIAS DEL CINVESTAV 73

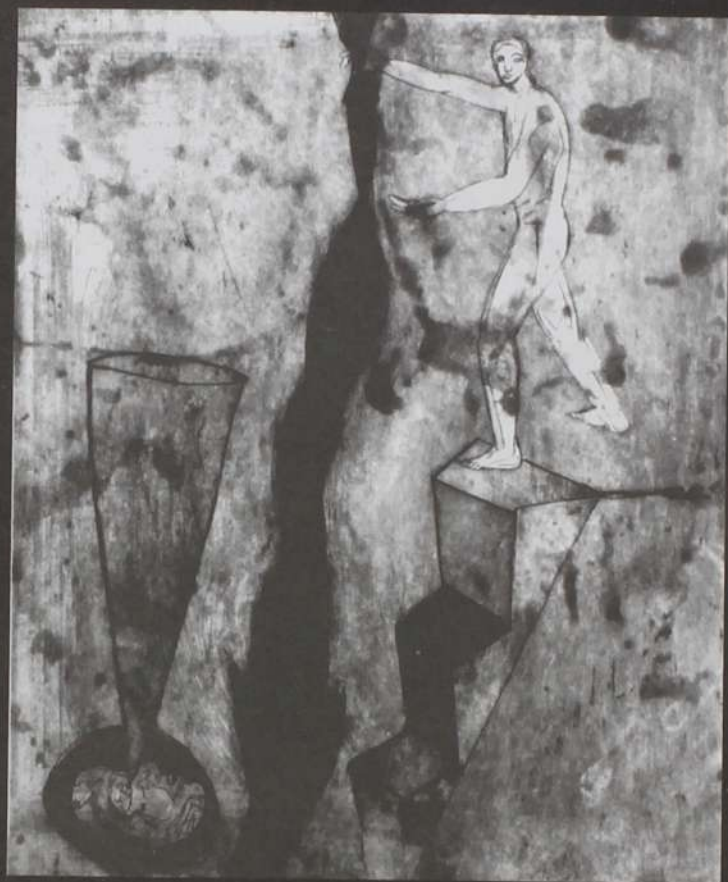


EN EL AÑO 1905, ALBERT EINSTEIN PUBLICÓ CINCO IMPORTANTES TRABAJOS que sentaron las bases de la física moderna en el siglo XX, a través de la elaboración de las revolucionarias teorías sobre la mecánica cuántica y la relatividad especial. Estas teorías, que son la base de nuestra comprensión física de la naturaleza desde su nivel subatómico hasta el cosmológico, revolucionaron los conceptos existentes de la física y condujeron en el siglo XX al desarrollo de nuevas ideas las cuales han dado lugar a impresionantes aplicaciones tecnológicas.

Para conmemorar el primer centenario de este *annus mirabilis*, la Organización de las Naciones Unidas decidió declarar al 2005 como el Año Mundial de la Física. Esta celebración tiene como propósito difundir el impacto de la física en el desarrollo de la ciencia y la tecnología y en nuestra vida cotidiana. Los individuos, museos de ciencia, departamentos de física, asociaciones científicas, y maestros alrededor del mundo, están invitados a participar en actividades que tengan como fin cumplir estas expectativas. La información de un sinnúmero de eventos que tendrán lugar durante el año 2005 puede ser consultada en la página de internet <http://www.physics2005.org>.

El Departamento de Física del CINVESTAV se une a esta celebración con la organización de una serie de actividades. Este número especial de *Avance y Perspectiva* y el que le sucede contienen las contribuciones de varios colegas que, usando como punto de partida la influencia de los trabajos de Einstein, nos presentan las diferentes especialidades de investigación que se cultivan en el Departamento y las perspectivas y retos que éstas enfrentarán en el presente siglo. En algunas de ellas, puede apreciarse la influencia aún muy actual de los trabajos de Einstein. Esperamos que este ejemplar cumpla el propósito de difundir de forma amena las especialidades del Departamento y que sirva como una guía para interesar a los jóvenes a continuar una carrera de investigación en la física.

Agradecemos el apoyo de varios de nuestros estudiantes quienes fungieron como críticos severos para lograr una mejor calidad en los presentes artículos de divulgación.



LA INFLUENCIA DE EINSTEIN EN LA FÍSICA MODERNA

HUGO GARCÍA COMPEÁN
TONATIUH MATOS

ESTE 2005 SE CUMPLEN 100 AÑOS DE LA PUBLICACIÓN DE CINCO artículos famosos de Albert Einstein en la revista científica alemana *Annalen der Physik*, por lo que resulta buen momento para hacer un breve análisis de sus alcances. Dichos trabajos fueron realizados mientras Einstein era empleado en una oficina de patentes en Berna, Suiza durante el tiempo libre que su trabajo le permitía. En este texto nos centraremos en el impacto de la llamada teoría especial de la relatividad y la hipótesis del fotón que dieron lugar a dos revoluciones científicas, hoy día en conflicto, como son la Relatividad General y la Mecánica Cuántica respectivamente que representan en gran medida los pilares de la física teórica del siglo xx y de comienzos del xxi.

El segundo trabajo al que nos referimos le valió a Einstein el premio Nobel de Física otorgado en 1921, en el cual amplió valientemente la hipótesis de Planck del cuerpo negro. Ésta planteaba que los átomos que conforman un cuerpo negro (modelados por un conjunto de osciladores en equilibrio térmico) deberían intercambiar energía con el campo electromagnético en forma discreta. Einstein fue aún más allá que el propio Planck al establecer que el propio campo de radiación es en sí una cantidad energética discreta, proponiendo con esto la idea de fotón. Dicha hipótesis le fue de gran utilidad para explicar el proceso de interacción entre la radiación electromagnética con la materia, en particular, la emisión y absorción de la luz por materia. Esto dio lugar a la explicación del efecto fotoeléctrico, fenómeno hoy en día comúnmente empleado en la fabricación de fotoceldas que se aplican en los elevadores, por ejemplo.

Por otro lado, la relatividad especial surgió como una necesidad básica de entender una contradicción entre dos pilares de la física clásica: la mecánica clásica newtoniana y la teoría electromagnética desarrollada por Maxwell. La contradicción consistía en que las leyes del electromagnetismo parecían requerir un sistema de referencia preferencial con respecto al cual las ondas electromagnéticas se propagaban con la velocidad c . A este sistema se le dio el nombre de éter luminífero. Contrariamente, la mecánica de Newton basada en el principio

Los doctores Hugo García Compeán y Tonatiuh Matos son investigadores titulares del Departamento de Física del CINVESTAV. Correos electrónicos: compean@fis.cinvestav.mx, tmatos@fis.cinvestav.mx



de Galileo, predecía que sus leyes son las mismas para diferentes observadores moviéndose unos con respecto a otros con velocidad uniforme. Una posibilidad era que realmente existiera tal sistema de referencia absoluto. Sin embargo, intentos hechos por Michelson y Morley de medir los efectos que tal éter produciría sobre los rayos de luz de acuerdo al movimiento de la Tierra, fracasaron. Otra posibilidad, ésta propuesta por Einstein, es que, al igual que las leyes de la mecánica, las leyes del electromagnetismo deben ser también las mismas para observadores conectados por un movimiento relativo uniforme. Einstein se dio cuenta que tal generalización debería implicar que los conceptos de espacio y tiempo así como los de masa y energía que aparecen en la mecánica clásica, deberían ser revisados. Es decir, los conceptos cinemáticos y dinámicos clásicos tenían que ser modificados consistentemente con el principio de Galileo aplicado al electromagnetismo. Esta modificación llevó a la predicción de que las cantidades observables como tiempo, espacio y energía deberían de cambiar conforme los sistemas se muevan, tornándose más fuertes los cambios cuando la

velocidad relativa sea cercana a la velocidad de la luz c . En el artículo publicado en 1905, Einstein propone que el tiempo no es una especie de fluido inmutable universal sino un ente físico que depende del sistema de referencia en el que se desarrollen los acontecimientos. Una consecuencia de esto es el hecho de que los relojes transcurren más lentamente en sistemas de referencia que se mueve uno respecto al otro.

Es importante notar que la solución al problema consistió en visualizar el mundo desde una panorámica más general y sencilla que fue el llamado principio de la relatividad, el cual afirma que las leyes de la naturaleza deben tener la misma forma para diferentes observadores conectados por un movimiento rectilíneo y uniforme. Así surge la teoría de la relatividad como una teoría de principios. Concretamente, la teoría especial de la relatividad está basada en dos principios físicos fundamentales: 1) La descripción matemática de las leyes físicas es invariante ante cambios de coordenadas que conectan dos sistemas de referencia moviéndose uno con respecto a otro en línea recta y con velocidad uniforme. 2) La velocidad de la luz es una constante universal y es la misma para cualquier sistema de coordenadas conectados mediante una transformación de coordenadas. Con esto, Einstein nos enseñó que en sí el concepto de espacio-tiempo no es tan relevante, sino más bien el espacio-tiempo junto con un conjunto de transformaciones que dejaban invariantes ciertas cantidades entre las cuales estaba incluida la velocidad de la luz c . A este conjunto de transformaciones se le conoce hoy en día como el grupo de Lorentz-Poincaré.

EINSTEIN COMO GESTOR DE LA FÍSICA MODERNA

La relatividad general y algunas de sus consecuencias

Con la formulación de la relatividad especial finalmente fueron entendidos algunos extraños fenómenos que ocurren a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, pero también surgieron nuevas incógnitas. Una de ellas era establecer una relación entre dicha teoría y la ley de la gravitación universal de Newton. Era conocido que la ley de la gravitación universal implicaba la idea de acción a distancia, incompatible con la relatividad especial. La clave de dicha relación fue el llamado principio de equivalencia, el cual establece (en una de sus versiones) que la masa inercial m_i de un cuerpo, es decir, la oposición que presenta un cuerpo a cambiar de movimiento, es la misma que la masa que funge como fuente de campo gravitacional o masa gravitacional m_g del cuerpo. En la mecánica clásica su igualdad es una afortunada coincidencia pero no tiene explicación. Ésta aparece como una consecuencia de la generalización del principio de la relatividad especial al caso de movimientos con aceleración. Así, el principio debe generalizarse a: las leyes de la física son las mismas con respecto a movimientos acelerados. Desde el punto de vista matemático esto es idéntico a decir que la formulación matemática de las leyes físicas debe ser invariante ante transformaciones arbitrarias de coordenadas. El principio de equivalencia implica entonces que es físicamente indistinguible que un observador esté dentro de un campo

gravitacional o bien en un sistema inercial en el cual dicho observador es acelerado (con la misma magnitud que el campo gravitacional) en dirección contraria al campo gravitacional. Dicho de otra forma, un observador en caída libre en un campo gravitacional también es físicamente equivalente a que dicho observador se encuentre en un sistema inercial en el cual no hay fuerzas externas. El principio de equivalencia le dio la clave a Einstein para discernir la estructura matemática detrás del movimiento de las partículas en campos gravitacionales (geodésicas) y las ecuaciones mismas que debería satisfacer el campo gravitacional. Einstein descubrió, ayudado de su amigo Marcel Grossmann, que el campo gravitacional básicamente obedece a una estructura matemática conocida como la geometría diferencial y se pudo establecer la equivalencia entre los fenómenos gravitacionales en términos puramente geométricos. Así, la interacción gravitacional se entiende como la curvatura del espacio-tiempo producida por un objeto muy masivo. Dicha curvatura se puede visualizar como una bola de boliche sobre un colchón de esponja. El peso de la bola (la materia) deformará el colchón (el espacio-tiempo) con mayor intensidad a distancias más cercanas. Pictóricamente, las ecuaciones de Einstein están dadas por: $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, donde $G_{\mu\nu}$ es una cantidad geométrica conocida como tensor de Einstein, el cual contiene al tensor de curvatura de Riemann, G es la constante de Newton la cual determina la intensidad del campo gravitacional y $T_{\mu\nu}$ es el tensor de energía-impulso. La teoría de Einstein ha sido múltiplemente verificada de manera experimental. Una prueba reciente consiste en la

observación del cambio en la frecuencia del pulso de emisión electromagnética de púlsares binarios, en particular del PSR 1913+16; debido a la posible emisión de ondas gravitacionales. Esta observación les dio a R.A. Hulse y J.H. Taylor, Jr. el premio Nobel de Física en 1993.

A principios del siglo xx se pensaba que el universo era infinito en espacio y tiempo y también que era un conjunto infinito de estrellas en un equilibrio perfecto y estático. A través de sus ecuaciones, sin embargo, Einstein pudo predecir un universo dinámico. Poco después de la formulación de su teoría relativista de la gravitación, Einstein generalizó sus ecuaciones mediante la introducción de un término cosmológico: $G_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, donde $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico y λ es la llamada constante cosmológica introducida por Einstein para lograr que su teoría describiera un universo estático¹. Poco después el astrónomo norteamericano E. Hubble descubrió que nuestro universo está en expansión, tal y como lo predecían las ecuaciones de Einstein. Es por eso que Einstein se arrepintió de haber introducido la constante cosmológica a sus ecuaciones. Sin embargo, recientemente mediante las observaciones del corrimiento al rojo de las supernovas del tipo Ia, se ha podido determinar que nuestro universo no sólo se expande sino que lo hace de forma acelerada. Tal aceleración puede ser explicada mediante el término cosmológico de Einstein como antigravedad. Después de todo, tal vez Einstein tampoco se equivocó en introducir ese término a sus ecuaciones¹.

Resumiendo, algunas de las predicciones más espectaculares de la teoría de Einstein son, por ejemplo, la existencia de ondas gravitacionales,

el hecho de que el universo está en constante expansión y por lo tanto tuvo un inicio: el *big bang*. Otra predicción son los agujeros negros, los cuales son regiones del espacio-tiempo donde la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar. Pueden formarse por colapso gravitacional en la etapa final de la muerte de ciertas estrellas. Sin embargo, los agujeros negros son estrellas que se colapsan y forman objetos muy pequeños, tan pequeños que los efectos cuánticos ya son considerablemente intensos y para entender los fenómenos que se llevan a cabo dentro de la región del horizonte del agujero negro es necesaria una unificación de la mecánica cuántica con la teoría de Einstein. En principio, este proyecto es aún un sueño, pero ya se tienen algunos indicios de efectos cuánticos en hoyos negros. En los setenta, J. Bekenstein y S.W. Hawking notaron que el área del horizonte de los agujeros negros podía relacionarse con una propiedad termodinámica conocida como entropía. Poco después, Hawking descubrió que los hoyos negros pueden emitir partículas elementales en forma de radiación térmica la cual se conoce como radiación de Hawking y es una de las herramientas teóricas principales como guía de una teoría de la gravedad cuántica. Ese fue el primer indicio de una relación entre la mecánica cuántica y la relatividad general. Queda el gran reto de rederivar esas propiedades térmicas macroscópicas a partir de otras puramente cuánticas del campo gravitacional. Esto se esperaría de cualquier modelo que pretenda ser una teoría unificada de la mecánica cuántica y la gravitación. Así, las propiedades de los agujeros negros son de gran importancia como guía

en la búsqueda de la teoría unificada de las interacciones fundamentales conocidas.

MECÁNICA CUÁNTICA, TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS Y MODELOS DE UNIFICACIÓN

Como ya mencionamos, en 1905 Einstein propuso que la propia radiación estaba compuesta de pequeños corpúsculos llamados fotones. Esta descripción ayudó posteriormente a Niels Bohr a construir modelos para el átomo con base en transiciones de estados atómicos mediante la emisión y/o absorción de fotones. Esto estableció nuevas reglas para el modelo planetario del átomo. Posteriormente, en la década de los veinte estas ideas llevaron finalmente a la creación de la Mecánica Cuántica, principalmente por W. Heisenberg, M. Born, P. Jordan, E. Schrödinger, W. Pauli y P. A. M. Dirac. La nueva dinámica atómica o cuántica establecía reglas novedosas acerca de lo que significa observar un sistema y la influencia que tiene el proceso de medición de un sistema sobre los posibles resultados de los observables. A diferencia de la relatividad especial y general, las cuales son teorías basadas en principios físicos, la mecánica cuántica se apoya en axiomas, los cuales son un conjunto de reglas sobre el nuevo reino cuántico, lo cual permite establecer un marco para hacer cálculos y obtener predicciones. La mecánica cuántica como fue originalmente propuesta es no-relativista y por lo tanto resulta incompatible con los principios de la relatividad especial. Así en principio se puede generalizar la mecánica cuántica de tal forma que sea compatible con la relatividad especial. Tal generalización dio lugar a la llamada mecánica cuántica relativista misma que es un caso particular de la llamada teoría cuántica de los campos.

Es natural preguntarse cómo debe ser extendida la mecánica cuántica de manera que sea compatible con los principios de la relatividad

especial de Einstein. Este sólo hecho llevó a la predicción de otro tipo de partículas que los físicos de entonces llamaron antimateria. Las anti-partículas, por ejemplo el positrón que es la anti-partícula del electrón, son partículas con la misma masa que los electrones pero con carga eléctrica positiva. Dichas partículas fueron descubiertas por Anderson en 1932. En general, por cada partícula elemental conocida existe su anti-partícula.

Originalmente la teoría cuántica de los campos fue propuesta por Max Born, P. Jordan y W. Heisenberg, en los mismos trabajos seminales de la mecánica cuántica y posteriormente desarrollada por Heisenberg y Pauli. Casi desde el comienzo, la teoría presentaba dificultades. En particular al calcular el efecto electromagnético que produce una carga sobre sí misma se predecía un corrimiento infinito genérico en la energía. Cálculos similares, en teorías con otros campos y procesos, dieron resultados infinitos muy similares. La solución a este problema la dieron R. Feynman, I. Tomonaga, J. Schwinger y F. J. Dyson, al introducir el método de renormalización en la electrodinámica cuántica. Esto implicaba la cancelación de dichas cantidades infinitas dando lugar a resultados finitos para las cantidades observables. Hoy sabemos que existe una clase de teorías que son renormalizables y otras que no lo son.

Otro problema inicial de la teoría cuántica de campos fue el hecho de que la energía del vacío fuera infinita. Esto es, el principio de incertidumbre de Heisenberg impide que los osciladores que modelan los átomos o la radiación tengan una energía específica (por ejemplo cero) y esto implica que el estado base no puede ser el estado de energía cero. Así, por cada grado de libertad hay una energía no cero. Pero como hay un número infinito de grados de libertad, entonces la energía total será infinita. En el contexto de una teoría de campos esta energía del vacío se puede fijar a cero ya que lo que es físicamente relevante son las diferencias de energía.

En teorías cuánticas de campos acopladas con la gravedad, la constante cosmológica se tiene necesariamente que identificar con la densidad de energía del vacío constante ρ_{vac} , de tal manera que la fórmula de Einstein es modificada en la forma: $G_{\mu\nu} = 8\pi G(T_{\mu\nu} + \rho_{vac} g_{\mu\nu})$. En observaciones recientes (de las cuales hablaremos más adelante) se ha visto que si bien la constante cosmológica no es cero y produce un universo en expansión acelerada, tiene un valor muy pequeño. Esto es incompatible con el cálculo de la energía del vacío en la teoría cuántica de campos. Se pueden calcular las distintas contribuciones a las diferentes escalas de energía, dando una constante cosmológica total del orden de 55-120 órdenes de magnitud más grande que la energía de toda la materia y radiación del universo observable. Así, hoy en día existe la necesidad de ir más allá de la teoría cuántica de campos para buscar un mecanismo que proporcione una constante cosmológica compatible con los datos experimentales. Un mecanismo muy atractivo es la llamada supersimetría, la cual es una simetría muy hermosa que se puede visualizar como una extensión de la relatividad especial a un espacio ampliado conocido como superespacio, que contempla además de las coordenadas usuales (bosónicas), nuevas coordenadas basadas en números que anti-conmutan, llamadas números de Grassmann (variables fermiónicas). Más adelante nos volveremos a encontrar con la idea de supersimetría.

La historia de la física es en parte la historia de la búsqueda de principios que gobiernan el comportamiento de la materia y sus interacciones y de la unificación de las distin-

tas interacciones observadas. Por unificación se entiende un marco conceptual y matemático que engloba dos o más teorías distintas y las incorpora como diferentes límites de ese marco general. La unificación no es sólo la unión de las respectivas teorías y sus propiedades, sino que genera una teoría que además posee nuevas propiedades. Einstein dedicó sus últimos años a buscar una teoría unificada con sólo un éxito parcial. En gran parte debemos a él la idea de una teoría unificada de las interacciones fundamentales la cual funge como guía en la física de nuestros días.

Se conocen cuatro fuerzas básicas de la naturaleza. Las dos primeras en ser descubiertas (por ser más accesibles a nuestra experiencia), la gravitacional y la electromagnética, son fuerzas de largo alcance. Las dos restantes son las interacciones fuertes y débiles y actúan a muy corta distancia, típicamente de la escala del núcleo atómico. Las fuerzas eléctrica y gravitacional tienen gran semejanza entre sí, pero hay diferencias esenciales. Por ejemplo, las cargas eléctricas son de dos tipos, de tal forma que cargas del mismo signo siempre se repelen entre sí. Mientras que la carga gravitacional o masa, siempre es atractiva.

La primera unificación del electromagnetismo se realizó no con la gravitación, sino con la fuerza nuclear débil. La realizaron en los sesenta S.L. Glashow, A. Salam y S. Weinberg y se conoce como teoría electrodébil. Tiempo después, la incorporación al marco teórico de esta teoría con la interacción fuerte, conformó el Modelo Estándar de la física de partículas elementales, el cual ha sido verificado experimentalmente con una precisión espectacular en los grandes laboratorios como CERN, DESY, Fermilab, SLAC, etcétera.

Dicho modelo presenta dificultades de carácter estético como la arbitrariedad de tener muchos parámetros libres y la imposibilidad de incorporar la fuerza gravitacional en el cuadro de unificaciones. Esas inconveniencias son pro-

pías de cualquier teoría en la que sus partículas elementales sean representadas como puntos (sin estructura interna). Algunos físicos piensan que la unificación de las interacciones, exceptuando la gravedad, es posible debido a que tienen una descripción basada en los mismos principios físicos generales de simetría: las llamadas simetrías de Norma. Algunas generalizaciones del modelo estándar consistentes con dichas simetrías se conocen como modelos de gran unificación.

¿SON LA TEORÍA DE EINSTEIN Y EL MODELO ESTÁNDAR LA ÚLTIMA PALABRA?

Como hemos visto, el modelo estándar surgió de observar el mundo microscópico y sus consecuencias. Pero a finales del siglo pasado, una serie de nuevas observaciones abrió nuevos horizontes. A finales de los setenta y principio de los ochenta, un grupo de astrónomos dirigidos por una mujer llamada Vera Rubin, observó una anomalía en el movimiento de las estrellas girando alrededor de las galaxias. La anomalía consistía en que las estrellas alrededor de las galaxias giraban demasiado rápido, de tal forma que la materia "visible" en la galaxia no tenía suficiente fuerza gravitacional como para compensar la fuerza centrífuga debido al movimiento de estas estrellas alrededor de la galaxia. Vera Rubin postuló entonces la existencia de algo alrededor de la galaxia que llamó materia oscura, es decir, más materia que aumentara la fuerza gravitacional y compensara la fuerza centrífuga de las estrellas. Lo sorprendente es

que esta materia oscura tenía que ser alrededor del 90% de la materia de las galaxias, lo que indicaba que la materia luminosa sólo representaba 10% de la materia total. Es decir, de hecho las galaxias y por tanto el universo, están hechas de materia oscura. En un principio se pensó que esta materia oscura no era más que algún tipo de polvo, o tal vez planetas gigantes que no iluminaban, como Júpiteres por todos lados. O quizás un número enorme de hoyos negros. A lo largo de estos más de 20 años se han ido descartando una por una todas estas hipótesis. Al final sólo ha quedado uno de los misterios más grandes de la ciencia en nuestros días: ¿de qué están hechas las galaxias? Lo único que se sabe es que la materia oscura es la responsable de que el universo, las galaxias, los cúmulos de galaxias, etcétera, se vean como se ven. Sin la materia oscura es imposible entender cómo se formaron todas estas estructuras, por lo tanto, sin materia oscura no es posible entender cómo se formaron los sistemas estelares en estas galaxias y por tanto no se puede explicar la existencia del Sol y su sistema de planetas. Pero por si fuera poco, el misterio no acaba allí. A finales del siglo pasado, dos grupos de astrónomos independientes uno dirigido por Saul Perlmutter y otro por Brian Schmidt, utilizando el telescopio espacial Hubble observaron una serie de explosiones de supernovas a distancias enormes. Estas explosiones se llevaron a cabo hace 5 mil millones de años, es decir, se llevaron a cabo en el tiempo en que se estaba formando nuestro sistema solar. Estas supernovas, estrellas cuyo combustible se acabó y se colapsaron en un suspiro final, se encuentran tan

alejadas de nosotros que su luz nos llega después de haber viajado 5 mil millones de años. Las podemos ver porque estas explosiones son tan poderosas que su luz ilumina casi tanto como una galaxia entera. Al observar este fenómeno, los astrónomos pudieron calcular la razón de expansión del universo en esa época, hace 5 mil millones de años. El resultado fue sorprendente y ha dejado a la comunidad científica atónita. Hace 5 mil millones de años el universo se expandía más lentamente que ahora. Lo cual es un desastre para el entendimiento del universo que tenemos. Imaginar que éste se expande, significa que la fuerza de gravedad de las galaxias, que contienen 100 mil millones de estrellas como el Sol, está siendo sobrepasada debido al movimiento que las separa. Esta es la razón por la cual se supone que el universo se inició en una gran explosión tan enorme, tan poderosa, que ha logrado que toda la materia del universo, todas las estrellas, todas las galaxias, se alejen unas de otras. Sin embargo, los cosmólogos pensaban que después de la gran explosión el universo tenía que mostrar un fenómeno de desaceleración debido a la fuerza gravitacional atractiva. Pero el resultado no fue ese, el universo no sólo se expande, sino que lo hace aceleradamente, cada vez más rápido, en contra de la fuerza de gravedad. Este hecho sólo se puede explicar si existe otro tipo de materia en el universo que sea anti-gravitacional, es decir, gravitacionalmente repulsiva o un tipo de materia en el universo con una ecuación de estado que dé presión negativa. De cualquier forma, algún tipo de materia exótica, algo que no conocemos, algo totalmente nuevo que los astrónomos

han dado en llamar energía oscura. En el 2003, los resultados del satélite WMAP confirmaron la existencia de materia oscura y de energía oscura, dando con gran exactitud los porcentajes de éstas en el universo. El resultado fue que 23% del universo es materia oscura, 73% es energía oscura y sólo 4% es materia conocida, esa que se predice en el modelo estándar. La gran sorpresa de fin de siglo es que no sabemos de qué está hecha el 96% de la materia del universo.

Resulta significativo el hecho de que nos encontramos en la misma situación de hace 100 años, tenemos una anomalía teórica como la que llevó a la formulación de la teoría especial: la teoría de la gravitación y la mecánica cuántica son incompatibles. Y tenemos una anomalía experimental como la que llevó a la formulación de la mecánica cuántica: no sabemos de qué está hecho el 96% del universo. Mucha gente piensa que una extensión del modelo estándar podría resolver el problema de la materia oscura, por ejemplo, agregándole una simetría más al modelo, como la supersimetría. Para la explicación de la energía oscura el camino es más oscuro. La mejor hipótesis que se tiene es regresar a la vieja idea desechada por Einstein de la existencia de una constante cosmológica. Pero esta hipótesis ha mostrado también muchos problemas, por lo que se cree que no es la respuesta final, sobre todo porque el origen de esta constante no es nada claro. De cualquier forma, mucha gente piensa que esto no será suficiente, pues tanto la materia oscura como la energía oscura son dos tipos de materia cuya naturaleza es totalmente nueva para no-

sotros, lejos de cualquier otro tipo de fenómeno al que nos hayamos enfrentado antes. La solución de este enigma puede estar en aportar ideas tan nuevas y revolucionarias como las que cambiaron al mundo hace 100 años². El hecho de pensar así es sumamente estimulante. Estamos inmersos en una revolución científica, de esas que se dan sólo un par de veces en la historia de la humanidad.

LA TEORÍA DE CUERDAS Y LA TEORÍA M

Hoy en día persiste la necesidad de establecer una teoría que describa cuánticamente al campo gravitacional, es decir, consistente con los axiomas de la mecánica cuántica. Existen varias propuestas y cada una de ellas ha sido explorada sistemáticamente. Una es la llamada Gravedad Cuántica de Lazos, propuesta desde los ochenta. Otra es la llamada Teoría de Cuerdas³, en la cual nos concentraremos.

La teoría de cuerdas señala que los constituyentes mínimos de la materia no son objetos puntuales sino unidimensionales. La teoría tiene casi 40 años de vida y primero fue utilizada por G. Veneziano para describir alguna física de las interacciones nucleares fuertes. Fue hasta 1974 que J. Schwarz y J. Scherk se dieron cuenta que podría ser vista como una posibilidad para unificar la gravedad con la mecánica cuántica. Sólo hasta mediados de los ochenta se avanzó considerablemente para verla como un modelo consistente de todas las fuerzas básicas naturales. Además, se encontraron cinco teorías de supercuerdas que eran teorías cuánticas de la gravedad perturbativas consistentes en 10 dimensiones, entre las cuales la conocida como teoría heterótica, la cual era una teoría distinguida ya que permitía establecer una relación estrecha con la física de los modelos de gran unificación debido a su contenido de campos de norma.

La manera de conectar la teoría heterótica en 10 dimensiones con nuestro mundo en 4 di-

mensiones fue mediante el mecanismo de la reducción dimensional. Esta vez, se tiene una situación mucho más rica, ya que este mecanismo puede ser aplicado si el espacio de 10 dimensiones luce como $M^{3,1} \times Y$, donde Y es un espacio 6-dimensional compacto conocido como espacio de Calabi-Yau. Sorprendentemente muchas propiedades relevantes de la física del modelo estándar, tales como el número de familias de partículas completamente determinados por la topología y la geometría de este espacio interno Y . Así, uno tiene predicciones físicas diferentes para distintos espacios Y 's y esto lleva a un problema de predictibilidad en la teoría en 4 dimensiones. La topología y la geometría de Y generan un conjunto de parámetros que determinan la física de la teoría en 4 dimensiones. Así, si nos movemos en este conjunto de parámetros, vamos cambiando las propiedades físicas de la teoría en 4 dimensiones y con esto vamos variando todos los posibles universos. Sin embargo, uno de los problemas más graves es que había cientos de miles de espacios Y y la teoría de cuerdas no provee un mecanismo para seleccionar el vacío verdadero el cual fuera consistente con la física de nuestro universo. Este problema es conocido como el problema de la degeneración del vacío.

Sin embargo la teoría de supercuerdas provee un marco conceptual rico que predecía la estructura matemática del modelo estándar, una simetría llamada supersimetría y la estructura de las teorías de Norma. La supersimetría es una simetría entre partículas que funcionan como la materia y las partículas que transportan la interacción. Será buscada principalmente en el



experimento LHC del CERN a partir del año 2008, y su descubrimiento es de importancia central en la solución de algunos problemas teóricos presentes en el modelo estándar y posiblemente en el problema de la constante cosmológica que ya describimos.

En 1995, el físico Edward Witten presentó amplia evidencia de que las cinco teorías obtenidas, junto con otra conocida como la supergravedad en 11 dimensiones, eran de hecho parte de una teoría inherentemente cuántica y no-perturbativa conocida como teoría M (de las palabras misterio y magia o matriz)⁴. Las seis teorías están conectadas entre sí por una serie de simetrías conocidas como dualidades S y T . La dualidad S es una generalización de la simetría de dualidad entre las variables eléctricas y magnéticas en el electromagnetismo con cargas magnéticas. Hay también mucha evidencia de que la teoría M no es sólo la suma de las partes, pero no se conoce qué estructura pueda tener. Las simetrías de dualidad requieren a su vez de la existencia de nuevos objetos conocidos como D-branas, extendidos en varias dimensiones donde los extremos de las cuerdas pueden terminar⁴.

En 1996, A. Strominger y C. Vafa utilizaron los D-branas como estados cuánticos del campo gravitacional en cierto tipo de hoyos negros, logrando reproducir, exactamente y por vez prime-

ra, las propiedades termodinámicas de Bekenstein y Hawking. Esto nos proporciona evidencia clara de que la teoría de cuerdas, o más aún, la teoría M pudiera ser la teoría cuántica del campo gravitacional correcta. La conexión con el modelo estándar está todavía por establecerse.

Muy recientemente se ha estudiado la teoría de cuerdas y D-branas añadiendo ciertas cantidades conocidas como flujos, los cuales son generalizaciones de los campos eléctrico y magnético. Estas cantidades definidas sobre espacios de Calabi-Yau añaden más parámetros al sistema. En esta nueva imagen, ya no se espera encontrar el vacío correcto, sino todo un panorama de vacíos (landscape). En 2003, S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde y S. Trivedi encontraron fuerte evidencia de que al igual que un paisaje en nuestro planeta que tiene montañas y valles, el panorama podía tener mínimos de energía en donde pueda caer nuestro universo⁵. Así, el paradigma de encontrar el vacío correcto ya no se aplica más, y en la descripción del universo cuentan todos los vacíos. Nuestro universo vendría descrito no por alguno de ellos sino por un promedio de todos ellos⁵. Esto se ha hecho observándose que nuestro universo cae dentro de un promedio con constante cosmológica pequeña (pero no cero). Esta propuesta aún sigue siendo explorada y podría constituir una solución al problema de la cons-

tante cosmológica ya antes descrito. Lo cierto es que no se tiene una imagen completa de la teoría y consecuentemente una formulación precisa de la teoría de cuerdas está todavía lejana. Los físicos continúan explorando la estructura de la teoría de cuerdas y del panorama en la búsqueda de principios físicos que nos provean de las ecuaciones exactas tratando de imitar nuevamente al principio de equivalencia de Einstein.

En resumen, 100 años después de los históricos artículos de Einstein sabemos un poco más del universo y nos encontramos en un momento tan excitante y de cambios como en aquel entonces. Seguramente estamos viviendo una revolución del pensamiento como la que iniciaron estos genios. Gracias a estos curiosos de la ciencia, la humanidad ha cambiado mucho. Aunque nuestros políticos no lo alcancen a comprender, estamos viviendo una revolución de la sociedad equiparable a la Revolución In-

dustrial, una revolución científico-tecnológica sin precedentes que encuentra uno de sus móviles fundamentales en saciar una pregunta simple en apariencia pero de relevancia fundamental: ¿por qué es el cosmos cómo es?

Por ahora sólo queda cuestionarnos, ¿qué dirán las generaciones de pensadores en 100 años? Posiblemente dentro de un siglo alguien estará haciendo un artículo de divulgación como éste para platicar lo que pasó en la física de principios del siglo XXI.

NOTAS

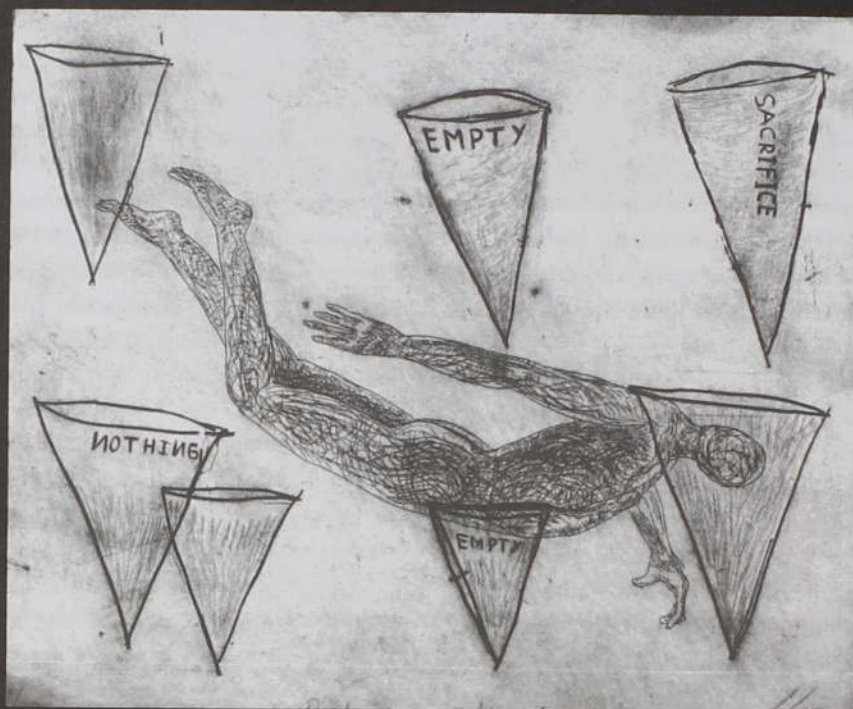
¹ Krauss, L.M. y M. Turner, "A Cosmic Conundrum", *Scientific American*, Special Issue, 2004, vol. 291, núm. 3, pp. 52-59.

² Matos, T., *¿De qué está hecho el universo?*, serie "La ciencia para todos", 2004, Fondo de Cultura Económica.

³ Witten, E., "Reflections on the Fate of Spacetime", *Physics Today*, abril, 1996, pp. 24-30.

⁴ Witten, E., "Duality, Spacetime and Quantum Mechanics", *Physics Today*, mayo, 1997, pp. 28-33.

⁵ Bousso, R. y J. Polchinski, "The String Theory Landscape", *Scientific American*, Special Issue, 2004, vol. 291, núm. 3, pp. 60-69.



MANIPULANDO EL MUNDO ATÓMICO: INGENIERÍA CUÁNTICA

OSCAR ROSAS-ORTIZ

Con ardiente afán ¡ay! estudié a fondo la filosofía, jurisprudencia, medicina y también por mi mal, la teología; y heme aquí ahora, pobre loco, tan sabio como antes.

Fausto, meditando acerca de su pasado¹

HACE UN SIGLO, EN 1905, UN JOVEN DE 26 AÑOS PUBLICA CINCO trabajos científicos que transformarían para siempre nuestra percepción de la naturaleza. El primero de ellos fue de crucial importancia para formular una teoría aceptable de la física que gobierna lo muy pequeño: la mecánica cuántica. Con otros dos de estos cinco trabajos, el joven Albert Einstein sentaría las bases tanto de la mecánica estadística moderna como de la química y la biotecnología. Por si fuera poco, entre sus otros resultados de 1905 está la relatividad especial que, combinada con las ecuaciones de Maxwell, implicaría que la masa es una medida directa de la energía contenida en un cuerpo: $E = mc^2$.

Al examinar estos trabajos resulta difícil creer que un solo hombre hubiese podido contribuir tanto en áreas tan diversas. Sólo Newton logró lo equivalente al revolucionar la ciencia del siglo XVII con sus trabajos de 1666, su *Annus Mirabilis*². Sensible a esto, la comunidad científica internacional rinde homenaje a Einstein en el 2005, el *Año Internacional de la Física*, conmemorando el centenario de sus cinco publicaciones fundamentales más tempranas. Con este artículo nos unimos a la celebración en forma modesta: hablaremos del mundo cuántico, intangible e incomprensible si pretendemos usar nuestra intuición cotidiana; revisaremos algunos de los mecanismos usados para atrapar y controlar sistemas tan pequeños e invisibles como los átomos y los electrones; investigaremos la forma de “rejuvenecer” estos sistemas, como el Fausto de Goethe, obligándolos a recuperar de tiempo en tiempo su estado inicial. Además discutiremos algunas de las posibles aplicaciones.

El raquítico dios de la tierra sigue siendo de igual calaña y tan extravagante como en el primer día.

Mefistófeles, discutiendo con El Señor sobre el futuro de Fausto³

El Dr. Oscar Rosas-Ortiz es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV
Correo electrónico: orosas@fis.cinvestav.mx

A diferencia de hace cien años, hoy en día escudriñamos los confines del universo con instrumentos que pueden observar mucho más allá de lo que el ojo desnudo y los telescopios convencionales podrían detectar³. Aceleramos partículas a una rapidez tan cercana a la de la luz que, al hacerlas colisionar unas con otras, se produce una *fauna* de componentes fundamentales de la materia que era imposible siquiera imaginar hace apenas veinte años. Podemos también frenar partículas libres hasta velocidades muy por debajo de las velocidades térmicas (las moléculas y átomos se mueven, a temperatura ambiente, con una rapidez cercana a la del sonido: trescientos metros por segundo). Esta situación permite enfriar gases a temperaturas cercanas al cero absoluto, diseñar relojes atómicos y manipular moléculas de ADN. Aún más, al moverse tan lentamente, las partículas pueden ser atrapadas en un recipiente láser⁴ o en una botella electromagnética^{5,6}, según sean éstas cargadas o eléctricamente neutras. Incluso la luz puede frenarse y atraparse⁷. Muy recientemente empezamos a soñar con computadoras tan pequeñas que estarían formadas por unas cuantas moléculas y que necesariamente obedecerían las leyes cuánticas. Con estas características, las computadoras cuánticas podrían efectuar miles de millones de cálculos en un par de horas. Una tarea que a la mejor de las computadoras actuales le costaría años e incluso siglos de tiempo-máquina, sin mencionar la cantidad de energía necesaria para alimentarla⁸.

Enfrentamos también una situación paradójica. Por un lado, los impresionantes avances tecnológicos que hemos alcanzado se deben, en

gran medida, a las teorías inspiradas en las ideas de Einstein; por otro lado, a pesar de que ha transcurrido un siglo, la revolución generada por Einstein no ha llegado a su fin. Los aparatos de medición más modernos son usados actualmente para poner a prueba las teorías mismas que les dieron origen.

Aquello que no se sabe es cabalmente lo que se quiere utilizar, y aquello que se sabe no puede utilizarse.

Fausto, conversando con Wagner en la campiña¹

En las últimas décadas, por ejemplo, nos hemos percatado de que la cantidad de materia que observamos no es suficiente para explicar tanto el estado actual del universo como su origen y su posible futuro⁹. No conformes con esto, hablamos también de ondas gravitacionales y hoyos negros (con todo y las controversiales consecuencias de las recientes declaraciones de Hawking¹⁰) como algo tangible, lejos ya de la ciencia ficción, que nos guiña el ojo y nos invita a observar directamente su existencia^{11,12}. Además, la geometría del espacio-tiempo no es indistinta a los conceptos cuánticos¹³. Con todo esto la historia podría repetirse: las propuestas de Einstein serían ahora objeto de revisión y posible corrección.

Por otro lado, con respecto al mundo cuántico sabemos que algunas veces es más fácil explicar el comportamiento de un sistema si se le considera como un conjunto de partículas mientras que en otras ocasiones es mejor considerarlo como onda. Pareciera como si los sistemas cuánticos tuviesen dos caras: cada vez que logramos “fotografiar” alguno de sus rostros el otro se nos oculta maliciosamente, como el ladrón a la policía, para que no logremos identificarlo. Tenemos además la limitante del *principio de incertidumbre*. Por ejemplo, el lector podrá medir con precisión arbitraria la posición y velocidad de todos y cada uno de los vehículos que circulen por una determinada avenida. Su frustra-

ción, por el contrario, se hará patente al pretender medir simultáneamente la posición y la velocidad de tan sólo uno de los átomos que conforman el aire que respira. Al medir la posición del átomo se sabrá poco acerca de su velocidad y viceversa, no importando el equipo de medición que se use. Los sistemas cuánticos parecen entonces incontrolables, tan rebeldes que no podríamos "obligarlos" a definirse por un comportamiento específico.

A pesar de esta ingobernabilidad aparente del mundo cuántico debemos enfatizar que, hasta el momento, hemos sacado provecho de la situación. La ecuación de Schrödinger, que dicta y rige el comportamiento dinámico de los sistemas cuánticos, predice que un electrón puede penetrar y atravesar barreras de potencial que le son prohibidas desde un punto de vista clásico (efecto túnel). El efecto túnel es la huella digital de los sistemas cuánticos y opera en diversas escalas. Por ejemplo, es el artífice del puente de hidrógeno que mantiene unido al ADN y es, a su vez, fundamental para explicar el origen de la radiación solar. Este efecto también es el fundamento teórico del funcionamiento del transistor, cuya invención empezó la llamada Segunda Revolución Industrial. Como sabemos, la subsiguiente miniaturización de los dispositivos electrónicos (microtecnología) ha sido eficiente a pesar de la existencia del principio de incertidumbre. Con todo, si tal miniaturización continúa (todavía más allá de la nanotecnología), los dispositivos electrónicos necesariamente adquirirán las dimensiones del mundo cuántico, donde su eficiencia y precisión estarán dominadas por el principio de incertidumbre.

*¿Con que el mismo infierno tiene sus leyes? Me gusta eso.
¿Luego se podría con toda confianza cerrar un pacto con vosotros, señores?*

Fausto, en su gabinete de estudio,
discutiendo con Mefistófeles¹

Buscar los mecanismos para dominar y controlar el comportamiento dinámico del mundo cuántico no es tarea sencilla pero es de suma importancia en el desarrollo de las futuras revoluciones tecnológicas. Para ello, curiosamente, se requiere trabajar al revés: en lugar de investigar la evolución que un sistema físico desarrolla ante determinadas interacciones, nos preguntaremos sobre el tipo de condiciones externas que debemos imponerle para obligarlo a evolucionar justo en la forma que nos interesa. Esto es lo que llamamos un problema inverso, cuyas soluciones brindan toda la información que se requiere para manipular dinámicamente a los sistemas físicos. La manipulación dinámica, como línea de investigación, se desarrolla desde hace casi tres décadas en el Departamento de Física del CINVESTAV y abre un abanico de posibilidades teóricas y experimentales a desarrollarse en el corto, mediano y largo plazo.

No, no; el diablo es egoísta, y no hace fácilmente por amor de Dios cosa alguna que sea de provecho para otro. Expresa claramente tus condiciones.

Fausto, pactando con Mefistófeles
los pormenores de su contrato¹

La posibilidad de *atrapar* partículas en un determinado volumen, y por el tiempo suficiente como para hacer mediciones, fue uno de los primeros retos de la manipulación dinámica. Desde hace siglos se sabe que los campos electromagnéticos ejercen fuerzas de considerable magnitud sobre las partículas cargadas. Por esto resultó casi natural hurgar, antes que nada, en la teoría electromagnética de Maxwell. La primera propuesta teórica fue formulada por F.M.

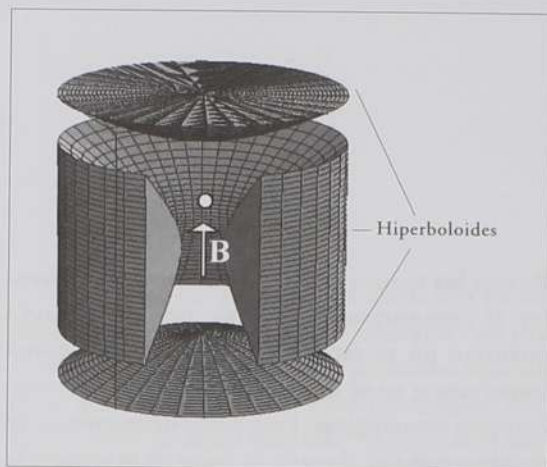


FIGURA 1. Esquema de la trampa de Penning¹⁴. El campo magnetostático B apunta en la dirección axial. El campo electrostático cuadrupolar es generado por las dos tapas y el anillo. El disco blanco representa una de las partículas atrapadas.

Penning en 1936. La trampa de Penning estaría compuesta por un campo electrostático cuadrupolar con simetría axial, generado por tres hiperboloides de revolución, y un campo magnetostático homogéneo en la dirección axial. La combinación de estos campos mantendría confinada a la partícula en una pequeñísima región espacial, justo en el centro de la trampa. El movimiento de la partícula, sin embargo, sería complicado. Este trabajo fue considerado como un mero ejercicio académico y por muchos años no se le prestó demasiado interés. Sin embargo, dos décadas después la trampa de Penning sería valorada en su justa dimensión. En 1958, Wolfgang Paul, de la Universidad de Bonn, sugiere una modificación a este arreglo: habría que eliminar el campo magnetostático y en lugar del campo electrostático habría que usar un campo cuadrupolar oscilante con el tiempo. Paul y su equipo implementaron un diseño experimental de esta trampa y superaron con creces el reto. Por otra parte, en 1973 también el estadounidense Hans G. Dehmelt ataca el problema, sólo que esta vez se logra aislar al electrón usando sin modificaciones la trampa de Penning. Estos resultados hicieron a Paul y a Dehmelt merecedores del Premio Nobel de Física en 1989⁶.

Una vez conseguida la hazaña de atrapar partículas cargadas faltaba hacer lo propio con las partículas neutras. Este reto fue también enfrentado por Paul al sugerir, desde la década de los cincuenta, que se podrían usar campos magnéticos para atrapar átomos neutros. El mecanismo físico es el siguiente: hay átomos que, aun siendo neutros eléctricamente, interaccionan con los campos magnéticos al comportarse como un pequeño imán. Los polos de cada uno de estos imanes atómicos *sienten* diferentes intensidades del campo, lo que produce una fuerza neta sobre el átomo. Aunque pequeña, esta fuerza es medible y puede ser usada para mover átomos en una determinada dirección. Lo que está detrás de este comportamiento de los átomos es el espín, una propiedad física que es característica de todos los sistemas cuánticos. Por ejemplo, el espín total de los átomos de sodio es $1/2$, igual que el espín del electrón. Esto significa que los imanes atómicos que tenemos en mente, al ser *observados*, tienen sólo dos orientaciones posibles con respecto al campo magnético. La idea de Paul fue diseñar un campo magnético cuya intensidad tuviese un mínimo local. Si el espín del átomo está inicialmente orientado en la dirección del mínimo, esta orientación se mantendrá mientras dure el campo y no exista nada que perturbe al átomo. Una vez alcanzada la región donde el campo es menos intenso, los átomos se verán obligados a mantenerse ahí porque la orientación de su espín no ha cambiado. Paul logró realizar su propuesta en el laboratorio hasta 1978, atrapando neutrones en un anillo magnético superconductor.

A pesar del éxito logrado con las trampas magnéticas para partículas neutras los resultados no eran del todo halagadores. Las partículas eran atrapadas a temperatura ambiente y tenían, como hemos visto, velocidades sónicas. Con velocidades tan elevadas es complicado hacer mediciones de alta precisión. Debería buscarse, por tanto, algún mecanismo para enfriarlas (es de-

cir, reducir sus velocidades). La respuesta nuevamente fue inspirada en las ideas de Einstein. Como resultado de su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico (el primero de los cinco artículos de 1905) quedó claro que la luz puede ejercer fuerzas sobre los átomos porque los fotones (los componentes fundamentales de la luz) tienen momento lineal. Cuando los átomos son bombardeados con luz de un determinado color, éstos continuamente absorben y emiten fotones. Al absorber fotones, todos incidiendo en la misma dirección, el átomo se ve obligado a desplazarse en la dirección del haz. Sin embargo, al no haber una dirección privilegiada para los fotones emitidos, el efecto neto de las emisiones será cero en promedio y el átomo no verá modificado su movimiento en la dirección del haz. La magnitud de esta fuerza de dispersión es muy pequeña si se usa luz convencional. A pesar de ello, la primera demostración de su utilidad fue hecha por Otto R. Frisch en 1933, al desviar un haz de átomos de sodio con la radiación resonante de una lámpara de sodio. Con el advenimiento del láser se abrió toda una nueva línea de pensamiento: las partículas no sólo podrían ser desviadas por la luz sino que también podían frenarse e incluso capturarse. La primera propuesta de usar el láser para enfriar partículas data de 1975 y fue hecha en forma independiente por T.W. Hänsch y A.L. Schawlow de la Universidad de Stanford y por D. Wineland y H.G. Dehemelt de la Universidad de Washington. La carrera por enfriar y atrapar partículas mediante luz había comenzado; muchos serían los caballeros que aceptarían el desafío y competirían gallarda y dignamente. Sin embargo, la con-

tienda sería ganada por los grupos de trabajo dirigidos por Steven Chu en la Universidad de Stanford, Claude Cohen-Tannoudji en el Laboratorio de Física de la Escuela Normal Superior de Francia y por William D. Phillips del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología en los Estados Unidos. Los tres se harían merecedores del Premio Nobel de Física en 1997.

FAUSTO.—*Asco me da ese estrambótico aparato hechiceresco... Y ese asqueroso menjurje ¿me quitará treinta años del cuerpo?... ¿No han descubierto algún bálsamo la Naturaleza ni un noble espíritu?*

MEFISTÓFELES.—*Ahora hablas de nuevo sesudamente, amigo mío. Para rejuvenecerte, hay también un medio natural, pero ese se halla en otro libro y forma un curioso capítulo...*

Fausto y Mefistófeles en la cocina de la bruja¹

El perfil de la manipulación dinámica tendría una vertiente adicional y paralela a las trampas de partículas. En 1968, Willis E. Lamb Jr., quien recibiera el Premio Nobel de Física en 1955 por el descubrimiento del corrimiento que lleva su nombre, se cuestiona sobre el significado de "preparar" y "medir" estados en mecánica cuántica. El resultado de sus consideraciones puede resumirse de la siguiente manera: por medio de una serie de pulsos de potencial se podría generar una fuerza impulsiva capaz de modificar el momento lineal de las partículas sin apenas cambiar su posición. La combinación acertada de estos pulsos y un potencial de fondo nos permitiría preparar sistemas cuánticos con momentos lineales iniciales bien definidos. Muy pronto, en la Universidad de Wisconsin, E. Lubkin in-

vestigó la posibilidad de manipular algo más que el momento lineal de las partículas. Su trabajo, marcadamente formal, extiende las ideas de Lamb a sistemas con espín $1/2$. En ambos casos se busca acotar el mar de posibles valores que puede tomar una propiedad específica del sistema: para Lamb el momento lineal y para Lubkin el espín. En consecuencia, no cualquier potencial serviría para “domar” al sistema en cuestión. Sin embargo, y esto es lo más chocante, suele ser una amplia familia de potenciales y no sólo uno el que produce los resultados deseados. En otras palabras, ¡un mismo proceso de evolución podría ser inducido por una enorme cantidad de potenciales, todos ellos diferentes entre sí!

Queda claro entonces que para entender la dinámica de un sistema no es suficiente con conocer su comportamiento en un intervalo de tiempo específico; no es sólo un proceso de evolución el que nos interesa estudiar sino toda la clase de evoluciones que un determinado sistema puede realizar ante diversas condiciones externas (esta serie de ideas ha sido discutida y formalizada en diversos contextos por I.E. Segal, R. Haag, D. Kastler, G. Ludwig y B. Mielnik, entre otros¹⁵). Esto sugiere de inmediato una pregunta: ¿qué tan amplia puede ser cada una de estas clases? Es decir, ¿son posibles todos los procesos de evolución o existen acaso algunos que el sistema simplemente no puede realizar?

Por ejemplo, digamos que un sistema cuántico evoluciona libremente durante un intervalo de tiempo $\tau = t - t_0$. Si al tiempo t_0 el sistema estaba en el estado inicial ψ_0 y al tiempo t se encuentra en el estado $\psi(t)$, ¿es posible la evo-

lución inversa? En otras palabras, ¿se puede implementar un proceso de evolución para llevar al sistema del estado $\psi(t)$ al estado ψ_0 ? Si bien la ecuación de Schrödinger tiene una solución sencilla para el problema $\psi_0 \rightarrow \psi(t)$, no es del todo claro cómo debe resolverse el problema opuesto $\psi(t) \rightarrow \psi_0$. Aún más, si tal solución existe, ¿puede ésta implementarse en el laboratorio? La respuesta al problema fue proporcionada por B. Mielnik, del Departamento de Física del CINVESTAV, en 1977. Para invertir la evolución de una partícula libre se deben usar potenciales externos dependientes del tiempo. El proceso inverso de evolución debe descomponerse en 11 pasos: 6 pulsos tipo oscilador intercalados con 5 evoluciones libres¹⁶. Los pulsos representan interacciones instantáneas de la partícula con un potencial tipo oscilador armónico $V = q^2/2$. Podemos entonces rejuvenecer a la partícula “regresándola en el tiempo” mediante un procedimiento sencillo: aplicamos un pulso de oscilador, la dejamos libre, aplicamos un pulso de oscilador, la dejamos libre, etc... Una vez que nuestra secuencia de 11 operaciones ha finalizado, la partícula será tan lozana como al principio: estará en el estado ψ_0 . Históricamente, estos resultados pueden considerarse como la primera extensión del “eco de espín” (*spin echo*) al caso de las variables canónicas q y p en un espacio de Hilbert de dimensión infinita. El *spin echo* es un fenómeno asociado con los giros que el espín de una partícula realiza alrededor de un eje que coincide con la dirección de un campo magnético constante. El término *space echo* resulta entonces natural cuando se trata de variables espaciales¹⁷. Curiosamente, en 1984 un par

de científicos estadounidenses, R.G. Brewer y E.L. Hahn, discutieron la viabilidad de esta generalización sin conocer los resultados de Mielnik. Estos autores afirman que existe una "memoria atómica", la cual podría activarse con mecanismos parecidos a los del *spin echo*¹⁸.

Posteriores investigaciones condujeron al concepto de los "rizos de evolución" (*evolution loops*). Un *evolution loop*¹⁹ es un proceso dinámico circular en el que el estado inicial de cualquier sistema cuántico se recupera después de un intervalo de tiempo τ . En esencia, un rizo de evolución es el elixir con el que los sistemas cuánticos pueden rejuvenecerse constantemente. Una vez que el sistema se prepara en un estado ψ_0 , el investigador experimental no debería preocuparse por mantenerlo así hasta que su experimento se ponga en marcha. Bastará con sujetar al sistema con un rizo de evolución y despreocuparse mientras se toma el almuerzo. Cada vez que el reloj marque un múltiplo de τ , el Doctor Fausto cuántico rejuvenecerá y volverá a su configuración inicial. Los rizos de evolución son la clave de la manipulación dinámica²⁰. Por ejemplo, es posible diseñar una serie de campos magnéticos que obliguen al espín de un electrón a evolucionar en la forma que se nos antoje²¹. La resonancia magnética no es más que un caso particular de estas posibilidades. Se pueden también imitar algunas de las operaciones fundamentales de la computación convencional, lo que permite hacer una conexión inmediata (conocida y muy estudiada en la actualidad) con la computación cuántica⁸. Por otro lado, la combinación de los rizos de evolución con la trampa de Penning permite realizar sofisticadas operaciones de control dinámico que difícilmente se lograrían usando sólo las trampas electromagnéticas convencionales^{22,23}. Algunos desarrollos teóricos como las fases geométricas son más fáciles de calcular y analizar si se emplean los rizos de evolución como herramienta matemática^{21,24,25}.

Una vez que hemos aprendido cómo atrapar partículas y toda vez que la manipulación de su comportamiento dinámico sea viable en el laboratorio, podemos pensar en el diseño de diminutos sistemas que trabajen como interruptores en el nivel cuántico y que estén o bien apagados o bien encendidos. Esta situación nos permite establecer un lenguaje de dos palabras: sí, no, o si se prefiere de dos números 1, 0. Este balbuceo, aunque aparentemente limitado, ha mostrado un enorme poderío como lenguaje de la computación moderna. Imitando la historia de las computadoras convencionales podríamos explotar este lenguaje "entrenando" átomos para que aprendan a sumar, después aprenderán a multiplicar. La resta y la división, como sabemos, serían una consecuencia directa de las otras. De ahí, el conjunto cada vez mayor de doctores Fausto cuánticos se graduaría en integración y diferenciación para volverse luego especialistas en ecuaciones diferenciales e integrales, y así sucesivamente, hasta ser capaces de ganar una partida de ajedrez al humano más inteligente del planeta. La computación cuántica es viable desde el punto de vista teórico y por ello hay mucho interés en la comunidad científica por resolver los correspondientes problemas experimentales. Uno de ellos, consecuencia del principio de incertidumbre, es conocido como decoherencia y significa simplemente que cualquier sistema cuántico inevitablemente interactúa con el medio, cambiando su estado dinámico con el tiempo. Si la computación cuántica es factible, se requiere que los circuitos cuánticos tengan una decoherencia muy grande, es decir, que

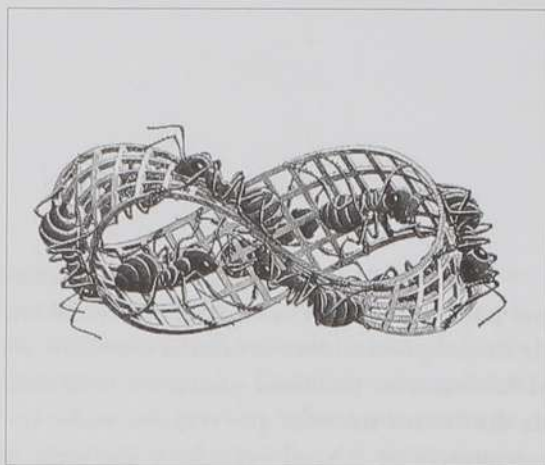


FIGURA 2. Con esta obra de Escher, titulada *La cinta de Möbius II*, es fácil representar el concepto de los rizados de evolución. Las hormigas (el sistema cuántico) avanzan siempre en un camino sin fin (evolution loop). Inevitablemente el camino las "obliga" a pasar por el mismo punto (estado inicial) cada cierto tiempo, sin que ellas tengan opción de evitarlo. Las hormigas de Escher en esta hermosa obra pueden entonces interpretarse como nuestros doctores Fausto cuánticos.

tardan mucho en cambiar su estado como consecuencia de la interacción con el recipiente que los contiene. Una posible solución, como hemos visto, sería usar apropiadamente los rizados de evolución. Otro de los problemas fundamentales concierne a las dimensiones de los circuitos cuánticos, necesariamente formados por un conjunto de átomos, fotones, electrones, o las combinaciones de éstas y demás partículas. La capacidad de cálculo depende no sólo de las propiedades cuánticas de estos sistemas sino también de la cantidad de integrantes atómicos. Sin embargo, a mayor número de integrantes, mayores dimensiones tendrá el sistema y menores serán las propiedades cuánticas que posea. Ésta parece ser una de las limitantes más fuertes. Un problema más consiste en hacer operaciones selectivas con los átomos. Por ejemplo, se debería ser capaz de obligar a un conjunto de átomos a efectuar un rizo de evolución mientras otro conjunto cambia la orientación de su espín de norte a sur y otro más emite fotones con una determinada energía.

Todas estas actividades en conjunto representarán un algoritmo de cómputo.

Té tuteas con el diablo, ¿y tendrás miedo a una llama?

Mefistófeles a Fausto frente a la bruja¹

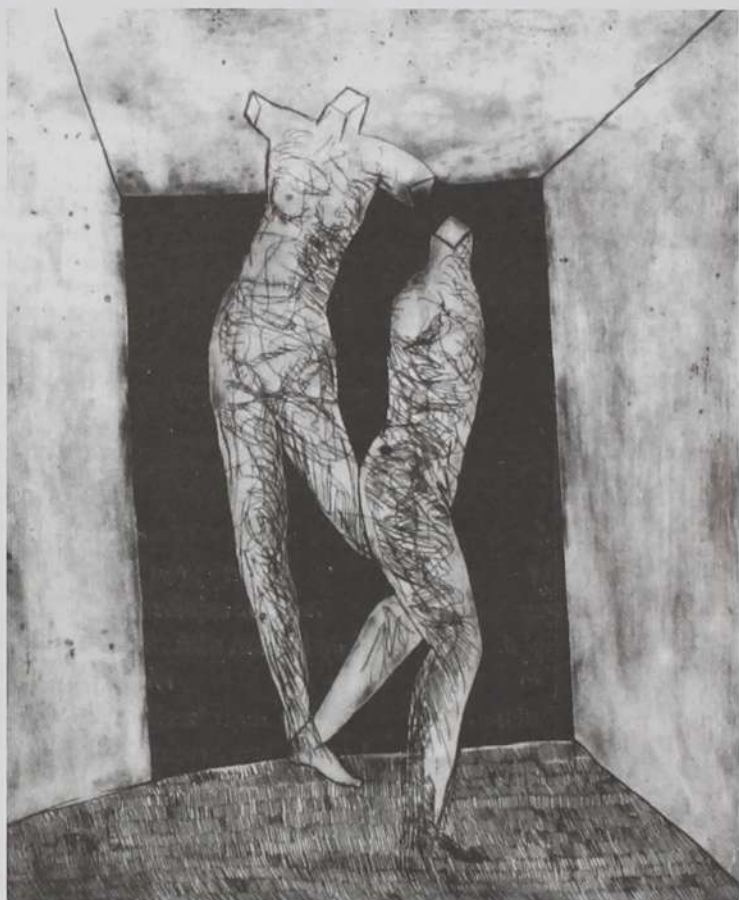
Como hemos visto, el control dinámico de los sistemas cuánticos se antoja no sólo viable, sino fundamental y aplicable. Las trampas de partículas ofrecen una inmejorable oportunidad para corroborar las predicciones teóricas que competen a una sola partícula. Einstein estaría entusiasmado con toda seguridad por estos avances. La manipulación dinámica, por otro lado, ofrece la oportunidad de pensar en una ingeniería cuántica. Con ésta, los sistemas cuánticos serían explotados para diseñar circuitos y sistemas con propiedades inalcanzables por los dispositivos electrónicos actuales, tal y como Feynman sugirió en sus últimos años de investigación científica.

AGRADECIMIENTOS

Los comentarios de N. Bretón, S. Cruz, D. Fernández, G.A. García, G. Herrera, E. Lomelí, G. López y D. Rosas han enriquecido en mucho el contenido y el estilo del presente trabajo. El tedio de transcribir el manuscrito de las primeras versiones a la versión electrónica final ha sido padecido por Miriam Lomelí. Por un extraño efecto no relativista en el tiempo, las observaciones de J. Hirsch en octubre de 1992 se ven también reflejadas en este escrito. A todos ellos mi agradecimiento y reconocimiento.

NOTAS

- Goethe, J.W., 1992, *Fausto*, México, Porrúa.
- La expresión *Annus Mirabilis* se usó para celebrar el año 1666, durante el cual Isaac Newton sentó las bases de su versión del cálculo infinitesimal y su teoría de la gravitación. Para más detalles consúltese: Stachel, J., 2003, *Einstein 1905: un año milagroso*, Barcelona, Crítica.
- Consúltese por ejemplo: Bretón, N., 1994, "La Relatividad General como herramienta de alta precisión astronómica", *Avance y Perspectiva* 13, p. 23.
- Chu, S., 1992, "Laser Trapping of Neutral Particles", en *Scientific American*, vol. 266, núm. 2, p. 48.
- Ekstrom, P., Wineland, D., 1980, "The isolated electron", *Scientific American*, vol. 243, núm. 2, p. 90.
- Fernández, D., García, R., 1989, "Física: Átomos sin núcleo como nuevos patrones de tiempo", *Avance y Perspectiva*, vol. 8, p. 30.
- Hau, L.V., 2004, "Frozen Light", *Scientific American Special*, vol. 13, núm. 1, p. 44.
- Nielsen, M.A., 2003, "Simple rules for a complex quantum world", *Scientific American Special*, vol. 13, núm. 1, p. 24.
- De la Cruz, E., Guzmán, F.S., Matos, T., 1999, "Materia oscura en el universo; el nuevo éter", *Avance y Perspectiva*, vol. 18, p. 139.
- Consúltese el portal <http://www.hawking.org.uk>
- Bretón, N., 1997, "Agujeros negros y ondas gravitacionales", *Avance y Perspectiva*, vol. 16, p. 301.
- La ciencia ficción, sin embargo, ha jugado un papel nada deleznable en el teatro de la historia de la ciencia. Véase por ejemplo el fascinante artículo de B. Mielnik, 1988, "Ficción científica y Relatividad General", *Avance y Perspectiva*, vol. 35, p. 34.
- Montesinos, M., 1999, "Gravedad y geometría", en "Los lunes en la ciencia", *La Jornada*, septiembre 6.
- Fernández, D., "The manipulation problem in Quantum Mechanics", en Ballesteros, A., et.al. (Eds.), 1999, *Symmetries in Quantum Mechanics and Quantum Optics*, España, Universidad de Burgos. Accesible electrónicamente en <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9810078>.
- Mielnik, B., 1973, "Generalized Quantum Mechanics", *Communications of Mathematical Physics*, vol. 37, p. 221 y las referencias ahí citadas.
- Mielnik, B., 1977, "Global mobility of Schrödinger's particle", *Reports on Mathematical Physics*, vol. 12, p. 331.
- Mielnik, B., 1986, "Space Echo", *Letters on Mathematical Physics*, vol. 12, p. 49.
- Brewer, R.G., Hahn, E.L., 1984, "Atomic memory", *Scientific American*, vol. 251, núm. 12, p. 50.
- Mielnik, B., 1986, "Evolution loops", *Journal of Mathematical Physics*, vol. 27, p. 2290.
- Fernández, D., Mielnik, B., 1994, "Controlling quantum motion", en *Journal of Mathematical Physics*, vol. 35, p. 2383.
- Fernández, D., Rosas-Ortiz, O., 1997, "Inverse techniques and evolution of spin-1/2 systems", *Physics Letters A*, vol. 236, p. 275.
- Mielnik, B., Fernández, D., 1989, "An electron trapped in a rotating magnetic field", *Journal of Mathematical Physics*, vol. 30, p. 537.
- Fernández, D., 1992, "Transformations of a wave packet in a penning trap", *Nuovo Cimento*, vol. 107B, p. 885.
- Fernández, D., Nieto, L.M., Santander, M., 1992, "Aharonov-Anandan geometric phase for spin-1/2 periodic Hamiltonians", *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 25, p. 5151.
- Fernández, D., Bretón, N., 1993, "Is there a prescribed parameter's space for the adiabatic geometric phase?", *Europhysics Letters*, vol. 21, p. 148.



DESCUBRIENDO LA ESTRUCTURA DEL UNIVERSO

GERARDO HERRERA CORRAL

LOS ANTIGUOS GRIEGOS PENSABAN QUE EL AMOR Y EL ODIO ERAN LAS fuerzas que gobernaban en la naturaleza. En la Edad Media e incluso hoy para algunas culturas o religiones son el bien y el mal los que dictan el transcurso de los acontecimientos. Para los físicos de nuestro tiempo son cuatro las fuerzas que gobiernan el mundo en que vivimos: la gravitación, la fuerza electromagnética, la fuerza débil y la fuerza fuerte.

En la inimaginable vastedad del universo y en todos los rincones del cosmos rigen ineluctablemente estas fuerzas, dándole forma y transmutando su contenido. La gravitación permite que las manzanas caigan de los árboles y que la Tierra gire alrededor del Sol. La fuerza electromagnética mantiene unidos a los electrones con los núcleos para formar los átomos y es responsable de la corriente eléctrica que surge de los tomacorrientes. La fuerza débil hace posible la producción de radiación y la energía en forma de calor que se produce en el centro del Sol. La fuerza fuerte mantiene unidos a los componentes más elementales de la materia que hoy conocemos como quarks y gluones para formar a los protones y neutrones los que a su vez forman los núcleos de los átomos.

En la vida diaria percibimos de manera inevitable a la gravitación mientras que en la física de partículas elementales en que se estudia la interacción de partículas subatómicas, la gravitación juega un papel menos notable pues su magnitud es considerablemente menor que las demás. La fuerza electromagnética y la fuerza débil han sido entendidas en un marco conceptual coherente que permite describir los fenómenos que observamos en la naturaleza. Este marco se llama Modelo Estándar y ha sobrevivido a todas las pruebas a las que se ha sometido, sin embargo los físicos están convencidos de que este modelo debe ser ampliado pues aún deja muchas preguntas abiertas: ¿Tienen las cuatro fuerzas un origen común? ¿Cómo es que los quarks y los gluones se unen para formar a los protones? ¿Por qué están los quarks y los gluones siempre confinados¹ en partículas como los protones y los neutrones y por qué no se les observa nunca como partículas libres? Éstas y otras preguntas permanecen sin respuesta.

El Dr. Gerardo Herrera Corral es investigador titular y jefe del Departamento de Física del CINVESTAV.
Correo electrónico: gherrera@fis.cinvestav.mx

Partícula	Masa en unidades de la masa del protón	Carga en unidades de la carga del electrón
u (up – arriba)	0.005	+2/3
d (down – abajo)	0.01	-1/3
c (charm – encanto)	1.5	+2/3
s (strange – extraño)	0.2	-1/3
t (top – cima)	180	+2/3
b (bottom – fondo)	4.7	-1/3
Electrón	0.000511	-1
Neutrino del electrón	$< 7 \cdot 10^{-9}$	0
Muón	0.106	-1
Neutrino del muón	< 0.0003	0
Tau	1.7771	-1
Neutrino del tau	< 0.03	0

Tabla 1. En la tabla superior se muestran los quarks y en la inferior los leptones. Éstas son las partículas elementales de las que está hecho todo en el universo.

Los bloques fundamentales que al ser apilados forman todo lo que observamos en la naturaleza, se muestran en la tabla 1. Éstas son las partículas elementales que a través de las cuatro interacciones mencionadas forman la materia en el universo. La mitad de éstas son los llamados quarks.

Las seis partículas en la parte inferior son los llamados leptones. De estos últimos, nosotros estamos más familiarizados con el electrón pues sabemos que está presente en los átomos y lo conocemos como responsable de la electricidad. Los experimentos que se realizan para investigar la estructura de la materia han podido explorar a escalas microscópicas asombrosamente pequeñas. En los experimentos actuales se pueden observar distancias 2000 veces menores que el tamaño de un protón. A esas distancias las partículas de la tabla 1 siguen siendo elementales, es decir no están compuestas por otras.

El Gran Colisionador de Hadrones o LHC (por sus siglas en inglés, Large Hadron Collider) nos llevará a distancias 10 veces menores que ésta². Es decir, podremos ver distancias 20 mil veces menores al tamaño del protón. Este gran acelerador se construye en la frontera entre Suiza y Francia en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN).

En el lenguaje de los especialistas los protones que serán acelerados en este portentoso aparato son parte de una familia de partículas llamadas hadrones. Los quarks listados en la tabla 1 se unen en grupos de 2 o 3 de forma tal que el conglomerado tiene siempre una carga eléctrica entera. A los grupos de 2 quarks se les llama mesones y a los conjuntos de 3 quarks se los denomina bariones. A todos ellos, es decir, a mesones y bariones se los llama hadrones y de ahí el nombre del gigantesco acelerador de hadrones (protones).

El Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) es el centro de investigación en física de partículas elementales más grande del mundo. Fundado en 1954 en las cercanías de Ginebra, Suiza, se ha convertido en un ejemplo de colaboración internacional. Lleva hoy día el liderazgo en el campo de la física de partículas elementales pues alberga el proyecto de investigación más ambicioso de todos los tiempos. En el CERN se construye el LHC (Large Hadron Collider) o Gran Colisionador de Hadrones que acelerará protones hasta que alcancen el 99.999999% de la velocidad de la luz. Cuando protones con esta velocidad choquen frontalmente se liberará una energía de 14 tera electrón volts. La más alta jamás lograda en el laboratorio.

A la energía que adquiere un electrón cuando se lo somete a una diferencia de potencial de 1 volt se le llama electrón volt. 14 tera-electrón-volts será la energía más alta jamás lograda en el laboratorio y equivale pues a 14 000 000 000 000 electrón-volts.

Los haces que acelerará el LHC consistirán en paquetes de protones separados por 25

nanosegundos, es decir 0.000000025 segundos. Esto significa que los paquetes se cruzarán 40 millones de veces cada segundo. Y durante estos cruces ocurrirán aproximadamente 20 choques de protones con protones. Las colisiones ocurrirán tan frecuentemente que los productos de una colisión aún estarán presentes en el detector cuando la siguiente ocurra. También acelerará iones pesados de plomo y oro para estudiar lo que ocurra cuando la materia es sometida a condiciones extremas de temperatura, densidad y presión.

Durante la colisión de iones pesados como éstos, la materia alcanzará temperaturas 100 mil veces mayores a las que se encuentran en el centro del Sol. Observar lo que ocurra cuando la materia sea sometida a estas condiciones extremas nos dará importante información que permitirá entender mejor la estructura del universo.

El LHC (ver fig. 1) es sin duda uno de los proyectos científicos más ambiciosos de nuestro tiempo. Contribuir en su desarrollo representa no sólo participar en una actividad científica interesante, sino formar parte de una empresa humana de vanguardia en busca de conocimiento. México a través de un grupo de científicos de varias instituciones está presente en este proyecto que por sus dimensiones y por su alcance tiene ya trascendencia histórica.

El Departamento de Física del CINVESTAV contribuye de manera importante al desarrollo de los proyectos del Gran Colisionador de Hadrones en un consorcio de instituciones entre las que se encuentran el Instituto de Ciencias Nucleares, el Instituto de Física de la UNAM, la Universidad Autónoma de Puebla, la Univer-

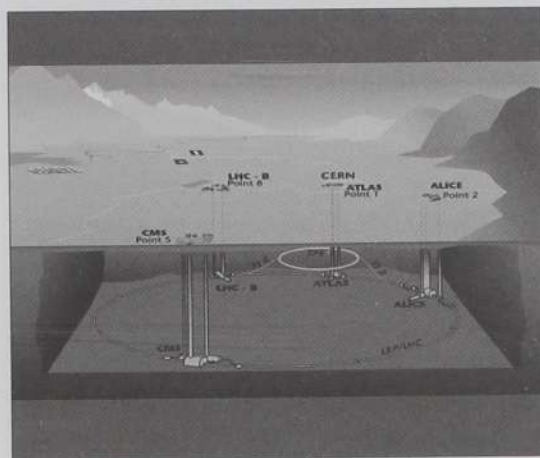


FIGURA 1. El Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en la frontera entre Francia y Suiza alberga al proyecto del Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Aquí se muestra el túnel que alberga al acelerador y las cavernas donde se colocarán los experimentos del proyecto. En el proyecto ALICE y en el proyecto CMS participan grupos de mexicanos donde los investigadores del Departamento de Física juegan un papel importante.

sidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo y el Departamento de Física Aplicada del campus Mérida del CINVESTAV. Este grupo de instituciones mexicanas construye parte de lo que será el experimento ALICE. Recientemente se ha constituido un segundo consorcio en el que el Departamento de Física del CINVESTAV también participa junto con la Universidad de San Luis Potosí y la Universidad de Puebla. Este nuevo grupo presentó una propuesta de participación en el proyecto CMS del Gran Colisionador de Hadrones. A continuación comentaremos brevemente las ideas generales de los proyectos experimentales en que estamos involucrados.

ALICE, EL ORIGEN DEL TIEMPO

Los científicos piensan que hubo una gran explosión de la que surgió todo en el universo. Hoy, 13,700 millones de años más tarde, el universo es tan grande que ya no usamos los kilómetros sino la distancia a la que viaja la luz en un año para escribir sus dimensiones. Sin embargo al comienzo estaba todo apretado en

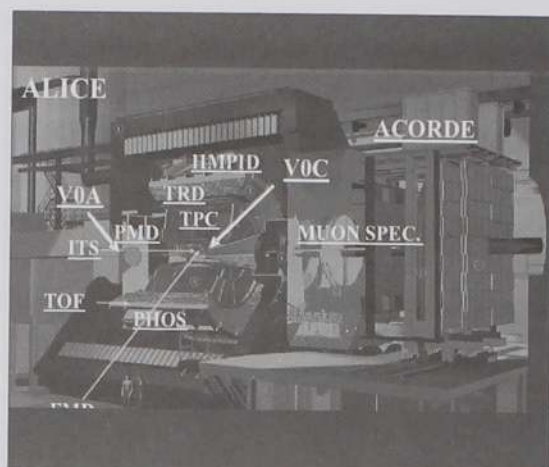


FIGURA 2. El detector ALICE mostrando los dispositivos que lo conforman. El detector V0A se diseña y construye en México. Este dispositivo funcionará de manera coordinada con el V0C localizado en el lado opuesto y que será construido en Francia. La interacción de iones pesados y protones ocurrirá en el centro de este conglomerado de instrumentos. En la parte superior del detector ALICE, 60 paneles se encargarán de medir la radiación cósmica. El arreglo de detectores se llama ACORDE (por sus siglas en inglés, A COsmic Ray DEtector). Estos paneles se diseñaron en México y están actualmente en su última etapa de construcción. A finales de 2004 serán transportados a Suiza para su instalación.

un volumen no mayor que el ojo de una aguja. Todo lo que observamos está hecho de partículas de materia que al comienzo estaba aún por formarse. Los quarks y los gluones que en el universo frío actual están confinados dentro de los protones y los neutrones estaban en ese entonces tan calientes que no se unían aún para formar partículas. A la materia en este estado se le ha denominado plasma de quarks y gluones.

Producir y estudiar este plasma es la meta del experimento ALICE (por sus siglas en inglés: A Large Ion Collider Experiment).

Pensamos que el plasma de quarks y gluones puede existir hoy en el corazón de las estrellas que son tan densas que un trozo de ellas del tamaño del ojo de una aguja debe pesar tanto como mil aviones jumbo. Si el plasma de quarks y gluones existe ahí, no podemos verlo y estudiarlo. Así que para entender los primeros instantes del universo debemos crear un plasma de quarks y gluones en el laboratorio de manera controlada. Para hacerlo, es necesario arrancar

los electrones de los átomos a fin de tener iones a los que se acelera hasta que alcancen velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Luego se los hace chocar unos contra otros para que los protones y neutrones que los forman se compriman tanto que acaben por fundirse.

Experimentos anteriores han estudiado las interacciones de iones de oxígeno, azufre y plomo que se estrellaban contra un blanco fijo. Los resultados de estos experimentos han dado indicios de que el plasma de quarks y gluones ha sido creado efímeramente antes de enfriarse y convertirse en materia ordinaria.

En el LHC, iones de plomo chocarán unos contra otros a una energía mucho mayor. Los físicos piensan que estas energías son ideales para crear el plasma permitiendo al experimento ALICE estudiar con detalle sus propiedades.

El reto más importante de la física de iones pesados es poder registrar el enorme número de partículas que surgen de la colisión. En los experimentos actuales se pueden llegar a producir eventos con hasta 1500 partículas. En LHC se verán eventos con 50 mil o más partículas. Una buena fracción de las cuales debe ser identificada y trazada con las huellas que deje en los dispositivos detectores. Sólo con toda esta información se podrá reconstruir una imagen que permita encontrar las señales de las diferentes etapas de la evolución de la materia ordinaria a un plasma de quarks y gluones y el regreso del plasma a la materia ordinaria.

Cuando los iones choquen la energía del impacto será lo suficientemente grande para producir partículas J/ψ que están formadas de dos quarks encanto (el tercero en la tabla 1). Como puede verse este quark es más pesado que los quarks que forman a los protones y a los neutrones. El destino de las partículas J/ψ (producidas en la colisión dependerá de lo que ocurra con la materia que la rodee en las condiciones extremas de densidad y temperatura en las que se encontrará.

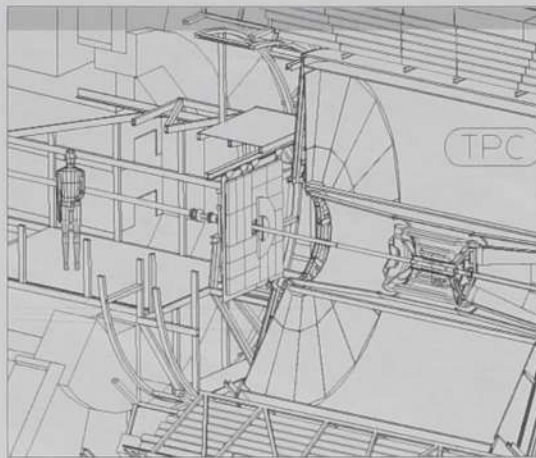
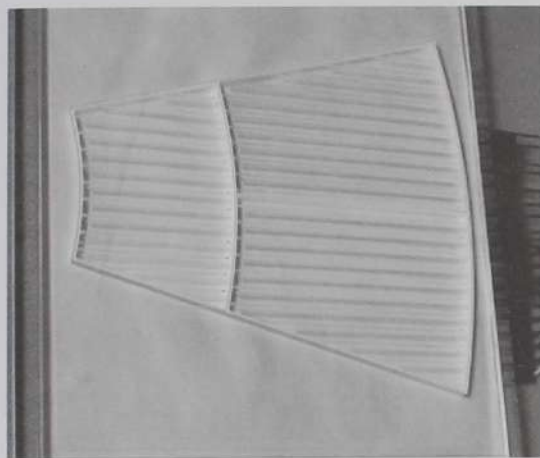


FIGURA 3. Segmento del anillo que muestra las celdas con fibras ópticas de lectura. A la derecha se puede apreciar un corte del detector ALICE mostrando los dispositivos en su interior. La mitad del detector V0A ubicado a 3.4 mts del punto de interacción se puede ver aquí en posición. Una pieza con forma de "D" completará el disco de un metro de diámetro.

El número de partículas J/ψ que se producen en una interacción tiende a aumentar cuando la masa de los iones que colisionan aumenta. Sin embargo, cuando iones de plomo chocan a muy alta energía el número de J/ψ que se producen en cada evento cae dramáticamente.

La probabilidad de crear un plasma de quarks y gluones en una colisión de plomo contra plomo a muy alta energía es grande. El impacto produce condiciones en el medio que evitan que los quarks que forman a los J/ψ se unan para formarlo. Este mecanismo de destrucción de partículas es un indicador de que algo dramático está ocurriendo. De esta manera, el estudio de la producción de J/ψ puede darnos información sobre las condiciones de la materia al momento de la colisión.

Por otra parte, la producción de algunas partículas que contienen a otro tipo de quarks, se verá favorecida. El número de quarks extraños (el cuarto en la tabla 1) dentro del plasma se espera sea grande, pues aunque éstos son pesados y difíciles de producir, el plasma será más estable cuanto más diferentes partículas contenga.

Contar el número de partículas que contenga quarks extraños puede dar información de la producción y evolución del plasma. Como

éstas existen otras muchas señales que indicarán la presencia del plasma y que nos darán información de sus propiedades.

La colaboración ALICE,³ construye un detector que podrá medir lo que ocurra cuando los iones de plomo choquen a la más alta energía jamás lograda. El detector ALICE (ver fig. 2) contará con varios dispositivos que de manera complementaria medirán diferentes aspectos del evento.

Por ejemplo, con el fin de identificar a las partículas, ALICE contará con un sistema de tiempo de vuelo. Las partículas más pesadas necesitan más tiempo para llegar desde el punto de la interacción donde fueron producidas hasta las capas externas del detector. Midiendo el tiempo de arribo es posible decir si se trata de un pión, de un kaón o de un conocido protón. El sistema de tiempo de vuelo permite identificar a las partículas en un intervalo de velocidades limitado.

Las partículas con una velocidad mayor podrán ser reconocidas con el uso de un detector Cherenkov. Este dispositivo puede identificar a las partículas observando la luz que emiten cuando se mueven en un medio. Como éste se tendrán muchos otros dispositivos trabajando de manera coordinada.

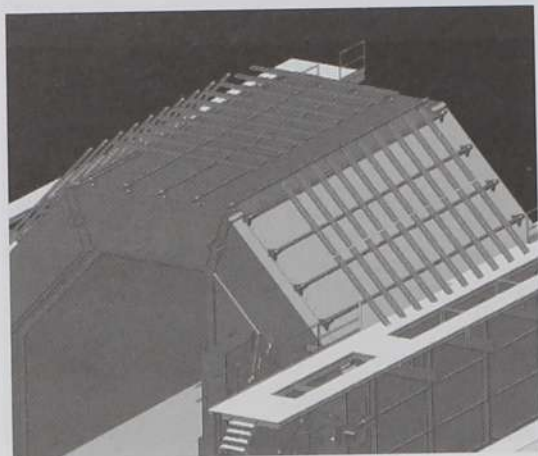


FIGURA 4. El detector de rayos cósmicos que se construye en México será colocado en la parte superior de ALICE como se indica en el diseño de la izquierda. Cada uno de los paneles que se aprecia (60 en total) serán como el que se muestra ya terminado en la parte derecha.

El grupo mexicano que participa en ALICE diseña y construye dos de los detectores que forman parte fundamental del experimento: el detector V0 y el detector ACORDE.

El consorcio mexicano está formado por dos grupos cada uno de los cuales tiene la responsabilidad de uno de los dispositivos mencionados. El primer grupo está formado por investigadores del Departamento de Física y del Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV así como del Instituto de Ciencias Nucleares y del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México⁴. Este grupo no sólo diseña y construye el detector V0, además se hará cargo de su instalación final y de la operación durante la toma de datos que se iniciará en 2007.

El detector V0 es el dispositivo más rápido del detector ALICE. Deberá analizar todos y cada uno de los eventos para tomar una decisión cada 25 nanosegundos (es decir cada 0.025 millonésimas de segundo) sobre la calidad del mismo. Si el evento en turno es bueno el sistema V0 que se construye en México deberá enviar señales a otros detectores para despertar su electrónica. Enviará también una señal al procesador central del disparador de todo el detector. A esto se llama técnicamente trigger

de nivel 0 y se trata del nivel de disparo de mayor velocidad por lo que es crucial en el funcionamiento del experimento en su totalidad.

El detector V0 (ver fig. 3) consiste de un anillo de plástico centellador de 1 metro de diámetro segmentado en celdas que serán leídas con fibras ópticas.

Cuando una partícula lo atraviesa, el plástico emite luz que es capturada por las fibras ópticas y llevada hasta un tubo fotomultiplicador que convertirá la señal luminosa en una señal eléctrica.

El segundo grupo mexicano está formado por investigadores de la Universidad de Puebla, la Universidad de Michoacán, el Instituto de Ciencias Nucleares (UNAM) y el Departamento de Física del CINVESTAV. Este grupo construye paneles detectores de rayos cósmicos que serán colocados en la parte superior del magneto de ALICE. El detector de rayos cósmicos proporcionará una señal que separe a los eventos del acelerador de los eventos de rayos cósmicos. Los investigadores mexicanos están viendo la manera de aprovechar otras partes del detector ALICE para investigar eventos de rayos cósmicos con características peculiares que parecen haber sido observados con anterioridad pero de los que no se tiene certeza. El detector consiste de paneles con dos paletas de plástico

centellador (ver fig. 4). El plástico como en el caso del detector V0 produce luz cuando alguna partícula lo atraviesa. Una pieza de lucita captura la luz y la trasporta hasta el fotomultiplicador.

Es la primera vez que México participa en un experimento de altas energías en la etapa de construcción y es importante decir que es a un nivel de responsabilidad muy alto pues los dispositivos que se diseñan y construyen en México son considerados parte del montaje esencial del experimento.

CMS, EL ORIGEN DE LA MASA

El Modelo Estándar es sin duda uno de los grandes logros intelectuales de la física. La unificación de dos fuerzas de la naturaleza: la fuerza electromagnética y la fuerza débil en una sola interacción les ha valido el premio Nobel a los físicos teóricos que la propusieron y a los físicos experimentales que marcaron el camino con sus observaciones primero y con las evidencias de su veracidad después. Sin embargo, sabemos que el modelo estándar no es aún la teoría a la que aspiramos llegar.

¿Por qué las partículas tienen masa? es una de las preguntas para las que el modelo estándar tiene una respuesta. La verificación de esta respuesta está a cargo del experimento CMS (por sus siglas en inglés: Compact Muon Solenoid).

Según el modelo estándar, debe existir un campo que llena el universo entero y las partículas generan sus masas al interactuar con este campo. Cuanto más fuerte es la interacción con el llamado campo de Higgs (en honor al físico británico Peter Higgs) mayor será la masa de la partícula en cuestión. La naturaleza de este campo es desconocida. El diseño del detector CMS (ver fig. 5) ha sido optimizado para observar y estudiar al campo de Higgs.

El detector CMS⁵ tendrá varias capas, cada una de ellas diseñada para ejecutar una tarea específica que permita medir con precisión las

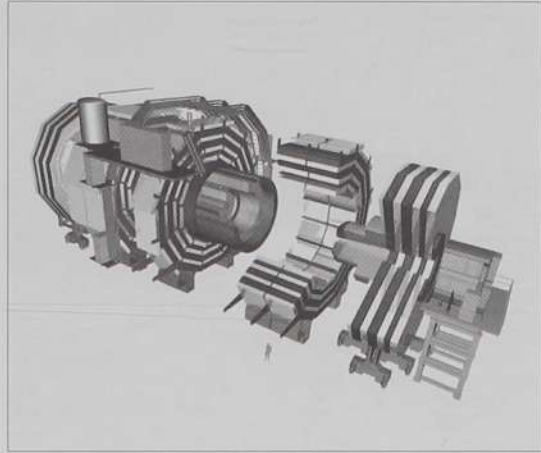


FIGURA 5. Dibujo del detector CMS mostrando sus diferentes componentes. Se puede apreciar el tamaño de una persona para dar idea del gigantesco complejo de aparatos que entrará en funcionamiento en 2007.

energías y velocidades de todas las partículas producidas cuando protones choquen contra protones en el Gran Colisionador de Hadrones. En su totalidad, el detector tendrá 15 millones de canales individuales que serán controlados por potentes computadoras.

Un grupo de mexicanos de varias instituciones participa en la caracterización de los detectores que serán parte del sistema de trayectorias internas. Dichos detectores son dispositivos de material semiconductor y tienen como función indicar el lugar por el que pasa cada una de las partículas que se producen cuando los protones chocan. Como en el caso del detector ALICE, el detector CMS deberá entrar en funcionamiento en 2007 pero las tareas de caracterización de los detectores se están llevando a cabo desde ahora en el Departamento de Física del CINVESTAV.

AUGER, LOS CONFINES DEL UNIVERSO

Los rayos cósmicos son partículas que provienen del espacio y que constantemente llegan hasta nuestro planeta. Conocemos el origen de la mayoría de estas partículas. Los campos magnéticos del Sol y los campos magnéticos que se generan en la explosión de supernovas de nues-



FIGURA 6. Nuestro planeta es bombardeado constantemente por rayos cósmicos. El origen de la mayoría de estos rayos es conocido pero la existencia de rayos cósmicos con energías gigantescas ha despertado la curiosidad de los físicos. Aquí se muestra uno de los 1600 tanques que ya están en funcionamiento en Argentina. Los tanques son completamente oscuros en su interior excepto cuando alguna partícula los atraviesa. La partícula produce luz cuando pasa por el agua en el interior del tanque, la cual es captada por fototubos que la traducen en una señal eléctrica. La información que se obtiene de esta señal en conjunto con las de otros tanques permite saber cuál fue la energía del rayo cósmico que la originó.

tra galaxia aceleran a las partículas. Éstas viajan enormes distancias para luego golpear los átomos de nuestra atmósfera formando chubascos de partículas que alcanzan la superficie terrestre. Sin embargo se han observado rayos cósmicos con una energía enorme de hasta 10^{19} electrón-volts y aún mayores.

Para darse una idea de lo gigantesco de estas energías baste decir que en el más grande acelerador (el LHC del que hablamos arriba) las partículas alcanzarán una energía que es un millón de veces menor. El origen de estos rayos ultra-energéticos no se conoce.

De dónde provienen y cómo han logrado obtener tal energía es un misterio que el experimento Pierre Auger pretende resolver. Las partículas con energías enormes que provienen del cosmos no son muy comunes. Partículas con energías mayores a 10^{19} eV aparecen en promedio uno cada año por kilómetro cuadrado y las de energías mayores a 10^{20} eV aparecen uno cada siglo por kilómetro cuadrado. Es por eso que

para verlas y estudiarlas se requiere de una gran superficie llena de detectores.

Al oeste de Argentina, en la mitad de la pampa amarilla, se construye el gigantesco observatorio de rayos cósmicos⁶. En el proyecto participa un grupo de mexicanos de varias instituciones. El Departamento de Física del CINVESTAV ha estado presente desde el inicio cuando el Proyecto Auger era apenas una idea. Hoy se han cubierto 3000 kilómetros cuadrados con detectores (ver fig. 6) que en pocos años darán respuesta a la inquietante pregunta que plantean estos mensajeros del universo.

EL DORADO, UN SUEÑO ÚTIL

La joyas que Hernán Cortés en México, y Francisco Pizarro en Perú obtuvieron a su llegada al Nuevo Mundo, alentaron la ilusión ya muy vieja de la existencia de un reino legendario exuberante en oro. El fabuloso país encendió los deseos de riqueza y poder de mucha gente que emprendió largas y costosas expediciones para encontrarlo. Se le buscó en las cercanías de Santafé de Bogotá en Colombia y al no encontrarlo la búsqueda se desplazó a los valles del Orinoco y a las profundidades del Amazonas. Se le buscó en el norte de México, en las selvas, montañas y valles. El sueño nunca se haría realidad, pero gracias a él fue posible la exploración y conquista del continente americano.

De manera similar la búsqueda del conocimiento ha llevado siempre al desarrollo de ideas que han beneficiado a la humanidad y han modificado su manera de vivir.

Los aceleradores de partículas inventados en 1920 como herramienta de la investigación científica son aplicados hoy en muchas otras áreas como la industria, la medicina y la investigación. Los aceleradores se han convertido en instrumentos importantes como avances tecnológicos para el tratamiento de cáncer y la mejor producción de radio fármacos. Los

aceleradores proveen haces láser que funcionan como modernos bisturíes para cirugía de precisión.

La terapia de hadrones es el nombre que se ha dado al tratamiento de cáncer con haces de protones. Ahora los físicos están viendo la forma de extender la técnica a haces de partículas más pesadas como núcleos de carbón. La idea es que partículas de mayor peso puedan depositar más energía en el tumor, matando de manera más efectiva y con menor daño al tejido sano en la periferia del tumor.

En la protección del medio ambiente los aceleradores han entrado por la puerta grande. Con su uso es posible romper los restos nucleares que se producen en los reactores y que tienen un tiempo de vida muy largo para convertirlos en materiales inofensivos. La técnica es llamada transmutación de basura nuclear con aceleradores ATW (por sus siglas en inglés: Accelerator Transmutation of Waste). Esto se logra con intensos haces que bombardean un blanco para producir neutrones. Los neutrones a su vez se combinan con desperdicio radiactivo causando que sus núcleos se dividan para producir elementos estables. Pronto se tendrán también aceleradores que irradiarán con haces de electrones a los gases tóxicos de las fábricas y estaciones de potencia después de ser mezclados con amoníaco para evitar que óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre sean liberados. Con este procedimiento se pueden producir fertilizantes de los residuos contaminantes.

La más novedosa técnica para producir energía es el llamado Amplificador de Energía que inventó Carlo Rubbia ganador del Premio Nobel

por su contribución a la física de partículas y quien fuera director general del CERN. El amplificador de energía bombardeará a un blanco de combustible nuclear con un haz de protones causando la fisión nuclear y la liberación de energía. Las ventajas del amplificador de energía sobre los reactores nucleares convencionales son dos: el proceso finaliza cuando el acelerador es apagado sin que se generen reacciones en cadena que puedan salir de control, y siendo una técnica similar a la ATW, la basura nuclear que generan los reactores nucleares convencionales puede ser usada como combustible generando productos estables que no son nocivos. Además esta tecnología no puede ser usada para producir armas nucleares. El desarrollo de ingeniería que lo hará posible ya está en camino⁷.

Mientras viven, las plantas y los animales mantienen una razón constante de Carbón 12 a Carbón 14. Cuando las plantas y animales mueren, la cantidad de Carbón 14 comienza a disminuir y esta razón cambia. El Carbón 14 es inestable y decae a nitrógeno 12 con un tiempo de vida de 5730 años. Con la espectrometría de masas que se realiza con gran precisión gracias a los aceleradores de partículas es posible decir cuánto tiempo hace que vivió el material del que están hechos los objetos. Así por ejemplo, con el uso de esta tecnología fue posible decir que el algodón, con el que fue fabricada la Sábana Santa de Turín, Italia, que supuestamente cubrió a Cristo después de que fuera crucificado, creció en 1325 d. de C.

Los alquimistas, partiendo de la idea aristotélica de que todo está hecho de aire, fuego, tierra y agua, desarrollaron su postulado fun-

damental que decía: “la materia es única y puede ser transmutada mediante cambios en las proporciones de sus componentes”. Creían en la existencia de una sustancia que podía provocar estas transmutaciones. A esta sustancia se la llamó piedra filosofal y se le atribuyeron propiedades fantásticas como el rejuvenecimiento y la curación de enfermedades, por lo que fue nombrada también “el elixir de la vida”. En su intento por conseguir la transmutación de unas sustancias en otras, los alquimistas utilizaron procedimientos de laboratorio. Así se descubrieron numerosas sustancias y se diseñaron diversos instrumentos que después jugarían un importante papel en la metodología científica.

La instrumentación que se desarrolla en los experimentos de altas energías no es menos importante en nuestras vidas. Una de las más recientes formas de diagnóstico hace uso de radio fármacos que son materiales activados en un acelerador de protones y suministrados al paciente.

Las partículas que emiten estos radio fármacos permiten obtener imágenes del interior del cuerpo y su metabolismo. El llamado PET (Positron Emission Tomography, por sus siglas en inglés) es un detector desarrollado en laboratorios de altas energías por físicos dedicados a la física de partículas elementales. Este

dispositivo permite detectar cambios en el tejido mucho antes de que aparezcan los síntomas de una enfermedad dando a los médicos mejores posibilidades de tratar al paciente. Los radio fármacos que se suministran al paciente emiten positrones (que es por cierto una partícula elemental). El positrón no vive mucho pues rápidamente desaparece en el medio emitiendo fotones que son detectados en el PET. Como ésta, muchas de las técnicas usadas en la medicina han sido y siguen siendo desarrolladas en los laboratorios de altas energías. Hoy en día se estima que existen alrededor de 10 mil aceleradores de partículas en el mundo, un poco más de la mitad de éstos es usado con propósitos médicos y sólo unos cuantos en la investigación científica.

NOTAS

¹ Herrera Corral, G., “La naturaleza del vacío. El desconfinamiento de quarks”, *¿Hacia dónde vamos con la ciencia?* Daniel Chávez Frago y María de los Ángeles Erazo, p. 42 de CONVERSUS, núm. 14, 2002.

² Para mayor información sobre aceleradores recomendamos el libro: De la Paz Ramos Lara, María (coordinadora). *Experiencia Mexicana en Aceleradores de Partículas*, Siglo XXI editores.

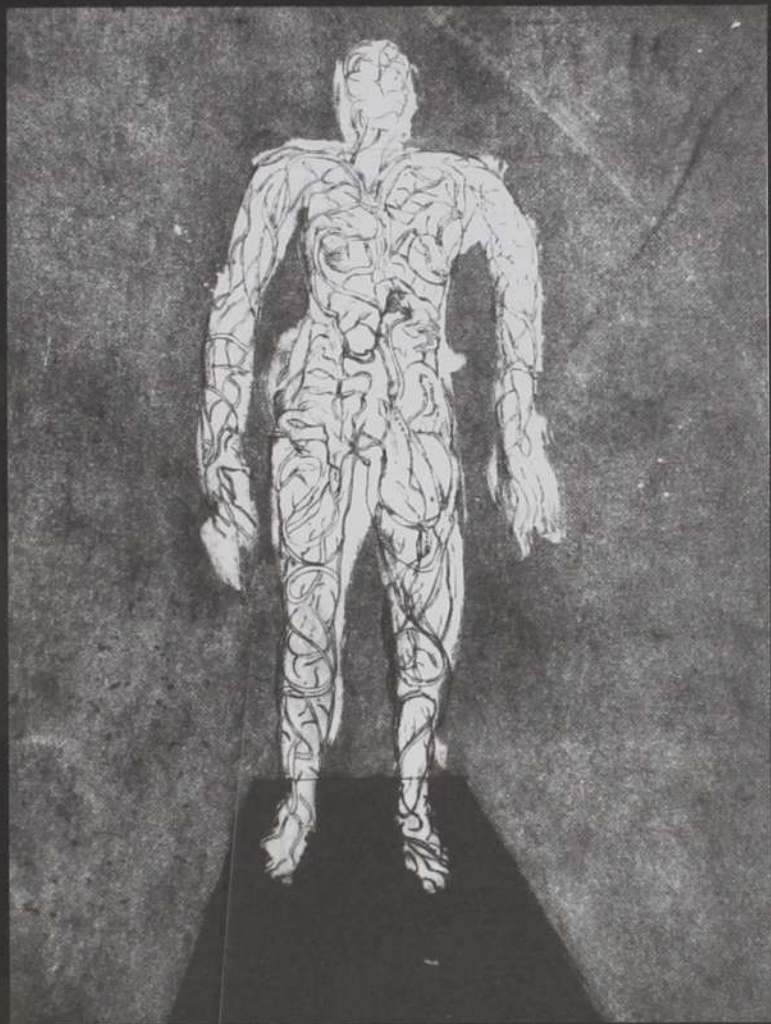
³ <http://www.cern.ch/ALICE>

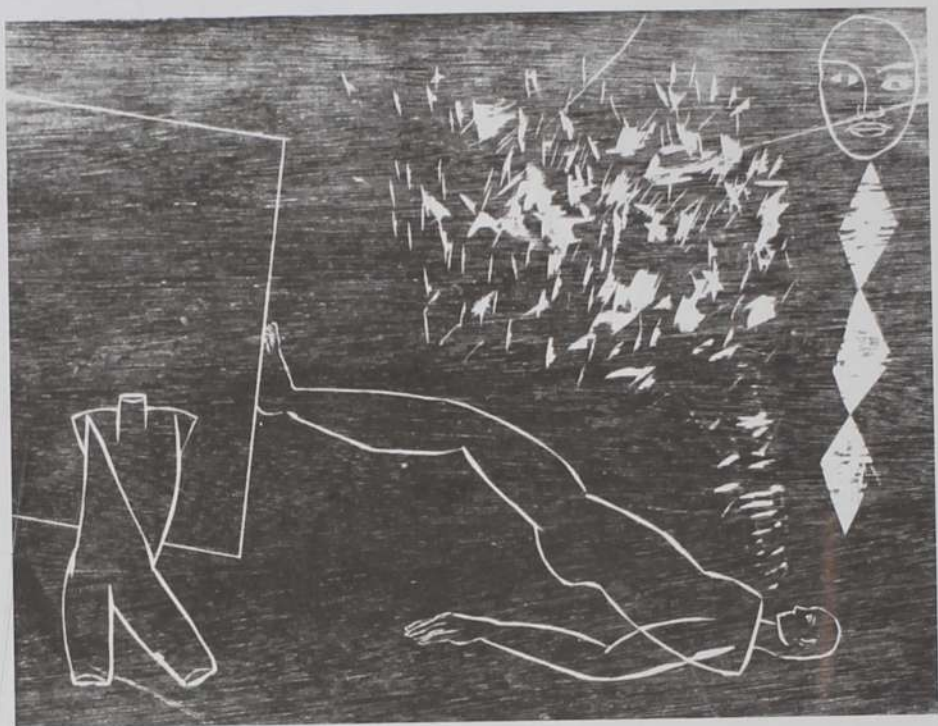
⁴ “Construyen en el CINVESTAV y la UNAM detector de partículas elementales” por Gerardo Herrera Corral, *El Sol de México*, martes 5 de junio, 2001, Año XXXVI, No.12827

⁵ <http://cmsinfo.cern.ch>

⁶ <http://www.auger.org>

⁷ Rubbia, Carlo, “The Energy Amplifier”, 1994, puede consultarse en la página del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN): <http://preprints.cern.ch/cgi-bin/y> en http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_amplifier





ENCONTRAR LOS BLOQUES FUNDAMENTALES CON QUE LA NATURALEZA fabrica todos los objetos materiales ha sido una de las tareas que ha fascinado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Ya como parte de la ciencia, este problema se abrió paso dentro de la química del siglo XIX, hasta establecer la existencia del átomo y con el descubrimiento del electrón y la radioactividad pasó a ser parte de la física a finales de ese mismo siglo. Pero es sólo a partir de los inicios del siglo XX cuando el área de Física de Partículas Elementales toma cuerpo, al mismo tiempo que se establece que el núcleo atómico se compone de protones y neutrones y se descubren partículas inesperadas en los rayos cósmicos, tales como el muón, el pión y el kaón. Con el advenimiento de los aceleradores se produjo en el laboratorio una gran variedad de partículas con interacciones nucleares, también llamadas interacciones fuertes. A este tipo de partículas se les denominó hadrones para diferenciarlas de las que no presentan interacciones fuertes: los leptones.

En la segunda mitad del siglo XX se construyó la teoría de los quarks, como los bloques de los que se componen los hadrones. La existencia de los quarks quedó establecida experimentalmente en la década de los setenta. Por otra parte el análisis detallado de la radioactividad condujo a entender que existe otro tipo de interacciones, además de las fuertes y las electromagnéticas (éstas últimas responsables de las propiedades químicas de los elementos) a las que se les llamó interacciones débiles para denotar que su intensidad es mucho menor que las electromagnéticas que a su vez son de menor intensidad que las fuertes.

En el mundo atómico y subatómico impera la mecánica cuántica. Por otra parte la magnitud de las energías que se manejan para escuchar el mundo subnuclear requiere del uso de la mecánica relativista, la cual es superior a la mecánica de Newton. La mecánica relativista fue formulada por Albert Einstein en 1905, hace 100 años, hecho que se celebra en el 2005. La diferencia fundamental entre la mecánica de Newton (o clásica) y la relativista es que en la primera las señales, o sea aquello que permite las observaciones, viajan a una velocidad infinita mientras que en la última viajan a la velocidad de la luz que

es finita e independiente del sistema de referencia (dentro del conjunto de sistemas de referencia inerciales o no acelerados).

La formulación conjunta de la mecánica cuántica y la mecánica relativista se expresa adecuadamente en el lenguaje de la Teoría Cuántica del Campo, que es capaz de describir la aniquilación y la creación de partículas, sus decaimientos y sus interacciones. Así, las teorías sobre física de las partículas elementales se describen con el lenguaje de teoría cuántica del campo. Encontrar el conjunto de las genuinas partículas elementales es tarea de la interrelación entre la física experimental y la física teórica.

Gracias a las investigaciones llevadas a cabo hasta mediados de la década de los setenta se concluyó que las partículas verdaderamente elementales (hasta donde alcanzan a discernir el esquema y los instrumentos actuales) son los llamados leptones (que como el electrón no tienen interacciones nucleares) y los quarks (que componen al protón, neutrón y demás hadrones, que son las partículas compuestas que tienen interacciones nucleares). En cuanto a los leptones se refiere hay 6, tres cargados y tres neutros, éstos últimos son los neutrinos. De los quarks también hay 6, todos de carga fraccionaria (en unidades de la carga del electrón), pero de cada quark hay tres copias que se diferencian entre sí por un número cuántico nuevo, que a falta de códigos apropiados se denomina "color". Los leptones y quarks se pueden agrupar, según sus interacciones débiles, en tres familias, cada una de las cuales contiene dos leptones, uno cargado, como el electrón, y uno neutro, o sea un tipo de neutrino, y dos quarks, uno de carga $2/3$ y otro de carga $-1/3$ y cada uno en tres colores. La clasificación y propiedades de leptones y quarks se ilustra en la tabla 1 del artículo precedente.

La variedad de partículas, elementales y compuestas, sugirió, en cada etapa histórica, el uso de simetrías para entender las relaciones entre

ellas. Una simetría existe cuando la expresión matemática de las leyes de la física es independiente (invariante) del sistema de referencia, ya sea espacio-temporal o del espacio abstracto donde varían los números cuánticos que caracterizan a las partículas. Las simetrías que relacionan partículas entre sí las llamamos simetrías internas para diferenciarlas de las espacio-temporales. De éstas últimas son ejemplos conocidos la simetría rotacional que permite la clasificación de estados atómicos y la simetría de Lorentz que es la base de la teoría de la relatividad. El lenguaje apropiado para manejar simetrías es la teoría de grupos. La búsqueda de la simetría responsable de las similitudes entre los hadrones condujo a la formulación de la teoría de quarks, como base del espacio donde opera el grupo clasificador de hadrones $SU(3)$. Aparte de los grupos de clasificación existen los que corresponden a simetrías espontáneamente rotas. Decimos que cierta simetría está espontáneamente rota si el estado base del universo, en su correspondiente fase, no es neutro respecto del correspondiente grupo. La simetría queda así rota no en la expresión de la dinámica del sistema, sino por su estado base. Dicho detalle impide que este tipo de grupos sirva para clasificar estados (partículas), pero conduce a otras manifestaciones que nos permiten identificar dicha simetría, una de ellas es la existencia de una partícula sin masa denominada Bosón de Goldstone. Un sistema típico con simetría espontáneamente rota es un ferromagneto para el cual el estado base, debajo de cierta temperatura crítica, consiste en un estado con todos sus dominios magnéticos orientados en la misma dirección, lo cual rompe la simetría rotacional.

El papel de las simetrías en la física de partículas elementales subió a un rango superior en la década de los cincuenta cuando se les identificó como determinantes de la dinámica al postularse como simetrías locales, es decir cuando se exige que las transformaciones que forman

el grupo correspondiente varíen de punto a punto en el espacio cuatridimensional cotidiano. A éstas se les denomina simetrías de norma y para que sean exactas se requiere la existencia de campos que representan las fuerzas (las partículas cuyo intercambio entre las partículas ordinarias son la causa de las interacciones conocidas o de nuevas interacciones). Así la interacción electromagnética es consecuencia ineludible de la simetría de norma asociada al grupo $U(1)$, las interacciones débiles junto con las electromagnéticas resultan de la simetría de norma $SU(2) \times U(1)$, y las interacciones entre quarks de una simetría de norma $SU(3)_c$ que opera en el espacio tridimensional de "color".

Sin embargo las partículas responsables de interacciones deben ser de masa cero, como el fotón, si las simetrías de norma son exactas y explícitas. Esta última cualidad es opuesta a la de ser espontáneamente rota. Al ser un hecho experimental que las interacciones débiles (responsables de la radioactividad) son de muy corto alcance, deben ser entonces los mediadores de esta interacción de masa muy grande. Esto sólo se concibe si la simetría de norma correspondiente a esta interacción se encuentra espontáneamente rota. Para que dicho fenómeno acontezca es necesario un ingrediente adicional en el modelo o cuadro completo. Este nuevo ingrediente puede ser un bosón especial llamado Higgs cuya existencia aún no ha sido establecida experimentalmente y cuya búsqueda es uno de los motivos principales detrás de la construcción de nuevos aceleradores gigantes, como el LHC en el CERN.

Aun así, con ingredientes todavía no establecidos experimentalmente, la enorme canti-

dad de datos experimentales en un gran intervalo de energías y de pruebas de precisión nos indica que el esquema actual, denominado Modelo Estándar (ME), es al menos parte real de la teoría correcta. Este conocimiento es uno de los grandes logros del siglo XX. Alcanzarlo ha requerido un enorme esfuerzo de físicos teóricos y experimentales en todo el mundo. Entre las contribuciones sobresalientes se encuentran varias de los miembros del grupo de Altas Energías (o grupo de Partículas Elementales) del Departamento de Física del CINVESTAV.

El ME consiste entonces en un contenido de materia, los quarks y los leptones en tres familias, con una dinámica dictada por la simetría de norma $U(1) \times SU(2) \times SU(3)_c$ y con un elemento adicional, el Higgs, responsable de la rotura (parcial) espontánea de $U(1) \times SU(2)$.

En el ME los neutrinos no tienen masa, su masa es cero. Las demás partículas elementales sí tienen masa pero el valor de cada masa no es calculable dentro de este esquema, lo cual constituye una de las deficiencias del ME. Hay otros detalles que el modelo no puede determinar a partir de los principios en los que se basa. Por ejemplo no nos dice por qué hay tres familias ni por qué las simetrías básicas de norma son $U(1)$, $SU(2)$ y $SU(3)_c$, ni cómo es que realmente surge la rotura espontánea de la parte electrodébil [$SU(2) \times U(1)$].

Tratando de remediar las insuficiencias del ME se han postulado otras teorías basadas en grupos de simetría mayores, incluyendo aquellas de "unificación" basadas en grupos en los que están contenidos los factores $U(1)$, $SU(2)$ y $SU(3)_c$, sin ser un simple producto de éstos, como es el

caso de $SU(5)$. La idea actual de unificación de las fuerzas (Einstein fue también uno de los precursores de la idea de unificación) está apoyada por la observación teórica y experimental, de que la intensidad de las interacciones varía con la energía y que la intensidad de las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes, tienden las tres, a ser de la misma magnitud a muy altas energías. Si esta es la situación, si se igualan las intensidades de las interacciones y la dinámica corresponde a un grupo simple como $SU(5)$, entonces hay en la naturaleza a altas energías una sola interacción, un único principio de dinámica, del cual las tres interacciones conocidas son sólo diferentes facetas, como distintas facetas son la electrostática y la magnetostática de una sola teoría que es la electrodinámica formulada por Clark Maxwell en el siglo XIX (1873). Existen diversas posibilidades de extensión del ME con y sin unificación. Diversas extensiones conducen a consecuencias diferentes que sólo los resultados experimentales del futuro podrán validar o refutar. Las posibles extensiones del ME sobrepasan los esquemas "clásicos" y llegan a proponer la existencia de dimensiones extras, adicionales a las cuatro "cotidianas" a las que estamos acostumbrados. En nuestro grupo se evalúa a través de un análisis profundo esta posibilidad que hasta ahora se mantiene consistente matemáticamente y que habrá que poner a prueba en experimentos de altas energías y de gran precisión.

Por otra parte, en nuestro grupo de altas energías también se trabaja en calcular las consecuencias experimentalmente observables de otras posibles extensiones del ME, formuladas en las

cuatro dimensiones usuales. En particular se han construido varios modelos de extensiones, con y sin supersimetría (la simetría que surge de la invariancia ante transformaciones de bosones a fermiones y viceversa).

Como mencionamos arriba, en el ME el neutrino no tiene masa. Tampoco es difícil extender levemente las premisas de este modelo para acomodar un neutrino con masa. Habíamos explicado ya que en el ME el neutrino no tiene masa. Sin embargo recientemente se ha determinado, a partir de la medición del flujo de neutrinos en la atmósfera (producidos por rayos cósmicos) y de los provenientes del Sol, que los neutrinos sí tienen masa, pero extremadamente pequeña. Esta pequeñez sería entendible dentro de una extensión del ME que contuviera otro neutrino muy pesado y que se mezclara con el neutrino estándar. Sería de esta mezcla que el neutrino estándar adquiriría una pequeña masa. Los profesores del grupo de partículas elementales del CINVESTAV han trabajado y trabajan en investigar las posibles propiedades adicionales del neutrino aparte de su masa. Por ejemplo se estableció, por vez primera, una definición consistente del tamaño del neutrino dentro del ME. Se ha establecido también por profesores de este Departamento de Física, que si el neutrino tiene momento magnético, éste deberá ser menor que el del electrón en alrededor de doce órdenes de magnitud.

Los neutrinos también fungen como magníficos mensajeros del universo. Dada su leve interacción con la materia pueden viajar distancias astronómicas sin que su trayectoria sufra desviaciones. Para detectar estos neutrinos es necesario construir o habilitar detectores gi-

gigantescos, así como llevar a cabo cálculos precisos sobre el flujo de neutrinos provenientes de diversas fuentes extraterrestres y la posible capacidad de detectarlos en los aparatos que están en construcción. Estos cálculos también se realizan en el CINVESTAV. Por otra parte, los rayos cósmicos formados de partículas cargadas de origen astrofísico, también pueden transportar información sobre eventos u objetos lejanos a la Tierra si su energía es suficientemente grande. En este caso también es necesario construir detectores gigantescos, como el Observatorio Pierre Auger, en cuya construcción y operación participan miembros del grupo de partículas elementales del CINVESTAV.

Podemos afirmar que son los quarks y los leptones, el contenido de materia del modelo estándar, las componentes fundamentales de todo lo material que conocemos, aquí en la Tierra y fuera de ella, tanto de planetas como de todo lo que brilla en cualquier parte del espectro electromagnético visible e invisible. Esta materia conocida es también la responsable de los fenómenos que producen las diversas manifestaciones conocidas de energía. Pero esta materia y energía conocidos constituyen sólo una pequeña parte de lo que es el universo. Las obser-

vaciones astrofísicas de los últimos 15 años indican que, en el balance de energía y materia que llena este universo, domina una componente desconocida de energía llamada "energía oscura" con un 73%, siendo el resto, un 27%, materia. Pero de la parte material sólo el 15% está compuesta de lo conocido. El resto, el 85% de la materia, es llamado "materia oscura". Ésta no ha sido aún detectada directamente, sólo a través de sus efectos gravitacionales astronómicos.

Otra gran pieza faltante en el modelo estándar es la interacción gravitacional, descrita con gran éxito por Einstein con su Teoría General de la Relatividad, debido a que todavía no ha sido posible formularla dentro de la mecánica cuántica.

Se requiere entonces de la formulación de un nuevo esquema que abarque al ME y la relatividad general y explique el misterio de la materia y energía oscuras. Para alcanzar con éxito esta meta será necesaria una nueva serie de experimentos tanto de laboratorio (LHC, NLC) como de detección de fenómenos astrofísicos (rayos cósmicos, candidatos a materia oscura, neutrinos extra-solares, etcétera) y una serie de ajustes entre las posibles diversas teorías (extensiones del ME) y observaciones experimentales. Éstas son las tareas de la física fundamental del siglo XXI.



RESUMEN

LA FÍSICA ESTADÍSTICA SE ENCARGA DE ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO microscópico de los sistemas compuestos por muchos cuerpos, así como la forma en que este comportamiento determina las propiedades macroscópicas de dichos sistemas. En este artículo se presenta una revisión somera del desarrollo histórico de la física estadística, de sus fundamentos y de algunos de sus éxitos más notables, además de su relación con algunos de los problemas de mayor interés y actualidad en la investigación científica de frontera. Con el fin de sumarnos a los festejos del Año Internacional de la Física, prestamos especial atención a las contribuciones de Albert Einstein.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de una sola partícula en un campo de fuerzas puede, en principio, ser descrita por leyes mecánicas básicas en términos de cantidades físicas susceptibles de ser medidas, como aceleración y masa. Cuando se tienen muchas partículas, sin embargo, no hay aparato capaz de seguirlas una por una, ni manera de resolver las ecuaciones mecánicas para obtener la dinámica de todas ellas. De hecho, los aparatos de medición sólo proporcionan promedios y fluctuaciones estadísticas de algunas de las variables dinámicas y, por lo mismo, las teorías físicas deben renunciar al detalle y concentrarse en las relaciones estadísticas entre las observables y sus promedios y fluctuaciones. La disciplina científica que se ocupa de este tipo de problemas se llama física estadística y su ámbito de aplicación es enorme, pues nuestro entorno cotidiano consiste de montones de cosas compuestas por muchas partículas. Por ejemplo, un granito de arena contiene del orden de 10^{22} moléculas, lo mismo que una gota de agua o una célula. Por ello la física estadística también es una ciencia auxiliar tanto de otras disciplinas físicas, como de la astronomía, la química, la biología, la medicina, la ingeniería, la economía y de las ciencias sociales.

DESARROLLO HISTÓRICO¹

A mediados del siglo XVIII Daniel Bernoulli desarrolló una teoría cinética para los fenómenos calóricos, la cual puede ser considerada como el primer esquema teórico de la física estadística, en el sentido de ser la primera teoría microscópica tendiente a explicar los fenómenos termodinámicos. Desafortunadamente, sus ideas fueron rápidamente olvidadas, lo que no resulta tan sorprendente si recordamos que en aquel entonces apenas se había logrado dilucidar la diferencia entre temperatura y calor, y a esta última cantidad se le seguía considerando como algún tipo de sustancia. Por otro lado, el principio de conservación de la energía, uno de los pilares fundamentales de la física moderna, sería finalmente aceptado hasta después de transcurridos otros cien años, gracias a las valiosas contribuciones de James Joule y Hermann Helmholtz, entre otros. Estos investigadores desarrollaron el concepto de energía interna de un sistema y establecieron lo que también se conoce como la primera ley de la termodinámica, es decir, el principio de que el calor y el trabajo que se aplican a un sistema cambian la energía interna de éste. Poco tiempo después, alrededor de 1860, Rudolf Clausius, basándose en las contribuciones de Sadi Carnot, introdujo el concepto de entropía de un sistema y formuló lo que actualmente se conoce como la segunda ley de la termodinámica, que básicamente establece que cuando un sistema macroscópico está completamente aislado su entropía sólo puede aumentar o, en el mejor de los casos, permanecer constante.

Fue también por esos años (1860) que James Clerk Maxwell publicó su famosa expresión para la distribución de velocidades de las moléculas de un gas muy diluido en equilibrio termodinámico, la cual puede ser considerada, después de la teoría cinética de Bernoulli, como la primera expresión de la física estadística. Curiosamente, su demostración, basada en la conservación de la energía cinética durante los choques microscópicos, se le ocurrió a Maxwell seis años después de publicarla. En 1868 Ludwig Boltzmann generalizó la distribución propuesta por Maxwell al tomar en consideración la energía mecánica total de las partículas microscópicas, por lo que actualmente se le conoce como la distribución de Maxwell-Boltzmann, y en 1877 proporcionó además una buena argumentación para esta generalización mediante la aplicación de la fórmula $S = k \ln \Omega$, una de las más famosas de la física. Ésta relaciona la entropía de un sistema aislado con el número Ω de sus estados microscópicos compatibles con su estado termodinámico, es decir, macroscópico, e introduce una de las constantes fundamentales de la naturaleza, la cual se conoce ahora como la constante k de Boltzmann.

Por la misma época, en 1872, Boltzmann formuló también su famoso teorema H , el cual establece, por un lado, que una cierta cantidad que se obtiene a partir de la distribución de velocidades moleculares, la función H , no cambia con los choques microscópicos cuando dicha distribución corresponde a la de Maxwell-Boltzmann. Por otro lado, el mismo teorema afirma que si la mencionada distribución de velocidades se desvía de la distribución de Maxwell-Boltzmann, entonces la función H decrece con el tiempo, es decir, el negativo de H se comporta como la entropía. De acuerdo con este resultado, existe una dirección privilegiada del tiempo en los sistemas macroscópicos, en concordancia con la segunda ley de la termodinámica y la experiencia cotidiana, a pesar

del principio de invariancia temporal de la mecánica clásica que rige el comportamiento de las partículas a nivel microscópico. La aparente paradoja se resuelve recordando que la física estadística considera únicamente el comportamiento promedio, o más probable, de dichos sistemas macroscópicos.

Una definición clara de los fundamentos de la física estadística de los sistemas en equilibrio termodinámico fue lograda por primera vez por Willard Gibbs con ayuda de la teoría de ensambles. La idea central de esta teoría consiste en considerar un conjunto muy grande de réplicas de un sistema macroscópico, el ensamble, en donde cada réplica se encuentra en un estado microscópico diferente pero compatible con el estado termodinámico de dicho sistema. A cada estado microscópico se le asigna entonces una cierta probabilidad, y las propiedades termodinámicas se determinan calculando los valores promedio de las cantidades microscópicas adecuadas.

Para cuando Gibbs expuso estas ideas en su libro *Elementary Principles of Statistical Mechanics*, publicado en 1902, la física estadística ya había acumulado grandes éxitos, pero también había hecho algunas predicciones falsas, como por ejemplo la que concierne al calor específico de los sólidos a bajas temperaturas. William Thomson (Lord Kelvin), quien también realizó importantes contribuciones en este campo, comparó a esta predicción errónea con una nube negra presagiando tormenta sobre la teoría del calor. La física estadística cuántica eliminaría estos problemas y abriría nuevas fronteras al entendimiento del universo observable.

La física estadística cuántica surge al mismo tiempo que la teoría cuántica. A finales de 1900 Max Planck, quien fue uno de los primeros en enterarse de las nuevas mediciones experimentales correspondientes, encontró la fórmula correcta para la densidad de energía como función de la frecuencia de la radiación de un cuerpo

negro interpolando entre las leyes de radiación de John William Strutt (Lord Rayleigh) y de Wilhelm Wien. El cuerpo negro en cuestión es básicamente una cavidad con paredes que no reflejan radiación, pero emiten la suya propia cuando son calentadas. Planck, sin embargo, no se contentó sólo con presentar esta fórmula empírica, muy importante en sí misma, sino que también desarrolló el esquema conceptual necesario para su justificación. Para ello empezó suponiendo que las paredes de la cavidad están formadas por osciladores que sólo poseen niveles de energía discretos, y que éstos vienen dados en términos de múltiplos enteros de cuantos de energía cuya magnitud es proporcional a la frecuencia de la radiación y son indistinguibles entre sí. A continuación aplicó la física estadística, que hasta ese momento había rechazado, para determinar la distribución de energía entre los niveles accesibles, con lo que reprodujo la fórmula correcta. En el desarrollo de este estudio, Planck introdujo una nueva constante fundamental de la naturaleza, denotada por h , y conocida actualmente como la constante de Planck.

ALBERT EINSTEIN EN LA FÍSICA ESTADÍSTICA²

Los descubrimientos de Planck le proporcionaron a Albert Einstein las herramientas conceptuales y teóricas necesarias para el desarrollo, no sólo de la conocida descripción del efecto fotoeléctrico, publicada en 1905, sino también de la explicación del comportamiento del calor específico de los sólidos a bajas temperaturas,

publicada dos años después, con la que liberó a la física estadística de sus negros nubarrones.

Esta última contribución de Einstein, cuya importancia fundamental al campo de la física estadística es indiscutible, no fue, sin embargo, la única que hizo en esta área. Aunque es difícil acotar su trabajo en este campo de forma precisa, es posible identificar al menos cuatro líneas principales: el estudio del movimiento browniano; la ya mencionada explicación del comportamiento del calor específico de los sólidos a bajas temperaturas; el desarrollo del postulado de Planck-Einstein; y el establecimiento de la distribución estadística de Bose-Einstein.

Con respecto a sus investigaciones sobre el movimiento browniano, el propio Einstein manifestó en 1917 su opinión de que a través del conocimiento de los principios que rigen este fenómeno había desaparecido cualquier duda sobre la validez de la explicación que Boltzmann le había dado a las leyes de la termodinámica. En efecto, la explicación del movimiento aleatorio experimentado por las pequeñas partículas suspendidas en agua, fenómeno descubierto por Robert Brown en 1827, fue un claro y definitivo triunfo de la física estadística. Después de muchas pruebas que permitieron eliminar causas como gradientes de temperatura, perturbaciones mecánicas, efectos capilares y corrientes de convección, surgió a partir de 1860 la opinión, al principio puramente especulativa, de que el movimiento browniano era producto de los choques con las moléculas del agua. Esta idea, sin embargo, encontró una fuerte resistencia inicial, pues se consideraba que dichas fuerzas son demasiado pequeñas como para

producir el movimiento en zig-zag observado, y que además en promedio deberían de suprimirse. No sólo eso, en la opinión de muchos científicos de la época tal mecanismo violaría también la segunda ley, pues se argumentaba que el movimiento debería transformarse en calor y no al contrario.

Este último argumento resultó prácticamente irrefutable hasta 1905, cuando Einstein demostró que, efectivamente, muchos pequeños choques podían reproducir el movimiento observado. Para ello planteó una descripción de la evolución temporal de la distribución de las partículas suspendidas mediante una ecuación de difusión y obtuvo una expresión para el desplazamiento cuadrático medio de cada una de éstas en términos del correspondiente coeficiente de difusión. Al mismo tiempo, siguiendo los métodos de Boltzmann, le dio un nuevo significado al propio proceso de difusión al visualizarlo como un proceso markoviano, es decir, como una sucesión de pequeños movimientos aleatorios. Poco tiempo después de su publicación la teoría de Einstein fue comprobada experimentalmente por Jean Baptiste Perrin, quien recibió el premio Nobel por este trabajo en 1926.

La primera aplicación trascendente de la física estadística cuántica, aparte de la explicación que Max Planck le dio al espectro de radiación de cuerpo negro, se realizó en 1907, cuando Einstein aplicó las nuevas ideas cuánticas al estudio del calor específico de los sólidos. Einstein demostró que, además de recuperar el comportamiento clásico a temperaturas suficientemente altas (lo que se conoce como la ley de Dulong-Petit), la física estadística cuántica tam-

bién predice que el calor específico de los sólidos cristalinos decrece con la temperatura en el régimen de muy bajas temperaturas, fenómeno para el cual había muy poca evidencia experimental en aquel entonces, pero que posteriormente ha sido ampliamente confirmado. En particular, demostró que el calor específico va a cero conforme el sólido se aproxima al cero absoluto, con lo que de paso logró conciliar la física estadística con la restante y última regla empírica de los fenómenos térmicos, la tercera ley de la termodinámica.

Más adelante, en 1909, Einstein propuso un nuevo método para estimar la probabilidad de ocurrencia de una fluctuación en los valores de las variables termodinámicas de un sistema macroscópico. Para este fin aplicó el postulado de Boltzmann a la inversa: mientras que aquel utilizó probabilidades microscópicas para calcular la entropía termodinámica, Einstein usó la entropía termodinámica para obtener la probabilidad de una fluctuación. El resultado final de este trabajo fue lo que ahora se conoce como el postulado de Planck-Einstein, y cuya expresión matemática viene dada por una fórmula que por su importancia merece ser presentada aquí: $P(\Delta S) = Z \exp(\Delta S/k)$, en donde $P(\Delta S)$ es la probabilidad de la fluctuación, la variable ΔS es el cambio de entropía asociado con dicha fluctuación, y Z es una constante de normalización. Este postulado es el punto de partida de la teoría termodinámica de la estabilidad y de las fluctuaciones, así como también del tratamiento termodinámico de sistemas fuera del equilibrio, y por lo tanto ha resultado ser extraordinariamente útil en el estudio de transiciones de fase, procesos de disipación, etcétera.

En 1924 el físico hindú Satyendranath Bose le envió a Einstein una copia de un artículo suyo en el que presentaba una nueva derivación de la fórmula de Planck para el espectro de radiación de cuerpo negro. En este trabajo Bose prescindía completamente de la teoría electromagné-

tica y recurría únicamente a una nueva distribución estadística especial para los fotones. Einstein reconoció inmediatamente el valor de este trabajo, lo tradujo al alemán y lo envió a la revista *Zeitschrift für Physik*, junto con una carta de recomendación. Posteriormente, el mismo Einstein amplió el trabajo de Bose para aplicarlo a gases moleculares, echando mano del postulado de Louis de Broglie que establece que tanto las moléculas como los fotones tienen características ondulatorias y corpusculares. Con este trabajo Einstein demostró también que a bajas temperaturas las moléculas no pueden ser consideradas como entidades independientes, incluso en ausencia de interacciones intermoleculares, y que por lo tanto deberían formar un condensado cuántico. A este último fenómeno se le conoce actualmente como la condensación de Bose-Einstein, y representa la primera predicción de un fenómeno cuántico con manifestaciones macroscópicas.

Es importante señalar aquí que la distribución estadística especial descrita en el párrafo anterior, actualmente conocida como distribución de Bose-Einstein, se aplica solamente a un tipo especial de partículas, denominadas precisamente como bosones. Más o menos por la misma época Enrico Fermi y Paul Dirac establecieron la existencia de una segunda distribución estadística cuántica, conocida actualmente como distribución de Fermi-Dirac, y que se aplica a la clase de partículas denominadas como fermiones. Estas dos distribuciones cuánticas cubren todas las condiciones posibles para sistemas en equilibrio termodinámico, y constituyen la base fundamental de todos los esfuerzos posteriores en el entendimiento de este tipo de sistemas.

LA FÍSICA ESTADÍSTICA EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, la física estadística se ha posicionado como la principal herramienta en

el estudio de la materia condensada en todas sus manifestaciones. De esta manera, ha contribuido a los enormes éxitos científicos y tecnológicos de la física del estado sólido y a la lenta, pero firme, cimentación de la física de la materia condensada blanda³. La física estadística reviste una importancia fundamental en los modelos teóricos cosmológicos y astrofísicos, representa el punto de unión entre la física y la química, y entre la física y la biología⁴, y es también una herramienta indispensable en el desarrollo de nuevos campos, como la óptica cuántica, la ingeniería entrópica, la cual es una de las herramientas de la nanotecnología⁵, y los medios granulares⁶, entre otros.

Probablemente más sorprendente que las anteriores sea la adaptación de la física estadística al estudio de fenómenos socioeconómicos, como la dinámica del tráfico de automóviles en un sistema urbano⁷ y el modelado de mercados financieros⁸. En la economía, la física estadística es utilizada en el estudio de los ciclos energéticos y de producción, en el análisis de procesos económicos y del fenómeno de la autoorganización, así como en el modelado de la evolución de procesos innovadores⁹. La física estadística es incluso utilizada para entender la dinámica de la formación de opiniones en la sociedad¹⁰.

COMENTARIOS FINALES

La comunidad de física estadística mexicana es, dentro del área de la física, la segunda más grande en el país en cuanto al número de investigadores, sólo por debajo de la comunidad de física del estado sólido. La actividad de investigación en el campo se realiza principalmente en universidades y centros de investigación públicos, como en el Departamento de Física del CINVESTAV. En este último, en particular, se trabaja principalmente en temas relacionados con la materia condensada blanda.

Otras instituciones donde se investiga en el campo son la Universidad Autónoma Metropolitana, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad de Guanajuato, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Universidad de Sonora, el Instituto Mexicano del Petróleo, entre otros. La comunidad de física estadística mantiene la División de Termodinámica y Mecánica Estadística de la Sociedad Mexicana de Física y se reúne varias veces al año en diversos eventos, como el Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Física, el Winter Meeting on Statistical Physics y el Meeting on Complex Fluids, entre otros. Los temas investigados abarcan todos aquellos de interés actual.

NOTAS

¹ Existe en Internet un excelente sitio para investigar la historia conceptual de la física estadística, así como la vida de las personas que más contribuyeron en su estudio. Su título y dirección electrónica son *Sketching the History of Statistical Mechanics and Thermodynamics (from about 1575 to 1980)* y <http://history.hyperjeff.net/statmech.html>, respectivamente.

² A raíz de las celebraciones del Año Internacional de la Física es posible encontrar en Internet una gran cantidad de artículos sobre las contribuciones de Einstein. Recomendamos en particular el sitio *Einstein's Annus Mirabilis 1905*, <http://lorentz.phl.jhu.edu/AnnusMirabilis>. También sugerimos el artículo de revisión "Einstein and the quantum theory" de A. Pais, *Reviews of Modern Physics* 51, 863 (1979).

³ La física de la materia condensada blanda trata con sistemas tan diversos como los polímeros, los coloides, las emulsiones y los biomateriales, entre otros. En el siguiente número de *Avance y Perspectiva* se presentará un artículo sobre el tema. También los siguientes libros permiten adquirir una buena idea del campo sin necesidad de conocimientos técnicos especializados: (a) M. Daoud y C. E. Williams, *Soft Matter Physics*, Springer (1999), (b) Ian W. Hamley, *Introduction to Soft Matter*, Wiley (2000) y (c) Pierre-Gilles de Gennes y Jacques Badoz, *Fragile Objects*, Springer (1996).

⁴ Para adquirir una idea del estado actual de la biofísica recomendamos consultar el artículo "Biofísica" de José M. Méndez A., *Avance y Perspectiva* 20, 211 (2001), así como los trabajos en él citados.

⁵ *Molecular Devices and Machines. A Journey into the Nanoworld* de V. Balzani, M. Venturi y A. Credi, Wiley (2003).

⁶ *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials (Partially Ordered Systems)* de Jacques Duran y Axel Reisinger, Springer (1997).

⁷ *Traffic and related self-driven many-particles systems* de Dirk Helbing, *Rev. Mod. Phys.* 73, 1067 (2001). *Statistical physics of vehicular traffic and some related systems* de D. Chowdhury, L. Santen y A. Schadschneider, *Phys. Rep.* 329, 199 (2000).

⁸ *Theory of Financial Risks* de J.-P. Bouchaud y M. Potters, Cambridge (2000). *An Introduction to Econophysics* de R. N. Mantegna y H. E. Stanley, Cambridge (2000). *Physics of Finance* de K. Ilinski, Wiley (2001).

⁹ *Sociodynamics: A Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Science* de W. Weidlich, Gordon & Breach (2000). *Cities and Regions as Self-Organizing Systems, Models of Complexity* de P. M. Allen, Gordon & Breach (1997).

¹⁰ *Physics and social science - The approach of synergetics* de W. Weidlich, *Phys. Rep.* 204, 1 (1991).



TERMoeLECTRICIDAD: REFRIGERADORES Y FUENTE DE CORRIENTE

GABINO ESPEJO-LÓPEZ
YURI GUREVICH

INTRODUCCIÓN

LOS DISPOSITIVOS DE ENFRIAMIENTO JUEGAN UN PAPEL MUY IMPORTANTE en la vida cotidiana. Los utilizamos para conservar alimentos y medicinas, entre otras cosas. ¿Cuántas veces no hemos escuchado de alguien que no puede salir de vacaciones porque necesita usar un medicamento que debe mantenerse a cierta temperatura? ¿Ya imaginamos al enfermo y a la familia cargando con el refrigerador de 10 pies cúbicos o con la nevera de acampar y comprando hielo constantemente para mantener el medicamento en las condiciones adecuadas!

En una sociedad en la que los adelantos tecnológicos son cada vez mayores, sería muy práctico contar con un refrigerador compacto para evitar estos problemas. El uso de estos dispositivos podría abarcar áreas de lo más diverso, por ejemplo se emplearía en la destrucción criogénica de defectos de la piel; en cascos criogénicos para usos de emergencia en ambulancias o como dispositivos de cirugía criogénica en oncología. Y ¿qué tal si además de ser compactos, los dispositivos referidos fueran de larga duración y no necesitaran de mantenimiento? Aunque lo anterior pudiera parecer sólo ciencia-ficción la creación de estos dispositivos es posible y su funcionamiento se basa en la aplicación de fenómenos termoelectricos.

FENÓMENOS TERMOELÉCTRICOS

Existen en la naturaleza tres tipos de fenómenos termoelectricos: el efecto Seebeck, el Peltier y el Thomson (Lord Kelvin), de los cuales los dos primeros son los de mayor aplicación.

En 1821, Johann Seebeck descubrió el efecto que hoy en día lleva su nombre, el cual consiste en que al conectar dos alambres conductores de metales diferentes en forma de lazo y mantener las uniones a temperaturas diferentes surge una corriente eléctrica (ver fig. 1). La observación de este hecho experimental convirtió a Seebeck en el descubridor de la termoelectricidad (que no es otra cosa que la conversión directa de calor en electricidad) a la que él llamó "termomagnetismo".

El Dr. Gabino Espejo-López hizo su doctorado en el Departamento de Física del CINVESTAV. Actualmente labora en el Departamento de Mecatrónica de la Universidad Politécnica de Pachuca.

El Dr. Yuri Gurevich es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV.

Correo electrónico: gurevich@fis.cinvestav.mx

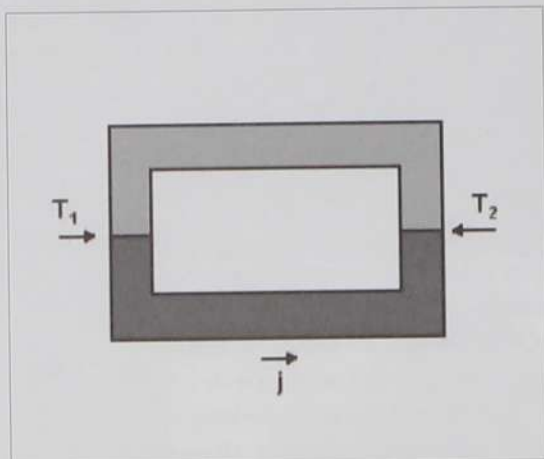


FIGURA 1

La historia cuenta que Johann Seebeck no fue el primero en observar este efecto.¹ En *Historia de la física*, su autor Mario Glozzi relata que en 1794 el italiano A. Volta descubrió que al calentar el extremo de un conductor de acero o mantenerlo a distintas temperaturas, surge una corriente eléctrica. El trabajo original de A. Volta consta de tres cartas dirigidas a Abbot Anton Mario Vassalle, profesor de física de la Universidad Real de Turín. En la primera de ellas, escrita el 10 de febrero de 1794, A. Volta le cuenta al profesor que las piernas de las ranas son indicadores de electricidad muy sensibles. Volta hizo un circuito compuesto por dos recipientes con agua fría, puso la pierna de una rana junto con el extremo de un alambre de acero, mientras el otro lo mantuvo en agua caliente aproximadamente medio minuto, después lo sumergió en el otro recipiente. Y para su sorpresa ¡la pierna de la rana empezó a contraerse!. Repitió el experimento una, dos, tres y más veces, hasta que el alambre de acero se enfrió.

Este experimento es una buena prueba de que Volta fue el primero en observar el fenómeno de la termoelectricidad, sin embargo pasó inadvertido, y es muy probable que J. Seebeck no tuviera conocimiento del mismo.

Una de las aplicaciones del efecto Seebeck es la creación de fuentes de corriente eléctrica

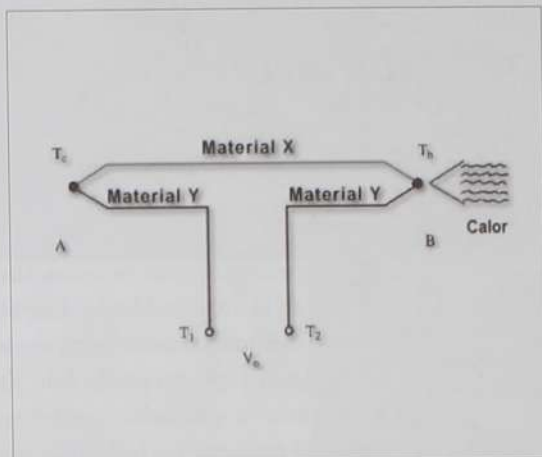


FIGURA 2

en las cuales la energía térmica se convierte en energía eléctrica. También puede emplearse para la medición precisa de temperaturas mediante un termopar, en el que una de las uniones se mantiene a una temperatura de referencia conocida (por ejemplo, un baño de hielo) y la otra se coloca en el lugar cuya temperatura quiere medirse. Las aplicaciones industriales de los termopares son muy comunes en el rango de -220°C a $+3300^{\circ}\text{C}$ (ver fig. 2). La sensibilidad típica es del orden de $30\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Debido a su bajo costo, facilidad de instalación y resistencia mecánica, los termopares son los sensores para temperatura de mayor uso en las plantas industriales.

Sólo trece años después del descubrimiento de Seebeck, en la revista francesa *Anales de física y química* apareció un artículo de J. C. A. Peltier sobre las temperaturas anormales observadas en la unión de dos conductores distintos al pasar por ella una corriente eléctrica. La esencia de este efecto, que lleva el nombre de Peltier y que básicamente es el contrario del efecto Seebeck, consiste en que al pasar una corriente eléctrica por un circuito en forma de lazo, que consta de dos alambres metálicos diferentes, una unión absorbe calor y la otra lo cede.

De esta forma, la diferencia de temperaturas en las uniones de un circuito formado por

dos materiales conductores distintos genera una corriente eléctrica (ver fig. 1). La corriente eléctrica que pasa por este circuito crea en la unión una diferencia de temperatura. Es interesante que Peltier no haya descubierto esta relación, a pesar de que sus experimentos los realizó con un circuito termoelectrónico. Peltier estaba interesado en la distribución de la temperatura cerca de las uniones, por lo que la termoelectricidad sólo jugaba el papel de fuente de corrientes eléctricas débiles.

Las anomalías observadas por Peltier resultaron ser más fuertes cuanto más grandes eran las fuerzas termoelectromotrices, y principalmente aparecían en la unión de bismuto con antimonio. Peltier buscaba en sus experimentos la confirmación de que la ley de Joule-Lenz (generación de calor debido al paso de corriente eléctrica por un conductor) sólo era válida para corrientes eléctricas fuertes. Peltier pensaba que debido a las corrientes eléctricas débiles generadas por el termoelemento, sólo se mostraban las propiedades particulares de los metales. Esta idea no pudo ser confirmada en la mayoría de sus experimentos, y en las anomalías observadas en los contactos se mostraba la naturaleza de los metales, principalmente sus propiedades termoelectrónicas. Buscaba la explicación en la dureza o suavidad del metal, en su conductividad eléctrica, y si los hechos no coincidían con sus expectativas, entonces se negaba a creer en las mediciones.

Tuvieron que pasar varios años durante los cuales Bequerel y otros científicos intentaron explicar el sentido verdadero del efecto Peltier, hasta que en 1838 Lenz realizó un experimento sencillo que puso fin a toda duda. Lenz puso una gota de agua en la unión de dos alambres, uno de bismuto y el otro de antimonio. Esta gota de agua se congeló al pasar una corriente eléctrica en una dirección y se derritió al cambiarle el sentido (se sabe que en un gramo de agua sólo se necesita ceder o absorber 80 calo-

rías para que éste se congele o se derrita). quedó claro que en la unión de dos conductores distintos, se genera o se absorbe calor con sólo cambiar el sentido de la corriente eléctrica.

En ese entonces los fenómenos termoelectrónicos no llamaron la atención de los físicos, quienes se encontraban ocupados con el estudio del electromagnetismo, lo cual llevó a Faraday al descubrimiento de la inducción electromagnética. La física iba por el camino de la generalización de las leyes de la teoría de Maxwell, mientras que la ingeniería iba por el de las máquinas electromagnéticas. Pasaron 30 años desde el descubrimiento de Seebeck, y con la aparición de la termodinámica surgió el interés por todo tipo de transformación de energía, dentro de dichas transformaciones se encontraba la de energía térmica y eléctrica en los efectos Seebeck y Peltier.

Precisamente este era el camino que seguía W. Thomson (Lord Kelvin), uno de los fundadores de la termodinámica. El análisis termodinámico que hizo de la termoelectricidad y del efecto Peltier lo llevaron no sólo al establecimiento del enlace entre los dos efectos, sino al descubrimiento de un tercer efecto, que lleva su nombre y consiste en la generación o absorción extra de calor (además del calor de Joule) al pasar una corriente por un conductor homogéneo en el cual existe un gradiente de temperaturas.

En 1885 Lord Rayleigh calculó (no del todo correcto) el coeficiente de eficiencia térmica de un generador termoelectrónico. En 1909 E. Altenkirch propuso de nuevo el mismo cálculo, sólo que de forma correcta. En 1910, el mismo E. Altenkirch propuso el problema técnico del calentamiento y enfriamiento termoelectrónico. Sin embargo, en ese entonces los únicos conductores conocidos eran los metales, y resultaron económicamente ineficientes. Surgieron algunos tipos de termo-electrogeneradores, pero no fue posible su distribución debido a que su coeficiente de eficiencia térmica no pasaba del

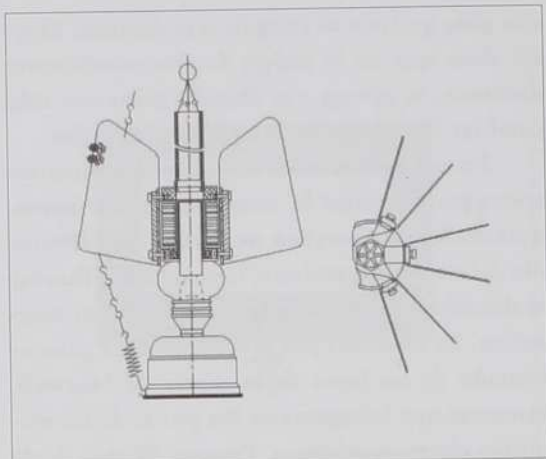


FIGURA 3

0.6%, por lo que la termoelectricidad pasó de nuevo a ser parte de los cursos de física, junto con la luminiscencia y la piezoelectricidad.

Por iniciativa de A. F. Ioffe², Yu. P. Maslovets inició el estudio de la termoelectricidad en semiconductores y en 1940 emitió un comunicado sobre un termoelemento con coeficiente de eficiencia térmica de aproximadamente el 3%, cuyas ramas estaban hechas de sulfato de plomo, en donde además, una de las ramas tenía restos de azufre y la otra de plomo. Ambos crearon la primera batería industrial cuya fuente de energía era una lámpara de petróleo. Esta batería fue utilizada en la Segunda Guerra Mundial para alimentar los transmisores y receptores de radio (ver fig. 3).

La explicación física de los efectos Seebeck y Peltier puede presentarse de la siguiente forma: la energía cinética del gas de electrones clásico crece de forma proporcional a la temperatura. Si a lo largo del conductor existe una caída de temperatura, entonces los electrones del extremo caliente reciben mayor energía y velocidad que los que se encuentran en el extremo frío. En un semiconductor, la concentración de electrones libres también crece con el aumento de la temperatura y consecuentemente habrá mayor cantidad de electrones en el extremo caliente que en el extremo frío y el flujo de electrones del lado caliente al lado frío será mayor que el flujo

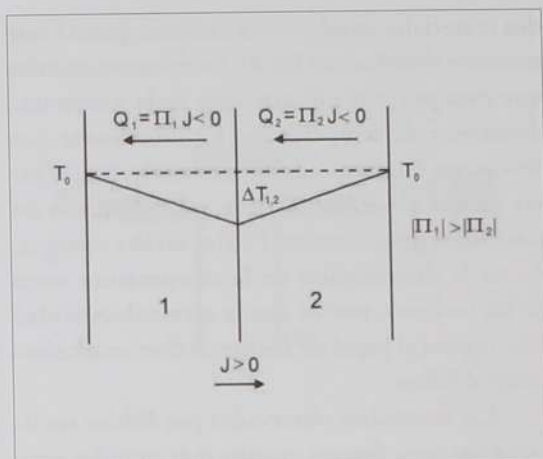


FIGURA 4

en sentido contrario. En el extremo frío se concentrará una mayor cantidad de cargas negativas, mientras que en el extremo caliente se tendrá una mayor cantidad de cargas positivas.

Este proceso de acumulación de carga continúa hasta que la diferencia de potencial que surge como consecuencia de esta acumulación genera un flujo de electrones en dirección contraria e igual al primero, con lo que se establece el estado estacionario. La suma algebraica de estas diferencias de potenciales en el circuito da una componente de la fuerza termoelectromotriz.

La esencia del efecto Peltier se puede explicar debido a la presencia de una barrera potencial en la unión de los conductores, por lo que la energía cinética promedio de los electrones en ambos lados de la unión es diferente. Para una configuración determinada de la barrera potencial y en dependencia de la dirección de la corriente eléctrica, los portadores de carga disminuyen (aumentan) la energía cinética promedio, con lo que se obtiene un enfriamiento (calentamiento) termoelectrónico.

Otra interpretación física del efecto Peltier es que la corriente eléctrica que pasa a través del material homogéneo siempre es acompañada por un flujo de calor, al cual llamaremos flujo de calor de deriva³. Este flujo de calor es igual a $q_n = \Pi j$, en donde $\Pi = \alpha T$ es el coeficiente Peltier,

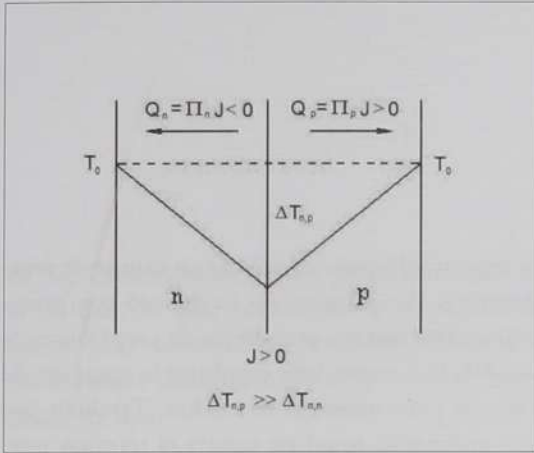


FIGURA 5

α es el coeficiente Seebeck, T es la temperatura y j es el vector de la densidad de corriente eléctrica. Cuando los coeficientes Peltier de ambos medios son diferentes, el flujo de calor de deriva que entra es diferente del flujo de calor de deriva que sale. Precisamente la diferencia entre estos flujos ($\Pi_1 - \Pi_2$) da el calentamiento o el enfriamiento en la unión dependiendo de la relación que exista entre los coeficientes y la dirección de la corriente eléctrica. Para los semiconductores tipo n se tiene que $\Pi_n < 0$, y para los tipo p se tiene que $\Pi_p > 0$. Por lo que en el contacto entre dos semiconductores tipo n ($\Pi_{1,2} < 0$) se obtiene una distribución de temperatura como se muestra en la fig. 4. Si ahora se tiene un contacto tipo n - p entonces el efecto de enfriamiento será mucho más fuerte (ver fig. 5).

En adelante, todos los efectos relacionados con la aparición de distribuciones de temperatura debida a un flujo de corriente los llamaremos efectos electrotérmicos. Por esta razón, consideramos que el efecto Peltier y el efecto que se presenta en el siguiente párrafo son fenómenos electrotérmicos en lugar de fenómenos termoelectrónicos⁴. Bajo esta definición el efecto Seebeck es un efecto termoelectrónico ya que el gradiente de temperatura conlleva a la aparición de una corriente eléctrica, mientras que el efecto Peltier es un efecto electrotérmico debi-

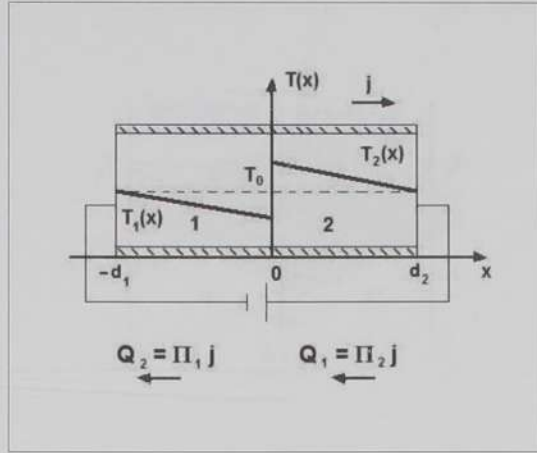


FIGURA 6

do a que la corriente eléctrica conlleva a la aparición de un gradiente de temperatura.

NUEVO EFECTO ELECTROTÉRMICO

Un análisis cuidadoso del modelo que explica los efectos electrotérmicos y sus interpretaciones físicas nos indica la existencia de un efecto hasta ahora desconocido⁵. Éste aparece cuando la conductividad térmica superficial η es finita. La estructura que se presenta en la fig. 6, está formada por dos semiconductores tipo- n distintos ($\Pi_{1,2} < 0$). El flujo de calor de deriva Q_1 que entra por la superficie $x=0$, no puede pasar en su totalidad debido a que la conductividad térmica superficial es finita, por lo que el área a la derecha del contacto se calienta. Al otro lado del contacto, el flujo de calor de deriva Q_2 sale de la interfase llevándose energía, la cual no puede ser compensada por el flujo de calor de deriva que pasa por la superficie de contacto $x=0$. En consecuencia, el lado derecho del contacto se calienta y el lado izquierdo se enfría (ver fig. 6).

La existencia de este efecto se puede analizar desde el punto de vista del principio de Chatelier-Brown⁶. De acuerdo a este principio, los flujos de calor de deriva generados por el paso de corriente eléctrica deben ser compensados por flujos de calor en dirección contraria

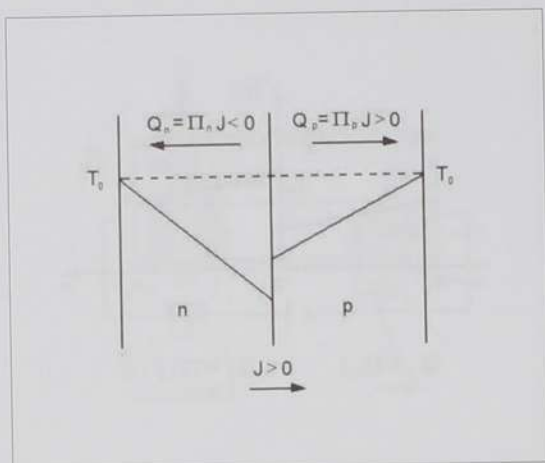


FIGURA 7

(ver fig. 6). Debido a su naturaleza, los flujos de compensación sólo pueden ser flujos de difusión térmica $Q = -\lambda \Delta T$, en donde λ es la conductividad térmica. La distribución espacial de la temperatura debida a la aparición de los flujos de difusión térmica se muestra en la fig. 6, para una aproximación lineal de la corriente eléctrica y para valores finitos de la conductividad térmica superficial. Si además se tiene un contacto tipo $n-p$, el efecto es aún mucho mayor (ver fig. 7). Pero cuando se estudia el paso de calor y corriente por un contacto tipo $n-p$ es necesario tomar en cuenta la transformación de electrones en huecos y de huecos a electrones en el contacto, es decir, se debe tomar en cuenta el fenómeno de la recombinación⁷. La descripción de los flujos de difusión-deriva se fundamenta en el trabajo de Einstein de 1905 sobre el movimiento browniano.

La predicción del nuevo efecto electrotérmico se hizo en el Departamento de Física del CINVESTAV como resultado del estudio de la termoelectricidad. Durante los últimos diez años se han obtenido resultados interesantes en esta línea de investigación. Se obtuvo un método nuevo para calcular la fuerza termoelectromotriz en semiconductores bipolares dentro de la aproximación lineal, que toma en cuenta los portadores de carga fuera de equilibrio generados en

la muestra después de aplicar un campo de temperatura. Por primera vez se definió con precisión cuáles son los portadores de carga fuera de equilibrio y cómo debe escribirse la ecuación de Poisson para tomarlos en cuenta. También por vez primera se tomó en cuenta el término proporcional al cambio de temperatura local producido por el gradiente de temperatura aplicado en la expresión para la recombinación volumétrica para calcular la fuerza termoelectromotriz, dando por resultado que ésta y la resistencia del semiconductor dependen no sólo de los parámetros tradicionales como las conductividades eléctricas de electrones y huecos, sino también de las tasas de recombinación volumétrica y superficial⁸⁻¹⁰. Otro resultado importante y de incidencia directa es el papel que juega la recombinación en el efecto de enfriamiento en el contacto³.

PROBLEMAS CON zT

La figura de mérito z o su equivalente adimensional zT no es el único factor que determina la elección del material pero sí es el más importante¹¹. Precisamente la figura de mérito determina la eficiencia de los dispositivos termoelectrónicos. Se define como la relación $z = \alpha^2 \sigma / \lambda$, en donde σ es la conductividad eléctrica. Es común usar el término "factor de potencia" para designar $\alpha^2 \sigma$ o $\alpha^2 \sigma T$, ya que este término sólo contiene las propiedades electrónicas, mientras que λ siempre contiene una contribución grande de la red.

La refrigeración a temperatura ambiente es una de las aplicaciones termoelectrónicas más común. Los materiales que se utilizan principalmente son las aleaciones de Bi_2Te_3 con Sb_2Te_3 y

Bi_2Se_3 . Éstas tienen un valor de zT alrededor de la unidad. Se han encontrado materiales con valores de zT por encima de la unidad, pero todavía no se tienen materiales con valores de zT alrededor de dos.

Uno de los principales problemas en la conversión de energía térmica o solar en energía eléctrica es la baja eficiencia de los convertidores existentes basados en semiconductores. Principalmente porque una parte considerable del flujo de energía se lleva a cabo a través del subsistema de fonones (oscilaciones térmicas de la red cristalina) los cuales no toman parte en la generación de la fuerza electromotriz.

En el trabajo¹² se propuso usar la diferencia de temperaturas entre los portadores de carga y los fonones con el fin de aumentar la eficiencia de los convertidores fotoeléctricos. En este caso se reduce la parte del flujo de calor que llevan los fonones.

En los convertidores termoeléctricos se puede reducir el flujo de energía hacia el subsistema de fonones incrementando la concentración de portadores, sólo que en este caso el aumento de la eficiencia está limitado por la disminución de la potencia termoeléctrica¹¹. Una forma más de disminuir el flujo de calor por medio del subsistema de fonones es con la aparición del arrastre electrón-fonón¹³. En este caso la caída de temperatura en el sistema de electrones puede ser 1000 veces mayor a la caída de temperatura entre la fuente de calentamiento y la de enfriamiento¹³.

Muchos de los materiales que hoy se usan para la refrigeración y generación termoeléctrica fueron descubiertos hace mucho tiempo. Sin

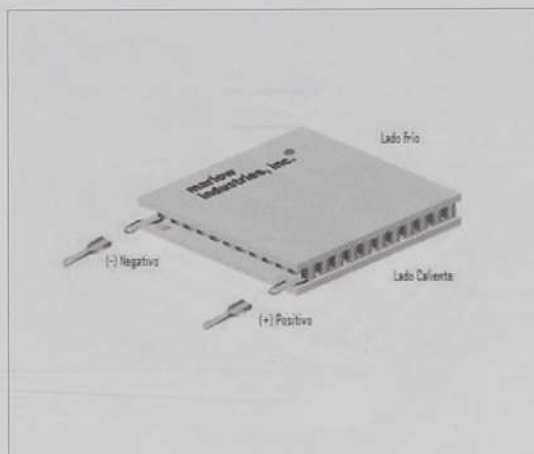


FIGURA 8

embargo, en los últimos años se han reportado resultados interesantes en sistemas compuestos y aleaciones, las cuales incluyen a las skutterudites, clathrates y aleaciones half-Heusler. También existen varios compuestos estructurados por capas basados en sistemas de telurio de bismuto. Algunos de estos materiales parecen poseer las figuras de mérito más grandes conocidas, por lo menos a temperaturas altas. En los últimos años se han estudiado sistemas de baja dimensionalidad y los cálculos realizados en estos sistemas muestran que zT puede alcanzar valores del orden de 20 unidades, aún así, quedan muchos sistemas por investigar¹⁴.

ELEMENTOS TERMOELÉCTRICOS

Existen en el mercado dos tipos de placas: las llamadas placas de efecto Peltier (ver fig. 8) o termoeléctricas que se utilizan para enfriar y las placas de efecto Seebeck para generar corriente eléctrica. Las placas de efecto Peltier son las más empleadas debido a que su costo es cada vez menor y sus aplicaciones para el mercado del consumo se incrementan día a día. Las placas de efecto Seebeck son las de mayor costo. Prometen ser importantes en un futuro no muy lejano y permiten recuperar energía de focos calientes, como el de los tubos de escape en los automóviles.

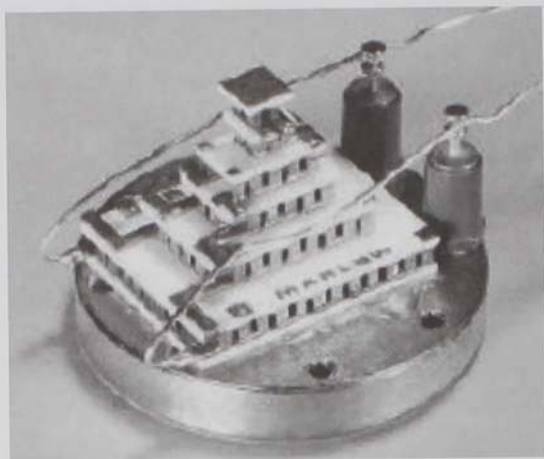


FIGURA 9

Una placa termoelectrica está constituida por una serie de elementos semiconductores de tipo N y P que están dispuestos sobre una superficie cerámica, eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

Existen también las placas multinivel (ver fig. 9) que permiten conseguir saltos térmicos importantes, pudiendo llegar incluso a diferencias de 130 °C. Las potencias a disipar, a medida que se aumentan los gradientes de temperatura son cada vez menores, pero las ventajas de poder refrigerar puntualmente son muy importantes.

La refrigeración por métodos termoelectricos podría sustituir a los sistemas de refrigeración actuales, eliminando el uso de clorofluorocarbonos CFC, gases contaminantes que destruyen la capa de ozono. Además del alto beneficio que lo anterior representa en términos ecológicos,

la refrigeración termoelectrica posee diversas ventajas:

- Producción de frío y calor indistintamente invirtiendo la polaridad de la tensión aplicada.
- Ser totalmente silenciosa y no producir vibraciones.
- Fácil variación de la potencia refrigerante, actuando sobre la tensión de alimentación.
- No necesita mantenimiento.
- No posee elementos móviles.
- Puede funcionar en cualquier posición.

CONCLUSIONES

La comunidad científica intenta aumentar el factor de mérito por medio de la búsqueda de nuevos materiales, incluidos los sistemas de baja dimensionalidad como puntos cuánticos y super-redes. Sólo en el Departamento de Física del CINVESTAV se realiza investigación de los fenómenos termoelectricos sin utilizar nuevos materiales, sino que se busca una mejor comprensión de los principios físicos relacionados con estos fenómenos.

NOTAS

- ¹ Anatyshuk, Lukian, 1994, "Seebeck or Volta", *Journal of Thermoelectricity*, 1, pp. 9-10.
- ² Ioffe, Abraham, 1960, *Semiconductor Thermo-elements*, Moscú, Akademia Nauk.
- ³ Gurevich, Yuri; Logvinov, Georgiy; Titov, Oleg; Giraldo, Jairo; 2002, "New Physical Principles of Contact Thermoelectric Cooling", *Surface Review and Letters*, vol. 9, pp. 1703-1708.
- ⁴ Gurevich, Yuri; Dobrovolsky, Vladimir; 1998, "Fenómenos termoeléctricos" en *Diccionario enciclopédico "Física del Estado Sólido"*, vol. 2, pp. 368-369, Kiev, Naukova Dumka [en ruso].
- ⁵ Gurevich, Yuri; Logvinov, Georgiy; "Barrierless Electrothermal Effect", *Applied Physics Letters*, (enviado).
- ⁶ Keizer, J., 1987, *Statistical Thermodynamics of Nonequilibrium Processes*, New York, Springer-Verlag.
- ⁷ Volovichev, Igor; Logvinov, Georgiy; Titov, Oleg; Gurevich, Yuri; 2004, "Recombination and lifetimes of charge carriers in semiconductors", *Journal of Applied Physics*, vol. 95, pp. 4494-4496.
- ⁸ Gurevich, Yuri; Titov, Oleg; Logvinov, Georgiy; Lyubimov, Oleg; 1995, "Nature of the Thermopower in Bipolar Semiconductor", *Physical Review B*, vol. 51, pp. 6999-7004.
- ⁹ Gurevich, Yuri; Logvinov, Georgiy; Volovichev, Igor; Espejo, Gabino; Titov, Oleg; Meriuts, Andrei; 2002, "The Role of Non-Equilibrium Carriers in the Formation of Thermo-E.M.F. in Bipolar Semiconductors", *Physica Status Solidi (b)*, vol. 231, pp. 278-293.
- ¹⁰ Gurevich, Yuri; Ortiz, Antonio; 2003, "Fuerza termoelectromotriz en semiconductores bipolares: nuevo punto de vista", *Revista Mexicana de Física*, vol. 49, pp. 115-122.
- ¹¹ Anatyshuk, Lukian, 1998, *Physics of Thermoelectricity*, Kiev, Institute of Thermoelectricity.
- ¹² Gurevich, Yuri; Yurchenko, Vladimir; 1987, "Photovoltaic effect in hot current carriers", *Bulgarian Journal of Physics*, vol. 14, N. 1, pp. 52-58.
- ¹³ Gurevich, Yuri; Mashkevich, Oleg; 1989, "The Electron-Phonon Drag and Transport Phenomena in Semiconductors", *Physics Reports*, vol. 181, pp. 327-394.
- ¹⁴ Mahan, Gerald; Sales, Brian; Sharp, Jeff; 1997, "Thermoelectric Materials: New Approaches to an Old Problem", *Physics Today*, marzo, pp. 42-47.



¿QUÉ ES REALMENTE LA TURBULENCIA?

I JORGE JAVIER CASTRO

" Yo soy un hombre viejo ahora, y cuando muera y vaya al Cielo hay dos problemas de los que espero iluminación. Uno es electrodinámica cuántica y el otro es turbulencia de fluidos. Sobre el primero soy muy optimista ".

SIR HORACE LAMB (1932)¹

TODOS PASAMOS NUESTRAS VIDAS DEPENDIENDO DE LA DINÁMICA DE fluidos, esto es del movimiento de líquidos y gases. La sangre en nuestras venas y arterias, así como el aire en nuestros pulmones son dos claros ejemplos de cómo la vida misma depende del flujo de estos fluidos. Los medios que usamos para transportarnos (terrestre, aéreo o marítimo) se mueven a través de fluidos. Y a su vez el movimiento de esos transportes depende de la potencia liberada por los fluidos que componen los combustibles que se mezclan en los motores. La atmósfera que rodea nuestro planeta es también un fluido cuyas características determinan entre otras cosas el clima y el resolver los problemas ambientales y energéticos que enfrentamos actualmente depende fuertemente de un entendimiento adecuado de la dinámica de fluidos.

En la vida cotidiana la mayoría de los fluidos que nos rodean y de los cuales dependemos muestran un movimiento azaroso, altamente irregular, aparentemente caótico y no previsible. Esto es lo que intuitivamente entendemos por turbulencia. En ocasiones esta palabra suele implicar angustia, como cuando viajamos en avión. En general este tipo de movimiento lo encontramos tanto en sistemas aparentemente simples como al servir leche al café o en el humo de un cigarrillo, hasta en situaciones más complejas como en la dispersión de contaminantes en la atmósfera y en sistemas hídricos o en la formación y evolución de nubes. Si tomamos por ejemplo el caso del humo ascendente del cigarro cuando no hay corrientes de aire, éste justo al salir del cigarro muestra un flujo regular, paralelo, al cual se le conoce como flujo laminar. Pero después de ascender un poco más, el flujo se convierte en difuso, irregular y curvado, es decir turbulen-

El Dr. Jorge Javier Castro es investigador titular del Departamento de Física del CINVESTAV. Correo electrónico: jjcastro@fis.cinvestav.mx

to. Esta idea intuitiva se ha llevado a otros campos del conocimiento, se habla por ejemplo de turbulencia social, financiera, y otras, para implicar situaciones inestables y no controlables. Pero ¿podemos pasar de lo intuitivo a lo cuantitativo y definir realmente la turbulencia? Esta pregunta ha inquietado por mucho tiempo a físicos, matemáticos e ingenieros. Richard Feynman, premio Nobel en Física se refirió a la turbulencia como el problema más importante de la física clásica que aún no se ha resuelto.² En este artículo trataré de dar respuesta a esta pregunta analizando propiedades físicas básicas de fluidos, sin entrar al rigor matemático y comentaré acerca de algunos de los avances más importantes en este campo, los cuales permiten tomar actitudes optimistas respecto a un mejor tratamiento y entendimiento de este problema.

El estudio de la dinámica de fluidos se inició hace varios siglos y se pueden encontrar los primeros intentos por entender la complejidad de los posibles movimientos que describen estos sistemas en trabajos de Leonardo da Vinci y en el segundo volumen de *Principia Mathematica* de Isaac Newton. Pero realmente el planteamiento formal de la descripción de fluidos se inició principalmente con los trabajos de Leonhard Euler, Claude Louis Marie Henri Navier y George Gabriel Stokes. En 1755, Euler planteó una ecuación para describir el movimiento de un fluido que no es otra cosa más que la segunda ley de Newton para un elemento de volumen del fluido con densidad ρ constante:

$$\rho \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{r},t)}{dt} = -\nabla p(\mathbf{r},t)$$

donde $\mathbf{u}(\mathbf{r},t)$ y $p(\mathbf{r},t)$ son la velocidad y presión del fluido respectivamente en el punto $\mathbf{r}$ y al tiempo t . A este elemento de volumen del fluido, el cual es muy pequeño comparado con el volumen del objeto en consideración, pero muy grande comparado con las distancias entre las

moléculas que forman al fluido, se le acostumbra llamar partícula del fluido. La derivada de la velocidad respecto del tiempo no se refiere a la razón de cambio de la velocidad del fluido en un punto fijo del espacio (derivada local), sino a la razón de cambio de la velocidad de una partícula del fluido al moverse en el espacio (derivada material). Al referir esta última a puntos fijos en el espacio obtenemos dos contribuciones las cuales se originan del cambio de la velocidad durante el tiempo dt en un punto fijo en el espacio y la diferencia entre las velocidades (al mismo tiempo) en dos puntos separados por una distancia $d\mathbf{r}$, que es la distancia que se ha movido la partícula del fluido durante el tiempo dt .

Con estas consideraciones, la segunda ley de Newton para la partícula del fluido queda expresada como:

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r},t)}{\partial t} + \mathbf{u}(\mathbf{r},t) \cdot \nabla \mathbf{u}(\mathbf{r},t) = -\frac{\nabla p(\mathbf{r},t)}{\rho}$$

Esta ecuación de movimiento del fluido, es conocida como la ecuación de Euler y es una de las ecuaciones fundamentales de dinámica de fluidos. Sin embargo, uno de los problemas de esta ecuación es que no contempla la idea de disipación de energía debido a la viscosidad, la cual se origina por la fricción de una partícula de fluido con las partículas vecinas, ni intercambio de calor entre diferentes partes del fluido. Por ejemplo si uno calcula la máxima velocidad que puede alcanzar un coche usando la ecuación de Euler, con las características actuales y parámetros reales, se encuentran velocidades por arriba de los 1000 km/hr, en vez de ser del orden de los 200 km/hr.

Navier en 1827 y Stokes en 1845 agregaron a la ecuación de Euler, el término apropiado que toma en cuenta la disipación por viscosidad, dando lugar a lo que se conoce como la ecuación de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) \cdot \nabla \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\nabla p(\mathbf{r}, t)}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$$

donde $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática (μ es el coeficiente de viscosidad del fluido). Esta ecuación tiene la forma más simple en donde se puede manifestar el fenómeno de turbulencia, sin tomar en cuenta complicaciones extras como reacciones químicas y producción de ondas de sonido debido a la compresibilidad del fluido. A pesar de que la ecuación de Navier-Stokes contiene la física necesaria para poder describir el flujo de fluidos, ya que el término proporcional a la viscosidad hace que la energía cinética sea disipada en calor, los primeros intentos por resolver esta ecuación para situaciones reales dieron lugar a contradicciones. Las dificultades inherentes de dicha ecuación para tratar el fenómeno de turbulencia provienen principalmente de su no linealidad y como comentaremos un poco más adelante del amplio rango de escalas involucradas en este fenómeno. Cabe mencionar que hasta la fecha la solución a la ecuación de Navier-Stokes es todavía un problema abierto y uno de los siete problemas en matemáticas del milenio definido por el Instituto de Matemáticas Clay de Cambridge, Massachussets. En la reunión que convocaron en El Colegio de Francia en el año 2000, el Comité de Directores del Instituto decidió asignar un premio de \$7,000,000.00 EUA para la solución de esos problemas, correspondiendo \$1,000,000.00 a cada uno.³

Entre los avances más importantes para definir el fenómeno de turbulencia, se encuentra el realizado por Osborn Reynolds en 1894.⁴ Al realizar experimentos de flujos en ductos,

estableció la existencia de dos modos diferentes de flujos: laminares y turbulentos y normó el criterio para la generación de la turbulencia en términos de un parámetro adimensional

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

donde U es la velocidad característica del fluido, L es la escala de longitud típica y ν la viscosidad cinemática. Este parámetro es lo que conocemos actualmente como el número de Reynolds. Si este número no es muy grande, el flujo será laminar, es decir, mostrará variaciones regulares y previsibles tanto en espacio como en tiempo. Es el tipo de flujo que vemos al caer el agua si abrimos poco la llave del lavabo. Al aumentar el valor del número de Reynolds, el flujo empieza a mostrar una serie de inestabilidades hasta que para valores muy grandes, el flujo muestra un movimiento azaroso, altamente irregular, aparentemente caótico y no previsible: el flujo se convierte en turbulento. Este flujo es el que vemos al caer el agua si abrimos toda la llave del lavabo. Dado que para la mayoría de los fluidos ν tiene valores típicos del orden de $10^{-2} - 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ y adquieren velocidades mucho mayores que 1 cm/s en escalas de longitud mucho mayores que 1 cm , $Re \gg 1$, por lo que en la vida real flujos turbulentos es más la regla que la excepción. Cuando vemos en detalle movimientos de fluidos turbulentos, independientemente del tipo de fluido (agua, aire, miel, gasolina, etc.), observamos que esos movimientos se dan en un gran rango de escalas. Los vórtices que se forman como resultado de la turbu-

lencia varían en tamaño desde dimensiones del sistema mismo hasta escalas tan pequeñas que puedan ser resueltas por el ojo humano o cámaras de observación. Estos vórtices no son estáticos, sino que están sujetos a una dinámica extremadamente compleja, como resulta evidente de la simple observación de sistemas naturales: rápidos en ríos o nubes, en donde Re puede ser del orden o mayor que 10^8 . Este hecho es lo que nos permite definir otra de las características fundamentales de la turbulencia, la de mezclar propiedades de transporte del fluido, tales como calor, concentración de partículas, oxidantes en combustibles, etc., de una manera mucho más eficiente y rápida que si fuese por un simple proceso de difusión molecular, caracterizado por distribuciones Gaussianas. En 1905 Einstein formuló la teoría del movimiento Browniano la cual ha permitido explicar un gran número de fenómenos físicos, químicos, biológicos, ecológicos y hasta económicos. En esta teoría describió el movimiento de partículas individuales en términos de la estadística de Boltzmann-Gibbs, mostrando que las propiedades macroscópicas de difusión siguen una distribución Gaussiana. Este proceso explica, por ejemplo el porqué una cucharada de azúcar endulza toda una taza de café, o por qué el perfume que usa una persona puede extenderse por todo un cuarto. Sin embargo, si al poner la cucharada de azúcar al café agitamos fuertemente con la cuchara estamos creando turbulencia y la dispersión de azúcar se da mucho más rápido y el movimiento de las partículas ya no puede ser descrito por una distribución Gaussiana, por lo que se ha requerido el estudiar teorías más

allá del movimiento Browniano. Evidencia experimental muestra que en flujos turbulentos las partículas siguen una distribución no Gaussiana, de una clase que fue propuesta en 1937 por el matemático francés Paul Lévy y las cuales se conocen actualmente como distribuciones de Lévy. Éstas se manifiestan en situaciones con fuertes fluctuaciones, donde la probabilidad de observar eventos atípicos no es muy pequeña. Manifestaciones de estas distribuciones se han encontrado en sistemas aparentemente tan diversos como: flujos turbulentos, fluctuaciones en la bolsa de valores y ritmos cardíacos. Estos hechos nos permiten dar una definición mucho más precisa de lo que es la turbulencia. Podemos decir que un flujo es turbulento cuando su número de Reynolds es muy grande, por lo cual su movimiento se convierte en impredecible, la mezcla de sus propiedades de transporte son mucho más eficientes que la difusión molecular y que involucra un rango muy grande de escalas en el tamaño y dinámica de sus vórtices, desde escalas grandes características del tamaño del flujo, hasta pequeñas escalas donde la viscosidad molecular juega un papel importante para estabilizar el sistema. Físicamente, el número de Reynolds, mide en esencia la importancia relativa de los efectos no lineales sobre los efectos de viscosidad en la ecuación de Navier-Stokes, o lo que es lo mismo mide la importancia relativa de las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas.⁵ Por lo cual grandes números de Reynolds y formación de turbulencia se presenta cuando las fuerzas inerciales (efectos no lineales) son mucho más intensas que las fuerzas viscosas.

De los primeros conceptos que dieron base a un mejor entendimiento del fenómeno de turbulencia a grandes números de Reynolds fueron los originados por el meteorólogo Lewis Fry Richardson en 1922⁶ quien al observar la atmósfera turbulenta propuso el concepto de cascadas de energía. Richardson consideró a la turbulencia como formada por remolinos entrelazados de diferentes tamaños. Los remolinos de tamaño l poseen una velocidad característica $u(l)$, y escalas de tiempo $\tau(l) = l / u(l)$. Los remolinos más grandes están caracterizados por una longitud de escala l_0 , la cual es comparable con la escala del flujo L , y una velocidad característica $u_0 = u(l_0)$ comparable con la velocidad característica del flujo U . Por esto, el número de Reynolds para estos remolinos grandes $Re_0 = u_0 l_0 / \nu$ es del orden del número de Reynolds del flujo y por definición este es grande, por lo cual el efecto de la viscosidad es despreciable. El concepto que introdujo Richardson fue el de considerar que esos remolinos grandes son inestables por lo cual se fragmentan creando remolinos de tamaño más pequeño, los cuales son a su vez inestables y sufren una fragmentación similar creando remolinos de tamaño todavía más pequeño y así sucesivamente transfiriendo su energía a remolinos cada vez más pequeños. Esta cascada de energía, en la cual la energía es transferida sucesivamente a remolinos cada vez más pequeños continúa hasta que se forman remolinos de tamaño característico l , cuyo número de Reynolds $Re(l) = u(l)l / \nu$ es suficientemente pequeño que el movimiento del remolino es estable y el efecto de la viscosidad molecular se vuelve dominante, disipando la energía cinética como calor. La razón de disipación de energía (por unidad de masa) ϵ , esto es, la disipación de energía por unidad de tiempo en esta cascada, queda determinada entonces por el primer proceso de toda la secuencia, que corresponde a la inyección de energía a los remolinos más grandes. De acuerdo con las definiciones dadas antes, esos

remolinos tienen energías del orden de u_0^2 y escalas de tiempo $\tau_0 = l_0 / u_0$, por lo que en imagen de cascada de energía, la razón de transferencia de energía ϵ , se escala como $u_0^2 / \tau_0 = u_0^3 / l_0$, independiente de la viscosidad ν (para números de Reynolds grandes). Esto permite crear una imagen de la turbulencia en donde los remolinos más grandes del sistema son creados por las inestabilidades del flujo, tales como huracanes o el viento alrededor de un coche o avión. Esto lo podemos ver en una forma muy simple si en una tina con agua agitamos fuertemente el agua con el brazo y luego sacamos la mano, observando cómo la energía se transfiere a las escalas más pequeñas, hasta que después de un tiempo el agua queda quieta pero con una temperatura un poco mayor. Estrictamente hablando las energías, velocidades u y tamaños de remolinos l deben ser promedios estadísticos, por lo cual podemos en general definir el promedio de la razón de disipación de energía $\langle \epsilon \rangle = u^3 / l$. De esta simple ecuación podemos estimar la potencia generada por un flujo turbulento, por ejemplo para una nube típica tipo cumulus, $l \sim 1 \text{ km}$ y $u \sim 1 \text{ m/s}$, por lo que $\langle \epsilon \rangle \sim 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ y la potencia total $\langle \epsilon \rangle \rho l^3$ es 1 megawatt. Este es el orden de razón de disipación de energía por este tipo de nubes. La consecuencia de esta imagen es entonces que en turbulencia para Re grandes, existen remolinos con escalas que van desde el tamaño mismo del sistema hasta tamaños muy pequeños donde la viscosidad molecular es importante.

La imagen de cascada de energía ha sido importante en el desarrollo conceptual de la turbulencia, pero hay preguntas fundamentales que este modelo no puede responder, como: ¿cuál es el tamaño de los remolinos más pequeños responsables de la disipación de energía? y ¿al decrecer l , las velocidades características y escalas de tiempo $u(l)$ y $\tau(l)$ se incrementan, decrecen o permanecen invariantes?

Éstas y otras preguntas fundamentales fueron analizadas por el gran matemático ruso Andrei

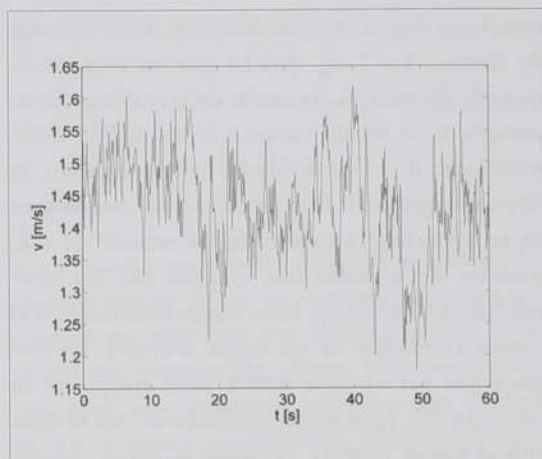


FIGURA 1 Series de tiempo de velocidad turbulenta. Velocidad absoluta atmosférica, 1min. a 10 Hz.

N. Kolmogorov, quien en 1941 introdujo la teoría de escalamiento y sentó las bases para el desarrollo moderno de la turbulencia,⁷ poniendo su estudio en el contexto de investigación básica tanto en física como en matemáticas. Esta teoría emerge de la simetría de las ecuaciones hidrodinámicas incompresibles en el límite cuando el número de Reynolds tiende a infinito. Estas ecuaciones son invariantes si simultáneamente escalamos la distancia por λ , la velocidad por λ^h y el tiempo por λ^{1-h} , donde h es un exponente de escalamiento arbitrario. La teoría de escalamiento de Kolmogorov de 1941, la cual se conoce como K41 está basada en las tres suposiciones siguientes: 1) La invariancia de escala de la ecuación de Navier-Stokes con cero viscosidad se supone válida en el sentido estadístico, esto es sólo las cantidades promediadas se suponen invariantes de escala. 2) Un flujo finito de energía $\mathcal{E}$ se supone que fluye de las escalas mayores donde la turbulencia es generada hasta las escalas pequeñas donde es disipada. 3) El flujo de energía a escala l $\langle \mathcal{E}_l \rangle$ se supone que depende únicamente del flujo de cantidades locales a la escala l y como mostramos anteriormente $\langle \mathcal{E}_l \rangle \sim u^3/l \sim \lambda^{3h-1}$, por lo que invariancia de escala implica $h=1/3$.

Esta teoría trae consigo importantes con-

secuencias de entre las cuales podemos resaltar las siguientes: a) El gradiente de la velocidad es dominante a escalas pequeñas y diverge si la cascada de energía no se corta a una escala pequeña adecuada. b) El promedio de la potencia p del incremento en la velocidad $\Delta u_l = u(+R+l) - u(R)$, medida sobre la distancia l , se escala como $\langle (\Delta u_l)^p \rangle \equiv \langle \mathcal{E}_l \rangle^{p/3} l^{p/3}$, por lo que decimos que el exponente de escalamiento es $\xi_p \equiv p/3$, a $\langle (\Delta u_l)^p \rangle$ se le conoce como la función de estructura de orden p . c) El espectro de energía, el cual es proporcional a la transformada de Fourier de la función de estructura de segundo orden $\langle (\Delta u_l)^2 \rangle$, esta dado por $E(k) = C \langle \mathcal{E}_l \rangle^{2/3} k^{-5/3}$, donde $k = 2\pi/l$ es el número de onda. El espectro de energía $E(k)$ se define como la densidad de energía cinética de la señal turbulenta en el modo k . Obviamente la simetría de escalamiento se rompe a escalas grandes en donde se genera la turbulencia (se inyecta energía) y pequeñas cuando la viscosidad molecular es importante. Esto entonces define un rango de escalas de validez del escalamiento, lo que se conoce como el rango inercial de Kolmogorov. La teoría de Kolmogorov trajo consigo la idea de universalidad de sus predicciones dentro del rango inercial, esto es que son independientes del modo en que se formó la turbulencia, sea esta dentro de una nube, en una caída de agua o formada por un avión.

Las predicciones de la teoría de escalamiento de Kolmogorov necesitaron de casi 20 años para ser probadas experimentalmente. Se ha encontrado que el escalamiento predicho $\xi_p \equiv p/3$ se satisface para estadísticas de bajo orden. Sin embargo para funciones de estructura de alto orden $p \geq 4$, el exponente de escalamiento ξ_p es

apreciablemente menor que $p/3$. Esto implica que la estadística se torna no-Gaussiana a escalas pequeñas, fenómeno que se conoce como intermitencia. Este fenómeno está relacionado con las fuertes fluctuaciones del flujo de energía en la cascada, esto es la disipación de la velocidad es intermitente. Analizando las funciones de estructura de las series de tiempo de la velocidad turbulenta, (comportamiento de la velocidad en función del tiempo, FIG 1), uno encuentra desviaciones de $K41$ para órdenes grandes, lo cual manifiesta comportamiento no lineal al aumentar el orden de la estadística o sea al probar escalas más pequeñas. Esta desviación del comportamiento lineal es causado por la naturaleza intermitente de la turbulencia. Esto implica que $\langle (\Delta u_l)^p \rangle - l^{\frac{p}{3}}$ debe ser generalizado con $d\xi(p)/dp \neq \text{constante}$. Esto ha dado lugar en los últimos años al desarrollo de modelos multifractales en el estudio de intermitencia en turbulencia a escalas pequeñas⁸.

Una pregunta fundamental en el estudio de la contaminación atmosférica es cómo evolucionan y se transportan los gases y partículas contaminantes y qué parte de estos son depositados en la superficie terrestre. Dentro de este contexto, el estudio en particular de cómo son acarreadas las partículas por las gotas de lluvia ha sido por mucho tiempo un problema de primera importancia. Por el hecho mismo de la precipitación, las gotas de lluvia se encuentran en un flujo turbulento, por lo que es necesario entender su comportamiento a escalas pequeñas. Es precisamente dentro de este concepto

que la descripción multifractal presenta un marco teórico adecuado para modelar el acarreo de partículas contaminantes por gotas de lluvia, siendo esto parte de un proyecto que se lleva a cabo en el Departamento de Física del CINVESTAV. Mediante el análisis de imágenes digitales de lluvia, se construye el campo de velocidades y la distribución espacio-temporal de las gotas y de aquí se determina el comportamiento de las funciones de estructura de las gotas de lluvia. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento multifractal manifestándose principalmente en una distribución de gotas no homogénea, tendiendo a la formación de cúmulos⁹. Estos estudios se complementan con el análisis de la interacción de partículas contaminantes, principalmente hollín, con gotas de lluvia, lo cual se lleva a cabo mediante su simulación en laboratorio utilizando filmación digital en microscopía óptica. Estos estudios forman parte del proyecto SEMARNAT-CONACYT-0306, en colaboración con el Dr. Alin Cârsteanu del Departamento de Matemáticas del CINVESTAV.

REFERENCIAS

- ¹ Goldstein, S., 1969, *Ann. Rev. Fluid. Mechanics*, 1, 23.
- ² Feynman, R.P. 1964, *The Feynman Lectures on Physics*, Feynman, Leighton, Sands, Addison-Wesley, Redwood City.
- ³ http://claymath.org/millennium/Navier-Stokes_Equations/
- ⁴ Reynolds, O. 1894, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London A186, 123.
- ⁵ Lesieur, Marcel, 1997, *Turbulence in Fluids*, Kluwer Academia Publishers.
- ⁶ Richardson, L.F. 1922, *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press, Cambridge.
- ⁷ Frisch, U. 1995, *Turbulence: The Legacy of Kolmogorov*, Cambridge Univ. Press.
- ⁸ Halsey, T.C., M.H. Jensen, L.P. Kadanoff, I. Procaccia, and B.I. Shraiman, 1986, *Phys. Rev. A* 33, 1141.
- ⁹ Castro, J.J., A.A. Cârsteanu, C.G. Flores, 2004, *Physica A* 338, 206.



NOTICIAS DEL CINVESTAV

PREMIOS DE INVESTIGACIÓN 2004 QUE OTORGA LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS OTORGÓ al **Dr. Héctor Hugo García Campeán**, investigador titular del Departamento de Física el reconocimiento en el área de ciencias exactas por sus estudios en los campos de las matemáticas y la física relacionados con la teoría cuántica de los campos, la teoría de las cuerdas y las relatividad general.

Asimismo, el **Dr. Jean Philippe Vielle Calzada**, del Departamento de Ingeniería Genética, Unidad Irapuato, obtuvo el reconocimiento en el área de ciencias naturales por sus estudios en los campos de la genética molecular y la genómica funcional relacionados con el desarrollo sexual y la embriogénesis en las plantas superiores.

PREMIO EN INVESTIGACIÓN FICOLÓGICA APLICADA

LA DRA. YOLANDA FREILE PELEGRÍN, investigadora del Departamento de Recursos del Mar, Unidad Mérida, obtuvo el Primer Premio en Investigación Ficológica Aplicada por su trabajo "Carrageenan yield and properties of *Eucheuma* *Isiforme* (Rhodophyta, Gigartinales) from Yucatán coast" presentado en el XVIII International Seaweed Symposium, que se llevó a cabo en Bergen, Noruega.

PREMIO BIANUAL DE LA SOCIEDAD DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

EL ING. MIGUEL ÁNGEL ALEMÁN ARCE, estudiante de doctorado de la Sección de Electrónica del Estado Sólido, del Departamento de Ingeniería Eléctrica obtuvo el Premio bianual otorgado por la Sociedad de Dispositivos Electrónicos de la International Conference on Electrical and Electronic Engineering (IEEE), por su trabajo "The integral function methods: a new method to determine the nonlinear harmonic distortion". El trabajo premiado fue dirigido por el **Dr. Antonio Cerdeira Altuzarra**, investigador de la Sección de Electrónica del Estado Sólido del Departamento de Ingeniería Eléctrica.

PREMIO EN EL CONGRESO CEMENT AND CONCRETE SCIENCE

LA M. EN C. LAUREN YOLANDA GÓMEZ **Zamorano**, estudiante de la Unidad Saltillo, obtuvo el Premio a la mejor presentación de estudiante en el Congreso Cement and Concrete Science el cual es auspiciado por el Institute of Materials, Minerals and Mining, de la Universidad de Leeds, Inglaterra. Lo anterior habla de la calidad de su trabajo "Composite Portland cement with geothermal waste: characteristics and properties".

PREMIOS

MAESTRO LEONARDO OLIVA 2004

EL DR. JUAN FLORENCIO GÓMEZ LEYVA obtuvo el Premio Maestro Leonardo Oliva 2004, otorgado por la Cámara Nacional de Comercio de Guadalajara, por su tesis doctoral "Desarrollo de un marcador SCAR para dos especies de hongos micorrícicos arbusculares establecidos en cultivo monoxénico". Dicho trabajo fue dirigido por el **Dr. Juan Pablo Martínez Soriano** investigador del Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Unidad Irapuato.

PREMIOS AGROBIO MÉXICO, 2004

EL DR. ARTEMIO MENDOZA MENDOZA obtuvo el Premio AgroBIO México, 2004 a la mejor tesis de doctorado en el área de biotecnología agrícola, por su trabajo "Transducción de señales extracelulares asociadas al proceso micoparasítico de Trichoderma: papel de las MAP cinasas".

La **bióloga Sara Mendoza Chagolla**, recibió el Premio AgroBIO México, 2004 a la mejor tesis de licenciatura en el área de biotecnología agrícola, por su trabajo "Caracterización molecular del hongo *Fusarium Oxysporum* patógeno del *Agave tequilana* Weber var *Azul* y la implementación de un método para su detección oportuna". Actualmente es estudiante del **Dr. Juan Pablo Martínez Soriano**, investigador del Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Unidad Irapuato.

PREMIO

ESTATAL DE LA JUVENTUD

EL M. EN C. OMAR DE LA PEÑA SEAMAN, estudiante de doctorado del Departamento de Física Aplicada, Unidad Mérida, obtuvo el Premio Estatal de la Juventud del estado de Yucatán, en el área de Actividades Académicas por sus estudios científicos.

MIEMBRO DE LA ACADEMIA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA,
LA TECNOLOGÍA Y LAS HUMANIDADES
DE PUEBLA

EL DR. EUSEBIO JUARISTI Y COSÍO, investigador del Departamento de Química es miembro de la recientemente instaurada Academia para el Avance de la Ciencia, la Tecnología y las Humanidades de Puebla.

NOMBRAMIENTOS
RECIENTES EN EL CINVESTAV

Dr. Rodrigo Huerta Quintanilla
*Jefe del Departamento de Física Aplicada,
Unidad Mérida*

Dr. Gabriel Guillermo Pérez Ángel
*Coordinador académico del Departamento
de Física Aplicada, Unidad Mérida*

Dr. Juan Carlos Martínez García
*Coordinador académico del Departamento
de Control Automático*

CEREMONIA: GRADUADO 5000

LA CONTRIBUCIÓN DEL CINVESTAV A LA INTELIGENCIA del país se ve reflejada en los 2200 estudiantes en 53 programas de posgrado, 400 alumnos en cursos propedéuticos, 1000 estudiantes externos y más de 5200 graduados a la fecha". Lo anterior fue dado a conocer por la Dra. Rosalinda Contreras Theurel, directora general del Centro, en la ceremonia que se realizó para homenajear a la graduada número 5000.

Durante su participación, la Dra. Contreras reconoció el esfuerzo de profesores y alumnos por incrementar la cantidad, pero sobre todo la calidad de los graduados. De igual manera agradeció a la Secretaría de Educación Pública por su apoyo financiero que permite salvaguardar el liderazgo del Centro, y al Conacyt por proporcionar becas a más del 80% de los estudiantes y haber financiado un gran número de proyectos.

Destacó que el CINVESTAV cuenta con los únicos programas competitivos a nivel internacional en las áreas de educación, ingeniería y tecnología, además de estar a la altura de las mejores universidades norteamericanas y agre-

gó que alberga un gran número de estudiantes extranjeros.

"El año pasado se graduaron seis maestros y tres doctores cada semana, siendo más del 50% investigadores nacionales. Asimismo se han recibido 20 premios Weizman, 16 premios de la Academia Mexicana de Ciencias y 5 premios nacionales por mencionar algunos de los logros del CINVESTAV", recalcó.

El evento contó con la presencia de los ingenieros Jaime Parada Ávila, director de Conacyt, y Bulmaro Fuentes Lemus, director de Institutos Tecnológicos de la SEP, en representación de la Junta Directiva del CINVESTAV, así como con diversas autoridades del Centro como los doctores José Mustre de León, secretario académico, Luis Alfonso Torres, secretario de planeación y Enrique Campesino, secretario administrativo.

También estuvieron presentes egresados del CINVESTAV procedentes de diversas generaciones quienes hicieron uso de la palabra junto con el Dr. Hugo González Serratos, primer alumno del Centro y la Dra. Gabriela Buendía Ábalos quien es la graduada 5000. Como parte de la conmemoración se entregaron reconocimientos a todos los participantes.



TECNOLOGÍA ROBÓTICA

LA PRÁCTICA MÉDICA DIO UN GRAN PASO HACIA la llamada tercera revolución quirúrgica con la creación del brazo robótico, diseñado en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), por el Dr. Arturo Minor Martínez, investigador en la Sección de Bioelectrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica, bajo la iniciativa del Dr. José Luis Mosso de la División de Cirugía del Hospital Juárez de México.

Los requerimientos médicos que definieron ambos investigadores fueron obtener un brazo de peso y volumen reducido, de fácil manejo, ergonómico y preciso, que apoyara al cirujano principal, y que fuera capaz de sostener la lente del laparoscopio durante una intervención quirúrgica, disminuyendo así el riesgo de daños traumáticos en el tejido y órganos del área de ingreso y de navegación de éste.

El brazo robótico fue empleado por especialistas mexicanos, quienes realizaron en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, dos colecistectomías (extracciones de vesícula biliar mediante la técnica laparoscopia). Las operaciones se realizaron por medio de telecirugía, esto es, se instalaron dos salas, una de quirófano en Chiapas y una sala remota en la Ciudad de México. El cirujano en Chiapas recibió asistencia por el primer ayudante con el brazo robótico y teleoperado desde cuatro metros de distancia que sujetó y posicionó el laparoscopio, y recibió instrucciones por el cirujano remoto desde la Ciudad de

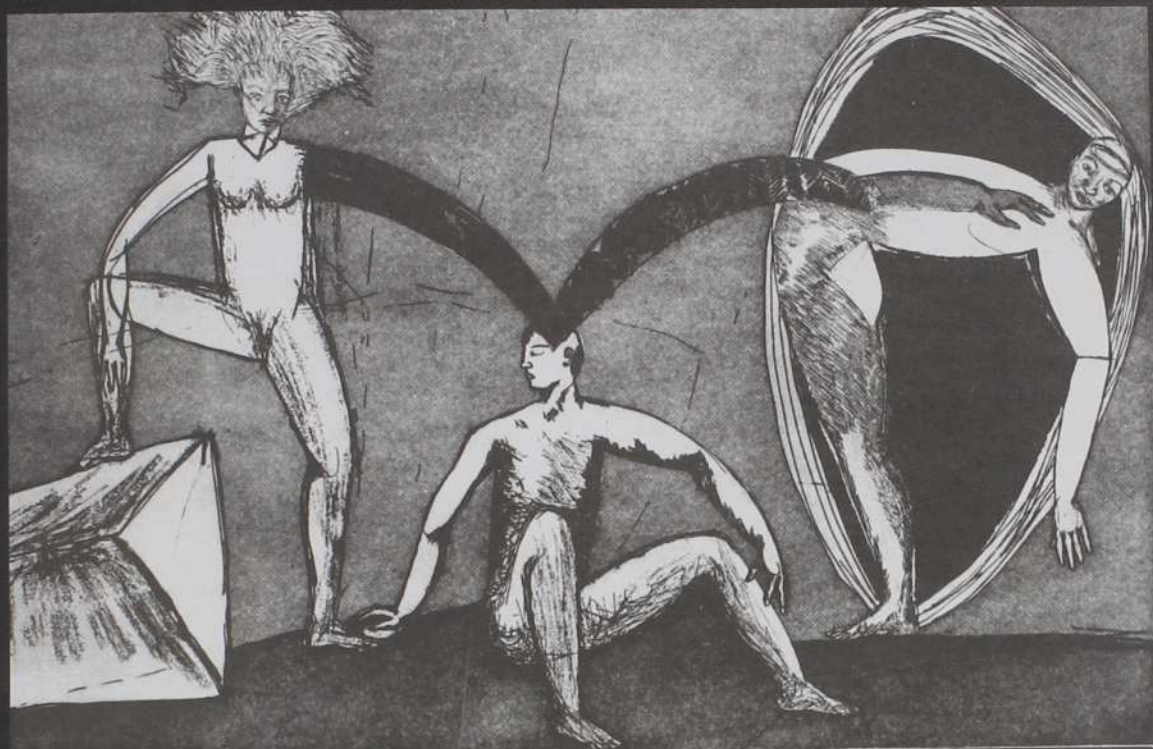
México, basado en el análisis de imágenes del monitor del laparoscopio, cámara de video de circuito cerrado y cámara de videoconferencia robotizada y audio.

La sala remota se enlazó con 19 centros de telediagnósticos y auditorios de la República Mexicana, donde cirujanos y personal paramédico observaron la telecirugía. A través de este enlace algunos de ellos emitieron una segunda opinión quirúrgica.

El sistema de telecirugía ofrece ventajas como guiar u orientar a grandes distancias procedimientos quirúrgicos; emitir diagnósticos transoperatorios, valorar la extensión de la enfermedad, invasividad y en ciertos casos evitar traslados innecesarios o referencias oportunas de acuerdo a los hallazgos transoperatorios que disminuyen gastos al paciente, familiares e instituciones de salud.

Debido al éxito que se ha demostrado con la técnica laparoscopia, el CINVESTAV está por concluir un segundo prototipo, el cual tendrá mejoras respecto a su versión anterior, en cuanto a tamaño y peso. El Dr. Minor Martínez señala que se encuentra en desarrollo el tercer robot totalmente novedoso, que será controlado por el cirujano principal y no requerirá de un asistente para su control.

El Dr. Minor Martínez afirma que esta tecnología ejemplifica el potencial del país para realizar desarrollos de frontera pues hay capacidad, personal e ideas; y agregó que de consolidarse proyectos de este tipo es muy probable que algún día incluso lleguemos a exportarla.



Departamento de Física
CINVESTAV
del 11 al 22 de julio de 2005

Escuela Avanzada de Verano



CURSOS:

Materia Oscura

David Cline (Universidad de California, Los Angeles, EUA)

Espintrónica y Computación Cuántica

Enrique de Anda (Pontificia Universidad Católica, Brasil)

Teoría de Campos

José Gracia-Bondía (Universidad Complutense de Madrid, España)

Física de astropartículas

Francis Halzen (SCEC, EUA)

Estados Supercoherentes

Luis Miguel Nieto (Universidad de Valladolid, España)

Física de Polímeros

Monica Olvera (Universidad de Northwestern, EUA)

Física de biomoléculas y biosistemas

Joel Stavans (Instituto Weizman, Israel)

Física de semiconductores nitruados

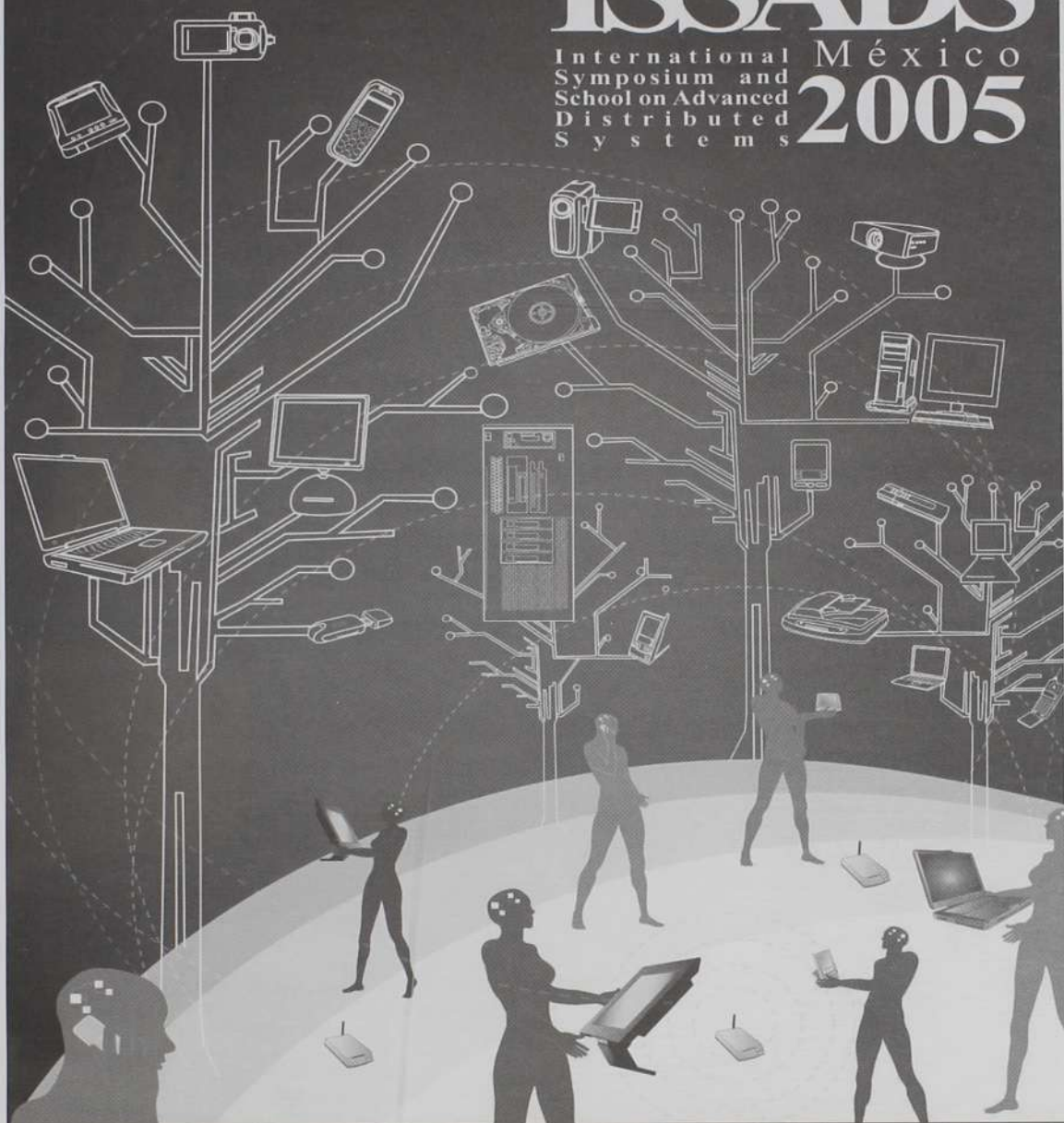
Charles Tu (Universidad de California, San Diego, EUA)



Habrà apoyo económico para profesores y estudiantes de instituciones de provincia, consultar las bases en:
<http://www.fis.cinvestav.mx/~verano>
Información Srta. Miriam Lemell, tel + fax 50613679, o escribir a verano@fis.cinvestav.mx.
Coordinador Dr. Oscar Rosas-Ortiz

ISSADS

International México
Symposium and School on Advanced
Distributed Systems 2005



www.gdl.cinvestav.mx/issads

Guadalajara, Jalisco, México
del 24 al 28 de Enero 2005



Contacto: Félix Ramos al f Ramos@gdl.cinvestav.mx
Gabriela Tagliepietra al issads@gdl.cinvestav.mx
Tel: (52) (33) 3134 5570 ext. 2026, 2046

FE DE ERRATAS

En nuestro número anterior de julio-septiembre 2004, vol. 23, núm. 3, escribimos de forma incorrecta el apellido del artista plástico que amablemente nos proporcionó su obra. En lugar de Ramón Martín, debió decir: Ramón Marín.

Asimismo, en la p. 19, en la cabeza del artículo dice:
Farmacobiología y debió decir:
Farmacobiología.

En la p. 60, línea 12 dice:
Nunca entendió la vida libertina de su maestro ni le perdonó que se negara a poner a compartir los archivos de sus observaciones. Debió decir:
Nunca entendió la vida libertina de su maestro ni le perdonó que se negara a compartir los archivos de sus observaciones.

CONTRIBUCIONES

Las contribuciones para la revista *Avance y Perspectiva*, deberán enviarse a las oficinas del CINVESTAV en los siguientes formatos.

TEXTOS:

Word, Disco 3/5 ó CD-ROM

Cuando se trate de artículos de investigación la extensión máxima será de 15 cuartillas; en cuanto a los artículos de difusión se aceptará un máximo de 10 cuartillas.

Si el texto incluye tablas, éstas se entregarán en archivo por separado, en disquette en texto corrido y con una impresión adjunta que muestre la forma en que debe quedar la tabla. Además, se debe indicar en el original la ubicación de éstas. La indicación es también válida para esquemas y cuadros.

Las notas deberán incluirse al final del trabajo, antes de la bibliografía o de las referencias, debidamente numeradas.

Las referencias deben apegarse a los modelos siguientes:

Libro:

Wiener, Norbert, 1985, *Cibernética: o el control y la comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets.

Artículo de revista:

Ádem, José, 1991, "Algunas consideraciones sobre la pesca en México", en *Avance y Perspectiva*, vol.10, abril-junio, pp. 168-170.

Se sugiere que las referencias sean cuidadosamente revisadas por los autores y que los títulos de los artículos y los nombres de las publicaciones no se abrevien.

Todos los textos deben incluir el nombre del autor, grado académico, adscripción y cargo que desempeña, teléfono y correo electrónico.

IMÁGENES Y GRÁFICAS:

TIFF, 10 x 10 cm (mínimo), 300dpi, Blanco y negro, CD-ROM. Las imágenes se entregarán en forma física, de preferencia en transparencias. No se aceptarán imágenes de internet o cámara digital debido a que la resolución que presentan no es adecuada.

En caso de que el trabajo incluya diapositivas en power point, favor de remitirlas impresas en papel fotográfico y en máximo grado de resolución y no a través de archivos de office.



Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados del IPN

CINVESTAV

avance@mail.cinvestav.mx

T/F 57 47 70 76

www.cinvestav.mx/publicaciones

Av. IPN 2508, Zacatenco, C. P. 07360

**AHORA NOS CONOCEN
COMO LA FLOTA MAS MODERNA DEL
MUNDO, PERO SEGUIMOS SIENDO:
MEXICANA.**



La aerolínea mexicana líder en América
que además de toda su experiencia,
te ofrece viajar por una enorme red
de destinos en los aviones más modernos.



mexicana.com

MEXICANA 

Siente la experiencia



Centro de Investigación
y de estudios avanzados del IPN
CINVESTAV