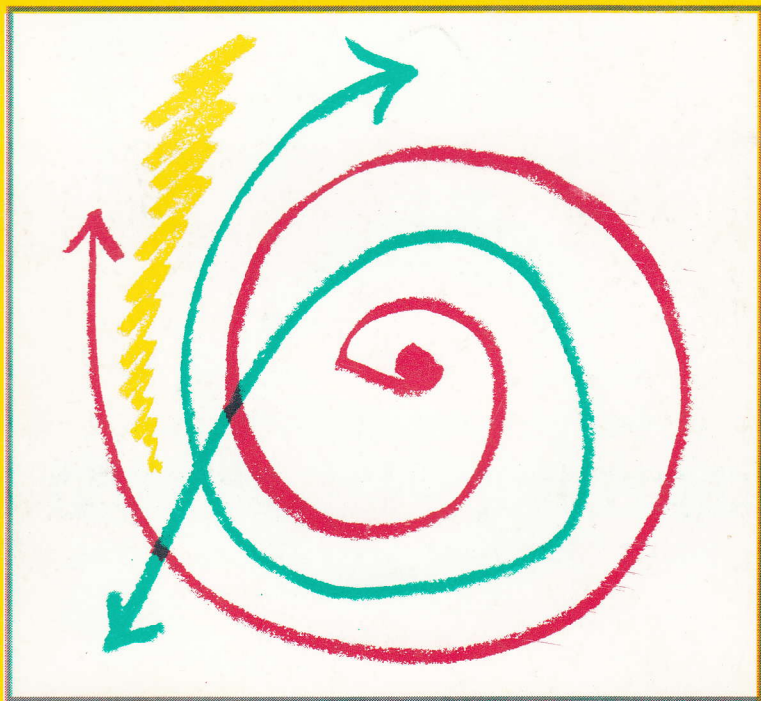


EDUCACIÓN en FÍSICA

ISSN: 0797-9045

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay



Volumen 5 Número 2

Diciembre, 1999



EDUCACION EN FÍSICA

Volumen 5 N° 2
Diciembre de 1999
Depósito Legal:
299222 / 99

Redactor Responsable:

Sandry Ramírez

Consultores de Redacción:

Mario Guerra
Alejandro Villamil
Anna María Cossio
Gustavo Carbonell

Colaboraron en este número:

Ana Piccinino
Adriana Echarte
María Elisa Zaparrart
Daniel Baccino
Ernestina Sánchez
Pedro Baldriz
Maylí Tourn
Adriana Machado
Reyna Eugui
Gustavo González

Educación en Física es una revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay, que se distribuye gratuitamente entre sus socios. Precio: U\$ 4

Comisión Directiva de A.P.F.U

Zoraida Viera
Ernestina Sánchez
Marcelo Berruti
Gustavo González
Claudia Varaksa

Dirección de la Revista

Gaboto 1435 / Of. 002
Montevideo cp 11200
Telefax: 598 2 400 1258
E-mail: rev_apfu@i.com.uy
apfu@adinet.com.uy

Publica: Ediciones IDEAS

Mercedes 1786
11200 Montevideo-Uruguay
Telefax. 408 69 85
E-mail: edideas@adinet.com.uy



Portada: Ernestina Sánchez

EDITORIAL

Un nuevo encuentro, un nuevo esfuerzo y el cumplimiento de lo prometido en la edición anterior.

El trabajo que este equipo viene haciendo se ve altamente recompensado con innumerables sugerencias y críticas muy positivas, aportes valiosísimos y artículos variados.

La propuesta de fechas de cierre fue muy bien recibida por quienes se acercaron para expresar su apoyo; muchos profesores (hecho que nos fortalece) han prometido su participación, aunque no llegaban para este número dadas las circunstancias de finales de cursos y evaluaciones definitorias para nuestros estudiantes. No en esta, Sí en la próxima.

Como verán, seguimos apostando a la variedad, aunque, en esta edición, hemos aumentado el aporte de ideas para el laboratorio, en la forma de: guías para "nuevas" prácticas; variantes de algunas conocidas; cambios sugeridos en los procesos de medición y las Soluciones Prácticas. Cabe aclarar que, si bien en este número aparecen dos, hemos recibido 6 hasta el momento de cierre, las cuales se irán procesando para incluirlas en futuras publicaciones. Invitamos a todos a que nos acerquen material al respecto; pues, aunque la idea no esté concluida o no esté completamente desarrollada, es igualmente importante, porque entre todos, podemos terminar de "darle forma" para luego difundirlas por este medio y seguir cumpliendo con las metas propuestas en nuestro editorial anterior.

Agradecemos infinitamente las sugerencias que nos aportaron los colegas; fundamentalmente en nuestro encuentro de Mercedes; y trataremos de atenderlas a todas. Destacamos algunas: inclusión de sugerencias sobre estrategias para abordar distintos temas en las clases de 2° Ciclo; "ejercicios" seleccionados "interesantes"; recomendaciones bibliográficas; reciclaje de materiales; edición digital de la revista y publicación en Web; y mucho, mucho de "soluciones" para el laboratorio.

Colegas y colaboradores, esto, más que sugerencias, son invitaciones; no seamos "tímidos", acerquémonos a la revista.

A quienes nos brindaron sus opiniones, personalmente o por e-mail, ¡gracias! Y a todos ¡feliz 2000! Y que la Física los acompañe.

La Redacción

CON RELACIÓN A LA PRESENTE EDICIÓN

Nos deja una profunda sensación de expectativa cumplida el hecho de recibir tantos buenos comentarios acerca del número anterior, y, a la vez, nos deja también, un profundo compromiso con Uds. para tratar de mejorar en cada entrega.

Hemos recibido nuevos aportes de diversos orígenes y debemos destacar el trabajo de los colegas consultores, que han cumplido con gran esfuerzo y dedicación una tarea bastante difícil y que requiere de un tiempo precioso.

Notarán que algún artículo recibió nuevos aportes en este número, como por ejemplo el tan mentado gato (o al menos el de "nuestro universo"); algunos autores aumentarán el aporte a sus anteriores artículos, aunque, debido principalmente a sus innumerables ocupaciones y a las actividades propias de estas fechas, no han podido llegar a tiempo para esta edición; pero, como se dijo antes: no en esta, sí en la próxima y bienvenidos todos aquellos que quieran hacer de nuestra publicación una referencia.

CÓMO ENVIAR SUS TRABAJOS

Pueden ser enviados para su publicación, contribuciones de diversos tipos: trabajos prácticos, teóricos, divulgación, tesis de doctorado, notas, comentarios de libros, sugerencias "web", software, consejos prácticos y todo artículo, original o no, que nuestros lectores crean conveniente.

1. Los trabajos deben enviarse por duplicado, archivos de computadora e impresos. En ambas debe figurar el nombre de él o los autores, dirección, lugar de trabajo, un breve currículum y de ser posible, un resumen temático.
2. Las citas bibliográficas se relacionarán al final del trabajo por orden alfabético, indicando:

Para artículos de revistas: apellido del autor(es), año, título del artículo encomillado, título completo de la revista, volumen, número y páginas.

Para libros: apellido del autor(es), año, título del libro subrayado, editorial, lugar, número de páginas y número de edición, en caso de que el libro sea traducción, indicar entre paréntesis autor de la traducción, nombre original de la obra subrayado, editorial y año; dentro del texto las referencias se indicarán

dando apellido(s) y año entre paréntesis.

3. Los archivos pueden ser enviados por correo electrónico a la dirección de la revista o a la de la Asociación; enviando el texto con los objetos incrustados y los objetos por separado, mapa de bits (8 bits) o 256 tonos de gris, en lo posible se respetarán los formatos originales, pudiendo variar a criterio editorial y en función de necesidades de compaginación, los tamaños de las ilustraciones.
4. Para simplificar el proceso de armado, sería conveniente que los trabajos llegaran por la vía mencionada en 3.-, enviados por correo común o alcanzados a la Revista acompañados del archivo informático correspondiente, debidamente etiquetado.

Esperamos sus trabajos, consejos, críticas y sugerencias en

La dirección de A.P.F.U.:

apfu@adinet.com.uy

La dirección de la revista:

rev_apfu@i.com.uy

(Correo o e-mail)

Ordenando... Entropía

Gustavo Carbonell (I.P.A.)

Introducción

La entropía concepto introducido por Clausius era, contrariamente a lo pensado por sus contemporáneos, no una nueva magnitud física sino la reconstrucción de la "cantidad de calor" concebida 100 años antes por el químico escocés Black. Una cantidad de análogas propiedades fue usada por Carnot con el nombre de "calórico" en el trabajo que sienta las bases de la Termodinámica

En estas afirmaciones el calor aparece como un cierto tipo de sustancia (del estilo del calórico de Carnot) que puede residir en los cuerpos y de hecho puede fluir. Para el físico, el calor no es un tipo de sustancia sino una forma de energía.

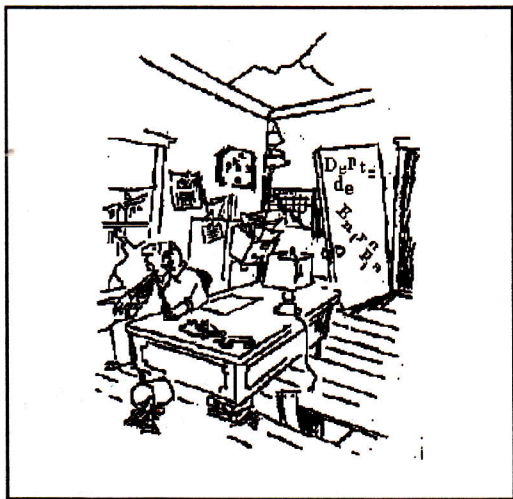
Esto, desde el punto de vista matemático, implica que el calor está representado por una diferencial parcial. Físicamente hablando: la energía puede fluir de adentro y hacia fuera de un sistema, o viceversa, como calor; pero está mal imaginar que la ener-

gía queda en el sistema como calor. El calor deja de ser "calor" una vez que se incorpora al sistema, es solo energía indistinguible de las otras formas. En el fondo los conceptos de CALOR y TRABAJO evalúan energía en tránsito, procesos de transferencia, los que cesan y desaparecen cuando la transferencia termina. Los sistemas no "guardan" trabajo ni calor solo ENERGÍA. Las diferentes formas de energía no son otra cosa que energía que es acompañada o transportada por distintas magnitudes extensivas y en las transformaciones de energía estas magnitudes vinculadas cambian.

Procesos termodinámicos e irreversibilidad

En nuestros cursos, que comprenden temas vinculados a la mecánica, hay algo excepcional en lo que generalmente no reparamos lo suficiente. En movimientos de cuerpos sobre los que no actúa el rozamiento, ni otra fuerza disipativa, se verifica en todos los casos la siguiente propiedad: «cualquiera que sea el movimiento estudiado, el móvil siempre puede efectuar el movimiento inverso». Es decir, si pasa por cualquier punto de la trayectoria con cierta velocidad en el movimiento directo, puede repetirlo exactamente el movimiento inverso. Si lo filmamos en video, pasarlo al derecho o sentido inverso, no implica cambios en las propiedades físicas. La velocidad, posición siguen siendo coherentes y la física del proceso funciona sin problemas. Esta reversibilidad de los movimientos mecánicos implica una simetría entre el pasado y el futuro.

Algo radicalmente distinto ocurre en los procesos termodinámicos: si un proceso va del estado A al B, como regla general, es casi imposible la ocurrencia del proceso inverso sin la intervención de agentes ex-



ternos. En general los procesos descriptos son IRREVERSIBLES. Si un gas se expande contra el vacío no es posible que espontáneamente, sin acción de algún agente externo, vuelva a las condiciones iniciales. En general cualquier conjunto de cuerpos evolucionando libremente culmina en una situación de equilibrio térmico, en estado de reposo, todos a igual temperatura y presión. Llegado el sistema a esta situación no hay evolución espontánea hacia otro estado diferente. Son irreversibles en mecánica todos los procesos que involucren fuerzas disipativas.

Si se quiere excluir la irreversibilidad de un proceso hay que evitar que el sistema alcance el equilibrio térmico. No debe haber procesos que impliquen transferencia de energía como calor (adiabáticos).

Esta imposibilidad de obtener trabajo de los cuerpos en equilibrio térmico es de hecho una versión no tradicional del primer principio. (Excluimos la posibilidad del móvil perpetuo de primera especie. El que trabajaría en el entorno de la primera ley.)

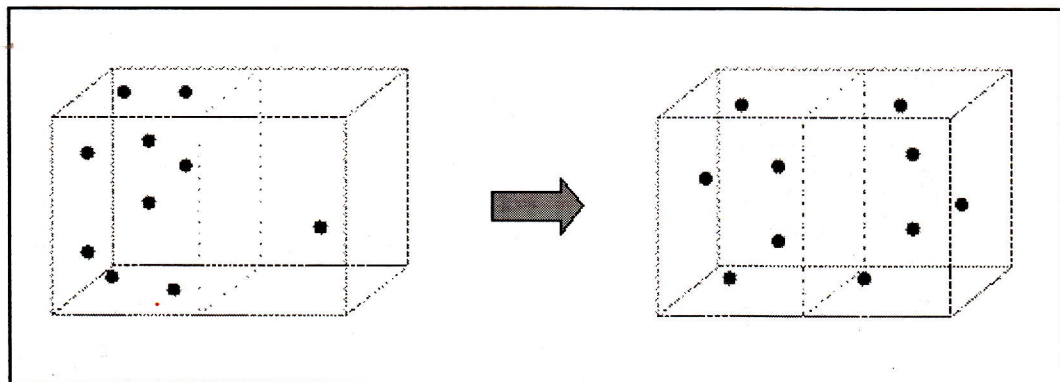
Naturaleza microscópica de la entropía

A un gas podemos considerarlo como formado por un número muy grande de moléculas. El estado termodinámico del sistema gas está vinculado a todos los comportamientos de las partículas individuales.

Consideramos una configuración para el sistema como todas las formas posibles de que las moléculas lleguen a ella. La probabilidad de una cierta configuración será tanto mayor cuando mayor grado de desorden presente, ya que se puede llegar a esta de muchas formas diferentes, por lo tanto tiene un mayor peso estadístico Ω . Por ejemplo el modelo de gas representado en la figura arriba a la izquierda tiene un peso estadístico menor que el de la derecha que representa una situación de equilibrio, configuración que se logra de mayor cantidad de modos distintos.

Microscópicamente la entropía S es proporcional al logaritmo neperiano del número Ω : $S = k \cdot \ln(\Omega)$ donde k es la constante de Boltzmann.. La ley que determina el sentido de evolución de un sistema cerrado se puede formular como una ley de aumento de la entropía. Todos los sistemas evolucionan de modo que la entropía alcanza su máximo valor al llegar al equilibrio o sea que Ω es máximo. Esto puede ser uno de los enunciados del segundo principio. Puede verse que S , la entropía, es una variable de estado que solo depende del estado de equilibrio del sistema. Junto con P , V , T y U ; S describe sin ambigüedad dicho estado de equilibrio.

El aumento de la entropía está vinculado a la irreversibilidad. La transferencia de energía por medio del calor aumenta a nivel microscópico el desorden por lo tanto aumenta el Ω de la distribución o sea S .



Entropía como sustancia

El definir entropía "a la Clausius":

$$dS = dQ_{rev} / T$$

no muestra el carácter de sustancia que queremos enfatizar, los conceptos de calor, temperatura absoluta y proceso reversible más este concepto abstracto de Clausius, obligan al principiante a un duro esfuerzo de comprensión. Lo más difícil es convencer al estudiante que esa definición de Clausius, basada en fenómenos reversibles, en realidad puede ser aplicada a todo proceso y que configura una función de estado que crece si el proceso es irreversible. La entropía magnitud que reside en el sistema, se mide en cal/n y pema.

¿Qué hacemos con esto?

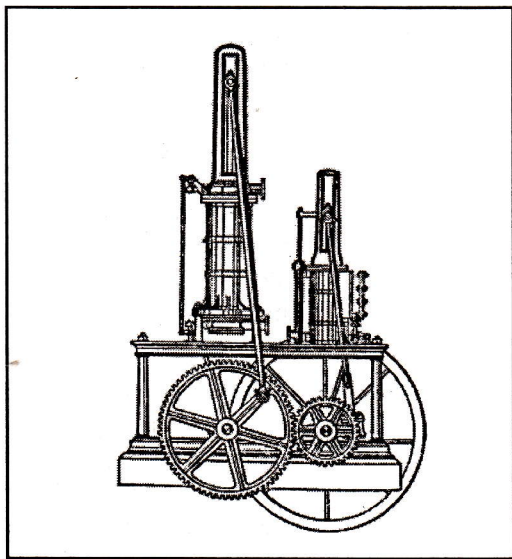
La enseñanza de la termodinámica en secundaria evita el concepto de entropía completamente. Irónicamente, esta es, a mi juicio, la razón de por qué aquella es tan

difícil para el estudiante. Sugiero humildemente para disminuir esta dificultad:

- I Operar desde el principio con la entropía S aprovechando la similitud de esta idea con el preconcepto del calórico que tienen los estudiantes.
- II Sacar ventajas del carácter de sustancia de esta magnitud.
- III Hacer notar desde el principio en el carácter irreversible de los procesos termodinámicos. Por último, permítaseme citar a F. Herrmann de la U. De Karlsruhe quien afirma:

"Termodinámica sin entropía y sin cambio de entropía en función del tiempo es como el electromagnetismo sin carga ni corriente eléctrica, o como la dinámica si cantidad de movimiento ni fuerza".

Por último transmito una recomendación que me hicieron cuando preparaba este artículo: lean, los que aman la ciencia ficción, el cuento de Asimov "La última pregunta"; fue uno de sus preferidos y es pertinente con este tema.



Bibliografía

- "The Feynman lectures on Physics" tomo 1
Caps: 4, 39, 40, 44, 45 y 46
- "Física estadística" Curso de física del
Berkeley tomo 5 Cap. 7 (apart. 7.4)
- "The arrow of time" P. Coveney & R.
Highfield
- "About Time" Paul Davies
- "Heat - Thermodynamics" F. Hermann (
apuntes de curso)
- "An analogy between information and
energy" F. Hermann - B. Smith,
"European journal of Physics" N° 7 ,1986
- "Entropy a resurrection of caloric" G. Falk "
Eur. Jour. of Physics" 1985

"En buena lógica, ¿no debería la mente del orador conocer la sustancia del tema sobre el que se dispone a hablar?" (Platón)

CURIOSOS CASOS, COSAS CURIOSAS

CARL SAGAN

Carl Sagan, el famoso científico y escritor, nunca pidió a nadie que rezara por él, aunque al final de su enfermedad mucha gente lo hizo. Elevaron sus oraciones (si es que las oraciones se elevan) al cielo que Sagan nunca había visto en todos sus años de escrutar el firmamento, y fueron oídas (si es que las oraciones son oídas) por el Dios que Sagan nunca invocó. Y Dios (si es que existe) dejó morir a Sagan, a finales de 1996. Pero murió en lo que para él equivalía a un estado de gracia: resistiéndose a la única tentación a la que casi todo el mundo se rinde al final, la tentación de creer. Sagan tenía un desdén particular por las oraciones petitorias. *¿Necesita Dios que se le recuerde que alguien está enfermo?*, preguntaba Sagan. *¿O lo sabe, pero no quiere ha-*

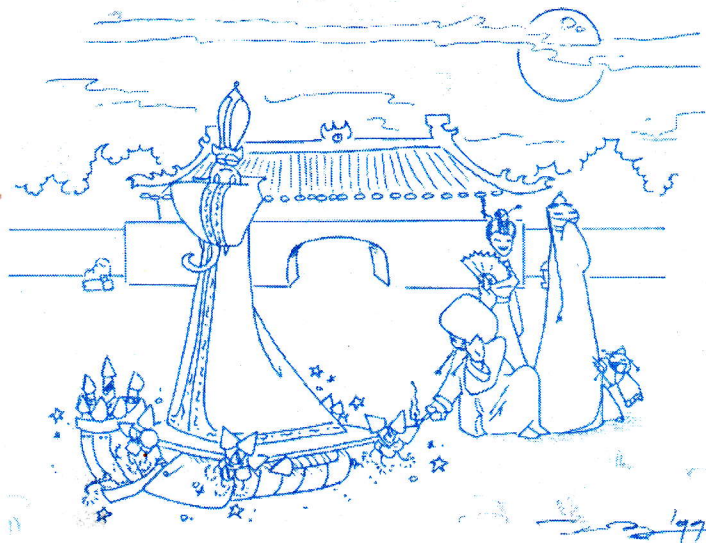
cer nada sobre el asunto hasta que alguien se lo pida? Por supuesto, muchos creyentes han luchado con estas mismas preguntas.

Más tarde contrajo neumonía, como efecto secundario de su tratamiento con radiaciones. Sus amigos rezaron con más fuerza, pero Sagan nunca flaqueó en su agnosticismo. *«No hubo conversión en su lecho de muerte»*, dijo su mujer, Ann Druyan. *«Ni llamadas a Dios, ni esperanza en otra vida, ni pretensión de que él y yo, inseparables durante 20 años, no nos estábamos diciendo adiós para siempre»*. ¿No quería creer?, le preguntaron. *«Carl nunca quiso creer»*, respondió ella furiosamente. **«Quería saber»**.

News Week, 31-03-1997

HUAN-HU (1500 aprox.)

Cuenta la historia que, buscando aplicación para los cohetes, en Extremo Oriente, un rico mandarín llamado Huan-hu -indiscutido precursor en este campo- intentó usarlos directamente para mover una «máquina volante». La misma consistía en una caja provista de una vela en forma de aquilón y de 47 cohetes destinados a facilitar el despegue.



Bueno pues, los buenos criados obedecieron la orden de encender simultáneamente todos los cohetes el día del experimento; y el ingenioso dignatario voló.

Comentan que aun no lo han encontrado todo, pero sin duda que la física incentivó a muchos espíritus osados a encontrar caminos para la exploración espacial.

*Fuente: Peter Kolosimo - Ombre Sulle Stelle (1966)
Dibujo: P.Baldriz*

CÓMO ADAPTAR EL SENSOR DE BARRERA LUMINOSA ENOSA A LA INTERFACE CASSY

Edgar Gómez y Mariel Mayero

Ayudantes Preparadores - Laboratorio de Física del Liceo N° 1 de Flores

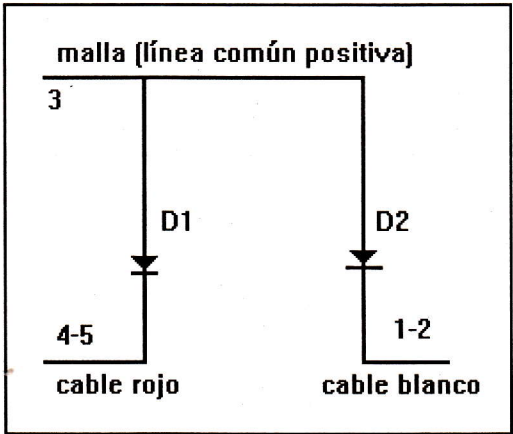
Es sabido por los profesores de Física que los Laboratorios cuentan con interfaces Cassy que tienen entradas «TIMER», E y F, donde se pueden adaptar sensores de barrera luminosa y que en las cajas de mecánica ENOSA, hay sensores de barrera para los cronómetros.

Es interesante poder adaptar estos sensores a la interface CASSY.

Para comenzar con la adaptación debemos saber:

1º. Cómo está armado el sensor de barrera luminosa ENOSA

Está formado por un diodo emisor infrarrojo D1 y un diodo receptor D2 según el siguiente esquema:



El diodo D1, es alimentado directamente a través de las clavijas 3 y 4-5, emitiendo una radiación infrarroja, que será detectada

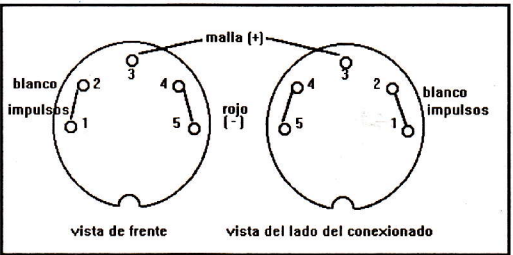
Nota de Redacción:

El conexionado que sigue constituye una alternativa a las que ya se conocen y han circulado anteriormente.

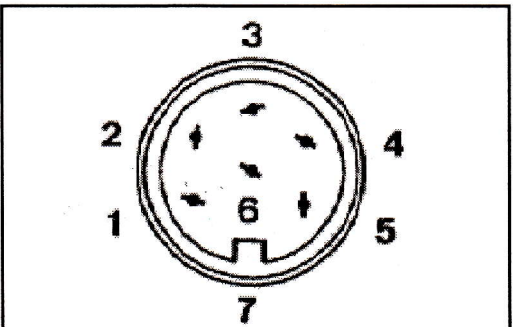
por el diodo D2, que activa el cronómetro a través de las clavijas 1-2.

2º. Ficha usada por el sensor de barrera luminosa ENOSA

La disposición del conexionado en la ficha Din es la siguiente:



3º. ficha usada en la interface CASSY en sus entradas E y F



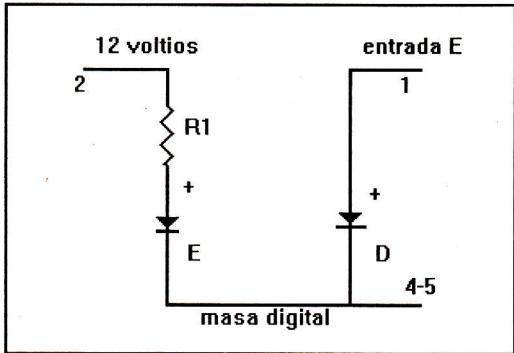
CLAVIJAS	CONEXIONADO
Nº 1	Entrada de impulsos E/F
Nº 2	+ 12 v con respecto a clavijas 4 y 5
Nº 3, 6 y 7	Sin conexión.
Nº 4 y 5	Masa digital

El conector está visto desde la interface Cassy.

4º. Disposición eléctrica de un sensor de barrera luminosa que se conecte a la interface CASSY

Entre las clavijas 2 y 4-5 se deberá conectar un diodo emisor protegido por una resistencia R1 comprendida entre 1 y 10.000 ohmios.

Entre las clavijas 1 y 4-5 se deberá colocar un diodo detector, que cortocircuite la entrada E con masa digital.



Tener en cuenta que la masa digital es negativa.

5º. Conexión de adaptación

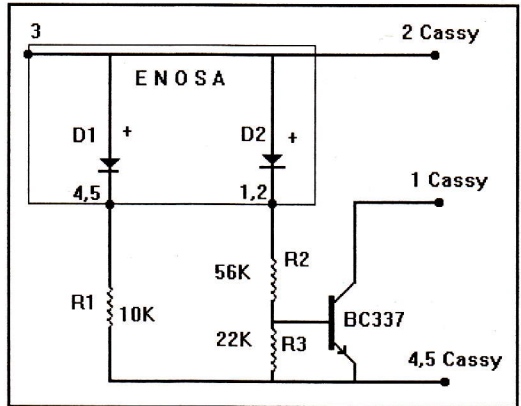
El principal inconveniente está en que, para el sensor Enosa, la línea común es positiva y para la interface Cassy, la línea común es negativa, por lo tanto debemos

preparar el dispositivo teniendo en cuenta este punto.

El diodo Emisor D1 se alimentará con 12 V de la interface, por lo que sacamos una conexión para la clavija 2 de la ficha Din del Cassy, pero deberá intercalarse una resistencia R1 de protección que hemos calculado de 10 Kohm, completando el circuito en las clavijas 4-5 de la misma ficha.

El valor de la resistencia R1 determina la intensidad de la radiación infrarroja que emite D1.

Cuando el diodo D2 conduce activa la base del transistor BC337, poniéndolo en conducción con lo que cortocircuita las clavijas 1 (entradas E-F) y 4-5 (masa digital), de la interface Cassy.

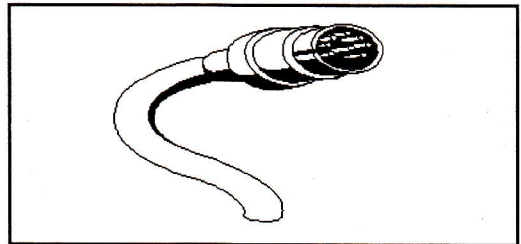


SENSOR DE BARRERA LUMINOSA

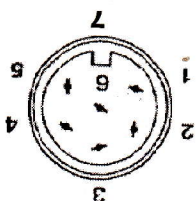
Si observamos la interface, vemos que sobre las entradas normales E y F, hay dos clavijeros múltiples, con las mismas letras.

Las entradas E y F están eléctricamente unidas a los clavijeros múltiples (marcados E y F), a los que se puede conectar sensores de barrera luminosa.

En dichas clavijas entra una ficha din, (ver figura).



Las clavijas del conector, se distribuyen de la siguiente manera:



Clavija n11: destinada a la entrada de impulsos E/F.

Clavija n12: +12 voltios, con respecto a las clavijas 4 y 5.

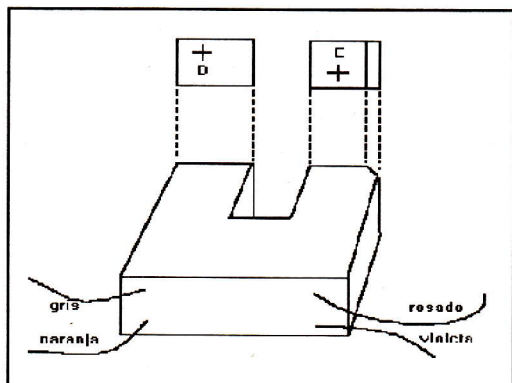
Clavijas 4 y 5: masa digital

Clavijas 3, 6 y 7: no están ocupadas

Aprovechando estos clavijeros, trataremos de conectar allí un optocaptor que está compuesto por un diodo emisor luminoso y un diodo detector.

El sensor (optocaptor) utilizado puede ser una llave óptica tipo CNY 37, que se puede adquirir en los comercios de electrónica.

Físicamente el sensor (optocaptor), a utilizar se nos presenta según el esquema.



Si alimentamos el diodo emisor entre las clavijas 2 y 4 (12 voltios), a través de una resistencia (de aproximadamente 1000 ohmios) y conectamos el detector entre las clavijas 1 y 5, tenemos la posibilidad de

activar las entradas E y F utilizando una barrera luminosa como la indicada en las páginas anteriores.

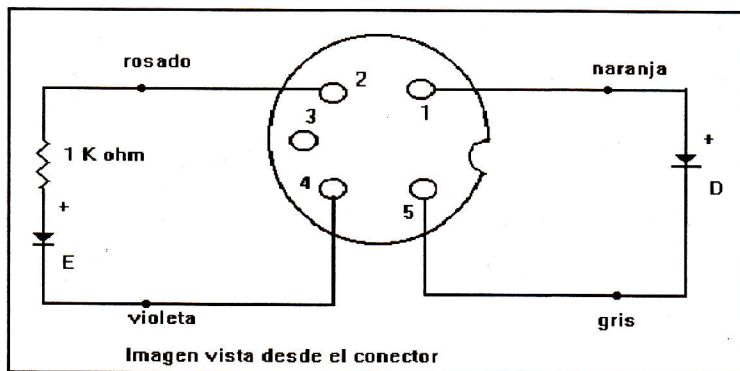
El cátodo del diodo emisor debe quedar unido a la clavija 4 y el ánodo a través de una resistencia, al conector 2. La resistencia que quedará como protectora debe ser tal que la intensidad de corriente no alcance a superar la intensidad permitida por el emisor. Los valores usados oscilan en los 1000 ohmios. El diodo detector no necesita protector porque la interfaz cassy, internamente intercala una resistencia de protección.

Todo este dispositivo, se coloca en un tubo, que puede ser el envase de un marcador. La conexión a la ficha din, se hace con un cable que tenga cuatro líneas conectoras y una malla de blindaje, la que será conectada a masa digital (clavijas 4 y 5).

Después de armado el dispositivo, hay que probar el funcionamiento. Luego de configurar el programa, se interpone un papel entre el diodo emisor y el receptor, debiendo obtener medidas de dt, si se entra y saca el papel sucesivamente.

Si no detecta los inicios y paradas puede ser que no esté emitiendo, por lo que será necesario verificar el valor de R y si es necesario, disminuir su valor.

Si todo funciona correctamente ya tiene un nuevo dispositivo para el estudio de movimientos, ampliando las cualidades de la interface CASSY.





Lamentamos comunicar que el día 1º de noviembre de 1999 falleció el profesor Luis Nin, presidente de APFA (Asociación de Profesores de Física de Argentina). Nuestras condolencias a sus familiares y amigos por tan lamentable pérdida.

INFORMACIÓN SOBRE CONGRESOS

V SIEF

V Simposio de Investigadores en Educación en Física

18, 19 y 20 de octubre de 2000

Santa Fe, Argentina

El Simposio se realizará en la Facultad de Formación Docente en Ciencias de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, durante los días 18, 19 y 20 del mes de octubre del año 2000.

Los trabajos propuestos para su presentación en el Simposio deberán enviarse antes del 31 de mayo de 2000

Organizan:

- GIDEAF - Departamento de Física - Facultad de Ingeniería Química - UNL
- APFA - Secretaría Local Santa Fe.
- Departamento de Ciencias Naturales - Facultad de Formación Docente en Ciencias - UNL

Objetivos:

1. Ofrecer un ámbito de comunicación, debate y reflexión para la comunidad de los investigadores en Educación en Física.
2. Elaborar recomendaciones sobre temas de interés en el ámbito de la Investigación en Educación en Ciencias.

Costos (hasta el 31 de mayo de 2000):

Socios de APFA	\$ 50
No socios de APFA	\$ 100
Estudiantes socios	\$ 25
Estudiantes no socios	\$ 50

(después del 31 de mayo de 2000):

Socios de APFA	\$ 70
No socios de APFA	\$ 120
Estudiantes socios	\$ 35
Estudiantes no socios	\$ 60

EFING'2000

IV taller internacional sobre la Enseñanza de la Física en la Ingeniería I taller iberoamericano de la Física Aplicada en la Ingeniería

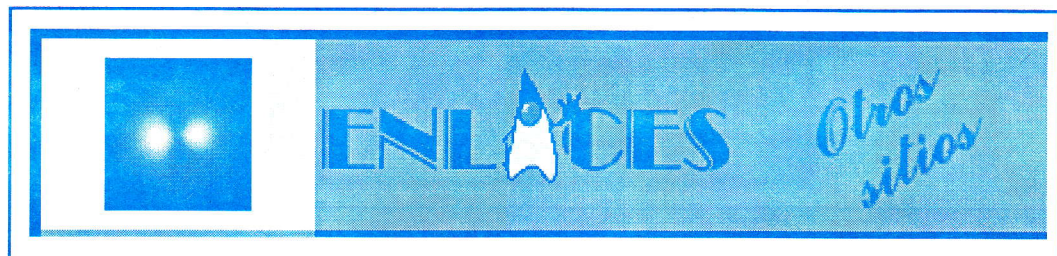
(Del 6 al 9 de junio del 2000)

El Departamento de Física del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, tiene el placer de invitar a los profesores de Física e investigadores en el campo de la Física Aplicada en la Ingeniería, al IV Taller Internacional sobre la Enseñanza de la Física en la Ingeniería y al I Taller Iberoamericano de la Física Aplicada en la Ingeniería.

(Continúa en página 14)

PRIMERA RECOMENDACIÓN

La dirección: <http://members.es.tripod.de/pefeco/enlaces.htm>



Se recogen enlaces a sitios que presentan temas desarrollados con applets, así como sitios que contienen applets individuales. También se añade una relación de sitios que presentan más enlaces y sitios con recursos multimedia para Física.

Entre otros se destacan: temas de Física moderna desarrollados a un nivel relativamente elemental; un trabajo de aprendizaje interactivo sobre todo lo relativo al péndulo; un gran curso sobre toda la mecánica clásica con applets muy sencillos que explican y complementan los conceptos; Software de Física gratuito; curso sobre mecánica

newtoniana con applets que complementan la explicación (nivel bachillerato); movimiento con fuerzas centrales; gran número de applets de mecánica, electricidad y magnetismo, de gravitación y sobre el sistema solar, reglas de Kirchhoff, astrofísica, energía, mecánica y termodinámica, animaciones para Física, proyectiles, ondas, óptica y polarización, gravitación, gases y átomos, leyes de Kepler, recursos multimedia para Física, suma y resta con vectores; con muchos etcéteras; como para que no haya más nada que recomendar en esta sección web.

SEGUNDA RECOMENDACIÓN

La dirección: <http://www.geocities.com/Aathens/Delphi/8951/>



Un aporte de J. Trujillo (I. B. Joaquín Artilles) para facilitar el estudio en bachillerato y preuniversitario en temas básicos como: Vectores y Cinemática; Dinámica del punto material; Trabajo y Energía; Sistemas de puntos; Sólido rígido; Campos **G.** y **E.**;

Corriente eléctrica; Campo **B.**; Ondas; Naturaleza de la luz y otros etcéteras. Incluye Links a otros sitios de interés, que pueden ayudarte y pruebas de selectividad para Universidades e Institutos terciarios que dan una idea de lo que se hace por otras latitudes.

TERCERA RECOMENDACIÓN

La dirección: <http://www.ctv.es/users/agros/hispafis.htm>

Páginas de Física en Castellano



Una importante colección de links a sitios de Física en Castellano, dividida en secciones tales como: Cuestiones; Museos; Biblioteca; Cursos; Interesantes y Curiosidades. Incluye links a la Universidad de Valladolid (Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía); Departamento de Física del IES Luis Vélez de Guevara de Écija; Olimpiada de Física (México); Museo Hispano de Ciencia y Tecnología; Museo de Ciencia de Barcelona; Parque de las Ciencias de Granada; Casa de las Ciencias de La Coruña; Planetario de Madrid;

Planetario de Pamplona; Museos extranjeros; Facultad de Ciencias Físicas de la U. Complutense; Tribuna de Astronomía; apuntes y resolución de problemas de un curso de Termodinámica; Partículas elementales (interacciones fundamentales y el modelo estándar); Cosmología y astrofísica; EFE Estudiantes de Física y Electrónica; Cómo ayudar a sus hijos a aprender ciencia (USA); página del conocimiento y del saber (Historia de las cosas), y muchas otras que a su vez contienen nuevos links a páginas igualmente interesantes.

SOLUCIONES PRÁCTICAS

Les aportamos otra solución encontrada por el laboratorio de Física del Liceo N° 1 de Flores, como regla "claro-oscuro" para la CASSY, o sea como barrera luminosa complemeantando a las anteriores

Se trata de lo siguiente: aprovechando el calado que realiza la máquina de encuadernar, se corta una tira como la que muestra la fotografía, uniendo tantas como sea necesario.



Debe tenerse en cuenta:

- 1º) Que esta cinta así preparada sirve solamente para los sensores preparados con llaves ópticas CNY 37.
- 2º) Que las zonas oscuras son todas iguales pero diferentes de las zonas claras, lo que debe tenerse en cuenta en la ecuación utilizada en los distintos experimentos.

Aporte: Liceo N° 1 de Flores - Ayudantes Preparadores de Física: **Marcel Mayero** y **Edgar Gómez**

APLICACIONES DEL LÁSER

Pablo Garategui

I.P.A. (Instituto de Profesores Artigas)

Continuando con los aportes sobre aplicaciones prácticas del láser sugerimos una forma alternativa, de realizar una práctica clásica, y que en las primeras instancias es la que todo el mundo se plantea cuando se enfrenta a usarlo en el laboratorio.

Por supuesto que me refiero a los experimentos sobre Interferencia y Difracción.

Disponiendo de una fuente de luz coherente, basta con el interceptar el haz con rendijas y/o redes de refracción, y sobre una pantalla ubicada en la distancia adecuada, aparecerán los patrones correspondientes. Con la distancia Red-Pantalla, las características de la red, conocida la longitud de la onda del láser (632,8 nm) y midiendo las distancias de las rayas de la luz sobre la pantalla, se pueden comprobar y/o verificar varios parámetros.

Ahora bien, años atrás en el Liceo Miranda, los patrones los proyectamos sobre papel fotográfico, que luego de revelado nos proporcionó, al igual que las fotos estroboscópicas en 5º año, una alternativa y ampliamente reproducible forma de hacer la práctica.

Claro, la obtención de las fotos es un procedimiento algo complicado debiéndose trabajar en completa oscuridad, y no es lo más recomendable hacerlo en presencia de los alumnos.

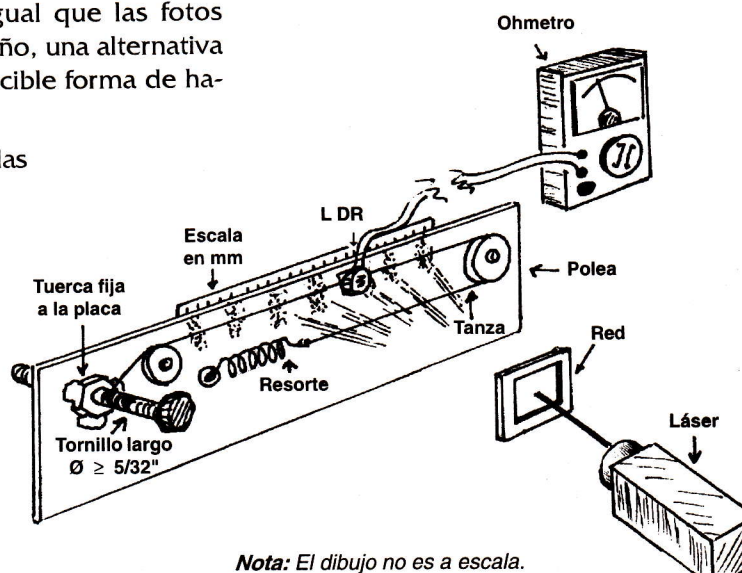
Pero hay otra forma de hacerlo, y es midiendo a lo largo del patrón de líneas que se forma, la intensidad de

la luz ya sea con un fotómetro de los usados en fotografía (habría que calibrarlo previamente) ó con un LDR (resistencia variable con la luz), que haríamos deslizar por algún procedimiento mecánico (sugiero uno en la figura), a lo largo de la pantalla ó de una ranura de la misma.

El LDR, se conecta a una escala adecuada del óhmetro del tester, y la resistencia medida es proporcional a la intensidad de luz recibida sobre la superficie sensible, si ésta es una pequeña ranura, podremos medir con suficiente precisión, las distancias entre c/u de los órdenes del patrón.

Espero que ésta sugerencia les pueda resultar de utilidad.

Para después de las vacaciones, en el próximo número, prometo un artículo sobre varios modelos de sensores ópticos, sencillos de fabricar.



Nota: El dibujo no es a escala.

(Continuación de pág. 10)

Objetivos generales:

1. Analizar el papel que desempeña la física en la formación de los ingenieros y su relación con las ciencias básicas (en especial las matemáticas) y las ciencias de la ingeniería.
2. Debatar y divulgar los trabajos científicos más avanzados en el campo de la enseñanza de la Física y las investigaciones en Física Aplicada, en la ingeniería.
3. Propiciar la concertación de proyectos conjuntos de investigación y desarrollo entre los participantes, así como la firma de cartas de intención y convenios entre las instituciones representadas en el evento.
4. Promover el intercambio de experiencias entre los profesores de Física y de matemáticas en ingeniería.

Los interesados en cursos sobre otros temas específicos dentro de las temáticas del evento, deben hacérselo saber al comité organizador que analizará con los especialistas la posibilidad de incluirlos en la programación. La fecha límite es el 15 de Abril del 2000 y se comunicará antes del 15 de Mayo del 2000.

Las **cuotas de inscripción** para las diferentes categorías serán:

- Delegados	200 USD
- Acompañantes	100 USD

Aquellos delegados que hayan participado en la versión anterior del evento (EFING'98) recibirán un descuento del 20% en su cuota de inscripción.

Los que acrediten su condición de estudiantes de pregrado recibirán un descuento del 50 % en la cuota de inscripción.

Podrá obtener una mejor información visitando nuestro sitio WEB en INTERNET, en la siguiente dirección:

<http://www.ispjae.edu.cu/eventos/efing2000/index.htm>

VII ICPE

Vii international Conference on Physics Education

**Porto Alegre (Canela), Brazil
July - 3-7, 2000**

The Interamerican Council for Conferences on Physics Education (ICCPE) announces that the VII Interamerican Conference on Physics Education will be held in Porto Alegre (Canela), Brazil, in July 3-7, 2000, sponsored by the Institute of Physics of the Federal University of Rio Grande do Sul, by the International Commission on Physics Education of the International Union of Pure and Applied Physics, and by the Brazilian Society of Physics.

The main theme of the conference is the Preparation of Physics Majors and Physics Teachers in Contemporary Society.

Conference activities will include plenary, paper, and poster sessions as well as short workshops, discussion groups, symposia and roundtables.

Deadline for papers & posters: December 15, 1999.

Extended abstracts of no less than one page and no more than two pages, including references, should be submitted by e-mail to iacpe7@if.ufrgs.br or to secteor@if.ufrgs.br, in English, Spanish or Portuguese according to the format suggested further on.

Costs:

Registration fee US\$ 100.00, covering conference materials and

Proceedings. Conference fee US\$ 350.00, covering all meals and hotel

Accommodation (double occupancy; US\$ 525.00 single).

**Hay más información
de estas actividades
en el local de la APFU.**

EL MODELO DEL ELECTROMAGNETISMO CLÁSICO: AMPÈRE-FARADAY-MAXWELL

Prof. Mario Guerra
Consultor de UNESCO

La construcción de un modelo conexo que describiera la fenomenología de las cargas eléctricas, recorrió un largo camino. En esa ciclópea obra, hay tres nombres que destacan claramente y que constituyen la base de un cambio conceptual y de consecuencias tecnológicas que modificaron nuestra visión del mundo físico.

Introducción

El desarrollo del Electromagnetismo, durante el siglo XIX, cuenta con tres figuras fundamentales: André Marie **Ampère** (1775-1836), Michael **Faraday** (1791-1867) y James **Clerck Maxwell** (1831-1879). No son los únicos nombres de importancia en la elaboración del modelo. Posteriormente a **Ampère**, debemos señalar la incidencia de figuras tales como: Franz **Neumann**, Wilhelm **Weber** y Hermann von **Helmholtz**. El presente artículo es una visión panorámica de este extraordinario proceso de construcción del modelo electromagnético, cuyas aplicaciones tecnológicas revolucionó la humanidad y que tuvo entre sus consecuencias más excepcionales, el surgimiento de uno de los paradigmas de la Física del siglo XX: la Relatividad einsteiniana. En los comienzos del siglo XIX, la gran teoría física era la Mecánica Clásica, elaborada a partir de las concepciones de tres gigantes de la Ciencia: **Newton**, **Euler** y **Lagrange**.

En particular, la construcción del modelo lagrangiano, llevó a un límite de perfección matemática y generalidad las conclusiones de Newton y Euler, que se transformó en

«el modelo «hacia la cual debían «tender» todas las teorías físicas en cuanto a su estructura. El mecanicismo era, por así decirlo, una meta formal.

Los conocimientos acumulados en el área de la electricidad y el magnetismo, se encontraban en una situación francamente inferior. Se trataba de un conocimiento disperso, sin orden unificado, con débiles lazos de conexión, como para constituir un modelo físico. La tarea de **Ampère**, **Faraday** y **Maxwell**, logra esa unificación fenomenológica, amplía el panorama de conocimientos y plantea nuevos e inusitados problemas, que sin tener pleno conocimiento, conducirían posteriormente al surgimiento de «una nueva Física», de alcances no previstos. ¿Cómo se elaboró esa estructura del modelo electromagnético? ¿Cuáles fueron los principales aportes de cada uno de ellos a esta construcción?. De esto trata lo que sigue.



H. C. Oersted

André Marie Ampère

Los comienzos

El 18 de setiembre de 1820, en la sesión de la Academie des Sciences que siguió a la publicación de los trabajos experimentales de Hans Christian Oersted (1777-1851), **Ampère** publicó sus primeras observaciones acerca de «las acciones magnéticas de las corrientes». Según sus observaciones, las corrientes eléctricas, se atraían o repelían, según leyes que él mismo estableció. Con sus conclusiones, **Ampère** se oponía a una idea reinante, según la cual, todo era debido a la existencia de «fluidos magnéticos». Las conclusiones experimentales de **Ampère**, se publicaron ininterrumpidamente hasta 1827, repartidas en diversas memorias. En ellas se incluyen experimentos y cálculos, que justificaban sus conclusiones y leyes.

La primera de estas memorias es de 1820. En ella se incluyen diversos montajes sencillos y sensibles, que eran utilizados, básicamente, en medidas obtenidas por intermedio de equilibrios y «métodos de cero». Hoy, juzgaríamos varias de esas medidas, como esencialmente cualitativas o «groseras».

En esta primera memoria, **Ampère** establece su teoría inicial acerca del «magnetismo en la materia», que según sus conclusiones debe originarse en corrientes elementales, insertas en la propia sustancia. El modelo de **Ampère** tiene un inconveniente, que en su tiempo era insalvable: violaba el Principio de Conservación de la Energía. Pero además, la natura-



André Marie Ampère

leza magnética de la materia **no** es un efecto «clásico», sino eminentemente cuántico.

Parece claro, a partir de sus escritos, que **Ampère** no disponía de un concepto general sobre la energía. Esta idea, sin embargo, la tenían en esos tiempos Priestley, Davy y Cavendish en Inglaterra. Posteriormente, abandona la idea de las corrientes en la materia y la sustituye por la de «corrientes moleculares», según una idea de Agustín **Fresnel**, a quien el propio **Ampère** reconoce como inventor de la misma. Esas ideas de **Ampère**, ocupan todo el siglo XIX y llegan hasta nuestro siglo. La concepción cuantizada del magnetismo, es recién reconocida en forma completa por Pablo **Erhenfest**, que reconoce a esas corrientes elementales como incompatibles con la Mecánica Clásica del continuo.

Ya en tiempos de **Ampère**, la hipótesis de las corrientes elementales tenía sus detractores. Entre los más conspicuos, cabe señalar a dos: **Davy**, en Inglaterra y la pareja **Biot-Savart** en Francia. Para estos físicos, el magnetismo era explicable estrictamente dentro de un marco newtoniano, en base a fluidos magnéticos en reposo contenidos en los conductores, y a la ley de Coulomb. Pero estas opiniones tenían un grave inconveniente: **no lograban explicar el carácter transversal de las acciones magnéticas**.

Hacia 1827, **Ampère** desarrolla una síntesis notable, en una memoria titulada «Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos exclusivamente derivada de la experiencia». El trabajo de **Ampère**, es una construcción de carácter lógico muy notable, basado en interacciones newtonianas entre elementos de corriente, dependientes de la distancia y de los ángulos que forman esos elementos. La teoría elaborada en base al concepto de «elemento de corriente», **no** tiene significado objetivo, ya que las corrientes **son cerradas**, y el concepto de «elemento», violenta esa idea. Mu-

cho tiempo después, **Helmholtz** intentara un modelo basado en «corrientes abiertas», que no condujo a resultados importantes. Este aspecto, no escapaba a **Ampère**, pero la integración de las leyes diferenciales establecidas, describen en forma muy precisa los fenómenos.

Establece, **cuatro principios** fundamentales y de extraordinaria sencillez:

Principio 1: «Las acciones de las corrientes se invierten, si se invierte el sentido de las mismas».

Principio 2: «Las acciones ejercidas por dos conductores fijos, uno recto y otro curvo, sobre un tercer conductor móvil, es la misma, si están situados a la misma distancia».

Principio 3: «La acción de un circuito cerrado o de varios circuitos cerrados, sobre un elemento infinitesimal de corriente, es perpendicular a este elemento».

Principio 4: «A intensidades constantes, las interacciones de dos elementos de corriente, no cambian cuando se modifica según una misma razón sus dimensiones lineales y su distancia».

Existe un hecho muy notable registrado en 1821: **Ampère** se propone un experimento, cuyo objetivo era saber **si puede producirse una corriente eléctrica por influencia de otra corriente eléctrica**. Muchos físicos de esa época, trataron de resolver este problema, sin éxito. En 1822, **Ampère** y el físico ginebrino **Auguste de la Rive**, observaron la **existencia de corrientes inducidas**. El dispositivo utilizado, fue el siguiente: un cuadro de cobre, circular, se suspendía por un hilo en el interior y en el plano de una bobina circular plana, por la que podía hacerse pasar una corriente. El conjunto estaba colocado en el entrehierro de un imán. Cuando se establecía una corriente en la bobina, el cuadro era atraído por el imán. Sin embargo, ni **Ampère**, ni **de la Rive**, interpretaron el fenómeno. Es probable, que **Ampère** espe-

rara que se produjeran corrientes estacionarias y **no** corrientes variables, lo cual lo llevó a no considerar relevante la observación realizada. Cabe señalar que **Faraday** al comienzo de sus investigaciones, también tenía la misma expectativa. Obtuvo diversos fracasos.

La línea de investigación de **Ampère**, en base a los elementos de corriente, es continuada posteriormente por otros investigadores. Se trataba de teorías basadas en el concepto de «acción a distancia», con una clara influencia de la newtoniana.

Entre estos investigadores, es necesario señalar que en 1845, **Grassmann** observó, que para explicar las acciones transversales del magnetismo, en base al tercer principio de **Ampère** y a la interacción newtoniana **no** es necesario. Sostiene que este Principio de la Mecánica no es «extensible», ni necesario, para explicar los hechos.

Mucho más importante, son dos memorias debidas a Franz **Neumann** de 1845 y 1848, por las que halla una teoría matemática para la inducción. Para ello, se basa en una «regla cualitativa» debida a **Lenz** en 1834. Según esta regla, las corrientes inducidas se crean, en el caso que existe movimiento, por el trabajo ejercido **contra fuerzas electromagnéticas**.

Otro investigador de importancia fue Wilhelm **Weber**, un notable experimenta-

dor. Sus obras más importantes están en el intervalo de 1840 a 1878. Se había orientado hacia el estudio del electromagnetismo por recomendaciones de **Gauss**. En 1834, construyó el **primer**



W. Weber

telégrafo eléctrico. Pero uno de sus trabajos más importantes, se refirió a la idea de condensar en una sola expresión de interacción entre partículas cargadas en movimiento. De este modo, lograba fusionar los fenómenos de la Electroestática y la Electrodinámica de **Ampère**. Su expresión es esta:

$$F = [QQ'/r^2] \cdot [1 - (dr/dt)^2/2c^2 + r(d^2r/dt^2)/c^2]$$

El último término, es de **importancia fundamental**, pues esta relacionado con la radiación que genera una carga acelerada. El primer sumando es la «fuerza de Coulomb»; los dos restantes tienen que ver con «los efectos de inducción».

Michel Faraday

Los descubrimientos fundamentales

Esquemáticamente, la historia de Faraday se puede plantear así: hijo de un herrero, se inicia laboralmente como encuadernador; comienza a asistir a las conferencias de la Royal Society en 1810; culmina su primer aprendizaje en 1812; se desempeña como laboratorista ayudante de Sir Humphry Davy en 1819; realiza su primera publicación de Química en 1817 y la primera de Física en 1821; es sucesor de Davy en 1827 y posteriormente, se le síndica como uno de los mayores físicos de todos los tiempos. Publica una serie de trabajos, que se extienden hasta 1855, bajo el nombre de «Investigaciones Experimentales de Electricidad».

Realiza también trabajos de otra índole, entre los que cabe señalar: la licuefacción del cloro (1823) y otros gases, el descubrimiento del benceno (1824),



Michel Faraday

la construcción del vidrio pesado de borosilicato de plomo (entre 1825-1829).

En 1821, ensaya un experimento fundamental que demuestra inequívocamente que un «polo magnético puede girar indefinidamente alrededor de una corriente eléctrica y que recíprocamente, una porción de circuito eléctrico móvil, puede, gracias a un contacto deslizante, girar alrededor de un polo». El dispositivo era muy simple: un recipiente lleno de mercurio, un imán sumergido a medias, de modo que solamente un polo emergiera, mientras que el otro estaba fijo en el eje del aparato. La corriente entraba por la parte inferior del aparato y salía por el alambre sumergido en el mercurio que oficiaba de eje. En esta situación, el polo ubicado en el aire, giraba alrededor del eje vertical. Asimismo, si el alambre se hallaba inclinado, barriendo la superficie del mercurio, podía girar alrededor del imán. Faraday había construido el primer **motor electromagnético**.

En 1822, **Barlow**, construye su rueda dentada giratoria, activada por una corriente que circula

desde su centro a la periferia. Estos resultados que fueron puestos en conocimiento de **Ampère**, pueden, sin embargo, ser explicados por la ley de Biot y Savart.

La búsqueda de «corrientes inducidas», Faraday las inicia en 1824. En este momento, y también en 1825 y 1828, se suman diversos fracasos, que se agregan a los de sus contemporáneos. Los experimentos de **Ampère** y de **la Rive** del año 1822, habían pasado inadvertidos.

En 1824, **Arago**, realiza una observación importante: las oscilaciones de una aguja magnética, suspendida de un hilo que oscila sobre un disco metálico se **amortiguan**. Intentando comprender el fenómeno, **Arago** planteó el «fenómeno recíproco»: dejó la brújula quieta e hizo girar el disco. Comprobó que la aguja giraba siguiendo la rotación del disco. A estos fenómenos,

Arago los llamó «magnetismo de rotación». Durante mucho tiempo, estos fenómenos **no fueron interpretados**. Recién en agosto de 1831, **Faraday**, logró dar una explicación física, en base a su descubrimiento del mecanismo de las corrientes inducidas. Sus resultados aparecen publicados el 24 de noviembre de 1831.

El primer experimento de **Faraday**, referido a las corrientes inducidas, fue la detección de las mismas en un galvanómetro, cuando se cerraba una llave en un circuito vecino. Reconoció allí, que **se trataba de un fenómeno transitorio dependiente del tiempo**. Seguidamente, se planteó un experimento donde se generaba inducción por cierre y apertura de una llave en un circuito, donde una bobina estaba enrollada en un imán; por acercamiento de un imán a una bobina cerrada sobre si misma, etc. Estos experimentos, se llevan a cabo entre el 24 de setiembre y el 17 de octubre. El 28 de octubre, **Faraday** se enfrenta al fenómeno de **Arago** del «magnetismo rotatorio». Para ello, construye una rueda de cobre **no dentada**, situada entre los polos de un imán en herradura. Dos alambres, uno que parte del centro de la rueda y otro en contacto con la periferia, se llevan a un galvanómetro. Si la rueda se coloca en rotación, el galvanómetro acusa pasaje de corriente.

Faraday había construido el **primer generador de corriente continua**, que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Ya se sabía, que ese mismo dispositivo, podía funcionar como **motor**, puesto que era reversible. El primer generador de alterna se construye en 1832 (**dal Negro**) y se perfecciona en 1833 (**Ritchie**) y en 1836 (**Clarke**).

La simetría descubierta por Faraday, es la base de dos de las **Ecuaciones de Maxwell**.

Hacia 1832, **Faraday** logra describir cuantitativamente el fenómeno: las corrientes inducidas se originan en la aparición de

una «fuerza electromotriz inducida», que no depende de los circuitos ni de su naturaleza. Pero además, establece un hecho fundamental: **El fenómeno depende del movimiento relativo del conductor respecto del imán inductor**. Se ha sentado aquí, el origen lejano del Segundo Principio de la Relatividad de Einstein. El enunciado **completo, claro, preciso** de la ley de Inducción, aparecerá en 1852 en la serie XXVIII de las «Investigaciones Experimentales». Para hacer «inteligible» la ley, **Faraday** piensa en términos de «líneas de fuerza». A pesar de esto, el concepto de fuerza electromotriz, que maneja **Faraday**, no es preciso. Tal vez, esa sea la razón por la cual, dicha denominación, **no** aparece en esta memoria de 1852.

Es necesario señalar, que en 1834, después de investigar algunas propiedades físicas de la electrólisis, **Faraday** retoma sus investigaciones del magnetismo y **descubre**

la autoinducción, adelantándose a los resultados análogos que obtuvo el físico norteamericano **Joseph Henry** (1797-1878), que comprobó el fenómeno en 1835.



Joseph Henry

James Clerck Maxwell

La culminación del modelo

Maxwell, nació en 1831 y cuando tenía 24 años de edad, publicó su primer trabajo: «Sobre las Líneas de Fuerza de Faraday», de clara inspiración en la metodología de Faraday y otros trabajos realizados por William **Thompson** en 1845 y 1847. Estos últimos, ilustraban pictóricamente las ideas de Faraday.

Era el último descendiente de una acomodada familia escocesa, quien había aña-

dido el apellido «Maxwell», para mantener su derecho sobre unas tierras adquiridas por sus antecesores. Su primer trabajo científico, realizado a la edad de 14 años, referido a la «construcción de óvalos de Descartes», es leído por él mismo ante la Real Sociedad de Edimburgo en 1846. Se trata de una memoria geométrica, donde generaliza los procedimientos de trazado de elipses, aplicándolo a óvalos.

En una primera etapa, que podemos ubicar hacia 1855, Maxwell observa que las relaciones válidas para el campo electrostático, son semejantes a las que rigen el comportamiento de los fluidos irrotacionales incompresibles. El concepto de «fuente» y «sumidero», se traslada al de «carga puntual». Las «fuentes», son las cargas «positivas» y los «sumideros», son las cargas «negativas».

La ley de **Ampère**, para corrientes estacionarias, es equivalente a la ley de Biot y Savart, con una diferencia esencial: la relación de **Ampère** es una ecuación diferencial y la ley de Biot y Savart, es una típica acción a distancia. Con ello, Maxwell establece el paso de una teoría newtoniana a otra, donde puede existir una **propagación en el espacio**.

En la segunda parte de su memoria, Maxwell aborda los problemas de la inducción. Retoma el concepto de «potencial vector» (que Maxwell llama curiosamente **intensidad electrotónica**), cuyo rotacional es el vector campo magnético. Con ello, el flujo de este último a través de una superficie limitada por un contorno, queda unívocamente determinado. De aquí se desprende la ley de Faraday-Lenz-Neumann de este modo: «La fuerza electromotriz (de inducción), en todo elemento de conductor, se mide, en magnitud y dirección, por la velocidad instantánea de la variación de la '**intensidad electrotónica**' (es decir, del potencial vector), en ese elemento». Ésta es la segunda ecuación de Maxwell.

Entre 1861 y 1862, Maxwell publica un segundo trabajo que titula: «Sobre las Líneas de Fuerza Físicas». Declara, el objetivo es



James Clerk Maxwell

ahora describir los fenómenos magnéticos «desde un punto de vista mecánico». Para ello, **se apoya en el concepto de éter**. Lo concibe como un conjunto de células, en estado de rotación en el campo magnético, **en el mismo sentido**, alrededor de ejes paralelos a las líneas de fuerza. El modelo elaborado, conduce a esta importante conclusión: **si el campo eléctrico que actúa depende del tiempo, las células del dieléctrico (incluso el vacío), deben cambiar, con lo cual, debe aparecer una corriente de desplazamiento**. Esta «corriente de desplazamiento» «debe producir efectos análogos a los que producen las «corrientes de conducción». En particular, deben producir campos magnéticos. Se trata de una teoría de «torbellinos moleculares» considerablemente compleja, con hipótesis también complejas. La definición epistémica de los diferentes conceptos, **no** siempre es clara.

El propio Maxwell, abandonó la teoría, posteriormente. No obstante, hay aquí algunas ideas, que son fundamentales, que tienen gran valor:

1. Concebir a la energía como «almacenada y localizada en el espacio».
2. Permitir un cálculo preciso de las «tensiones y presiones eléctricas», de las cuales resultan las llamadas «fuerzas ponderomotrices» de las que hablaba Faraday.
3. La existencia de las llamadas «corrientes de desplazamiento». Esta consideración lo conducen a **completar la for-**

ma de la ley de Ampère, que se extiende a situaciones donde la forma original de la misma, fracasaba.

4. La simetría existente entre esa ley de **ampère** generalizada, con la correspondiente ley de Faraday.

De estas ecuaciones surgen dos conclusiones esenciales:

- a] que los campos, necesariamente tienen soluciones viajeras.
- b] que los cuerpos transparentes, tienen una permitividad eléctrica, que define su índice de refracción, según la relación general:

$$e = n^2$$

En 1873 publica la teoría completa, en una obra fundamental en la historia de la Ciencia: «Tratado de Electricidad y Magnetismo». Se trata de una obra parangonable a la «Principia» de Newton.

Considerando a la energía eléctrica como análoga a la energía potencial, y la magnética como análoga de la energía cinética, logra realizar una descripción mecanicista completa del electromagnetismo. La aplicación de formalismo lagrangiano, le permite asimismo calcular las expresiones exactas de las fuerzas ponderomotrices. Con ello, logra reducir la necesaria información proveniente de la experiencia, disminuyendo el conjunto de leyes independientes. En opinión de **Poincaré**, el trabajo de Maxwell, **no** demuestra que el electromagnetismo es reductible a la mecánica, sino que tan sólo demuestra que esa es una vía posible.

Entre otras conclusiones, se deduce la existencia de la llamada «presión de radiación». En 1876, **Bartoli**, demostró que esa conclusión era consecuencia necesaria del Segundo Principio de la Termodinámica, cuando se le aplica a la radiación. En 1899, Lebedev, demostró **empíricamente**, la validez de esa conclusión teórica de Maxwell.

Los campos, deben viajar con la velocidad de la luz. Esta conclusión notable, **sugiere la posibilidad** de que la luz misma

sea un fenómeno electromagnético. El primer experimento de **Hertz**, condujo al resultado de 200.000 km/s. Pero ello se debió a errores en la calibración de la capacitancia del oscilador. Este error, fue corregido por **Poincaré**. La cuestión quedó **definitivamente zanjada** a partir de las mediciones efectuadas por **Lecher** (1890), **Sarasin y de la Rive** (1893). De acuerdo con estas mediciones, las señales por los hilos de transmisión, viajan efectivamente a la velocidad de la luz y también en el aire. Se iniciaba, la **era de las comunicaciones**. El mundo había cambiado.

Asimismo, a partir de este momento, las investigaciones acerca de efectos «secundarios», derivados del modelo, conforman una cantidad insospechada de conclusiones para la Ciencia y la Tecnología, dando lugar a descubrimientos de «mecanismos», que cambiaron la perspectiva de la Humanidad en el siglo XX. Los nombres de **Hertz**, **Rowlands**, entre otros, contribuyen a descubrimientos de fundamental importancia. Un grupo particularmente importante de experimentos fue el realizado por **Hertz**, sobre las llamadas ondas cortas (ondas de 30 cm). Con ellas, verificó completamente las leyes de la reflexión, refracción, difracción y el **carácter transversal de las oscilaciones luminosas**. Verificó así, que la «vibración de Fresnel» es paralela al campo eléctrico transportado por la onda, y que la «vibración de Neumann-Mac Cullagh», era paralela al campo magnético. Con esto, se había resuelto una antigua discusión, acerca de «la dirección de las vibraciones luminosas».

Pero la teoría, además de conformar una espectacular fuente de conocimientos y explicaciones, encerraba además, el **germen** de la Relatividad einsteniana, ya que se trataba de una «teoría no clásica», aunque surge de un contexto clásico y de fenómenos supuestamente clásicos. Se trataba de un problema de interpretación. La vieja aspiración de reducir el electromagnetismo a un contexto newtoniano, daría como resultado, la abolición de este paradigma del siglo XVIII.

FÍSICA DEL HUMOR

El "teorema del salario" de Dilbert establece que "los ingenieros y científicos nunca pueden ganar tanto como los ejecutivos y los comerciales".

Este teorema se puede demostrar física y matemáticamente a partir de los siguientes 2 postulados:

Postulado 1: "El conocimiento es poder"

Postulado 2: "El tiempo es dinero"

Sabemos que:

Poder(potencia) = trabajo/tiempo

Como "conocimiento = poder" y "tiempo = dinero"

conocimiento = trabajo/dinero

de modo que "despejando" tenemos que:

dinero = trabajo/conocimiento

De esta forma, cuando **conocimiento** $\rightarrow 0$, el **dinero** $\rightarrow \infty$, independientemente del **trabajo** hecho. $\Rightarrow$ cuanto **menos** sepas, más ganarás.

L.Q.Q.D.

Dios es real, a no ser que esté declarado como entero ...

Una estudiante entra al gabinete de Física, chequeando antes si no había nadie en el pasillo. Cierra la puerta y:

—"Profesor, yo haría cualquier cosa por exonerar"

El profesor levanta la cabeza y se la queda mirando. Ella se acerca seductora y le dice, —"Quiero decir, que haría **cualquier** cosa ..."

Él le pregunta: —"¿Cualquier cosa?" —"**Cualquier** cosa". —"...**Cualquier** cosa???" Ella se le acerca más y contesta: —"**Cualquier** cosa!"

Él acerca su rostro al de ella y le susurra al oído, —"¿Podrías estudiar??"

Leyes de todo buen estudiante:

- No mires nada en un laboratorio de Física
- No huelas nada en un laboratorio de Biología
- No pruebes nada en un laboratorio de Química
- No toques nada en un hospital.
- Pero sobretodo, lo que nunca jamás debes hacer, es escuchar en una clase de Filosofía.

Fe de erratas. En la sección "Física del humor" del número anterior, donde dice "Boooooohr" debe decir "Boooooohr".

Ciencia es creer en la ignorancia de los científicos.

R. Phillips

Esa... ¡preguntita!

- Si nada se pega al teléfono, ¿cómo lo pegaron a la sartén?
- ¿De qué color es un camaleón mirándose en el espejo?
- Se dice que sólo diez personas en el mundo entendían a Einstein. Si nadie me entiende a mí, ¿soy un genio?
- Si quiero comprarme un boomerang nuevo, ¿cómo hago para deshacerme del viejo?
- ¿Qué le ocurre a tu puño cuando abris la mano?
- Si los padres saben más que los hijos, ¿por qué Albert Einstein es tan famoso y nadie sabe nada de su padre?
- Si un refrigerador congela a no menos de 30° bajo cero y en la Antártida en un invierno muy frío la temperatura ambiente llega a los 50° bajo cero, ¿no podrían calentarse las personas entrando a los refrigeradores?

El profesor de Física: —"Estoy indignado, más del 80% de la clase sacó insuficiente en el escrito!!! —(Risas desde el fondo del salón) "Ja, ja, ja ... si ni siquiera somos tantos...!"

OTRA VEZ EL GATO...

¿U OTRO GATO?

Extractado del artículo original: Los universos múltiples por Abdullah Bartoll (Revista Verde Islam - Nº 4, Año 2 - Primavera-Verano 1996 - Publicación digital del Centro de Documentación y Publicaciones de Junta Islámica)

Nota Previa: el extracto anterior acerca del famoso gato de Schrödinger despertó un interés dormido por las cuestiones allí expuestas y eso motivó este nuevo aporte. Si bien el contenido está netamente dirigido a la Comunidad Islámica, creemos positivo extractar algunos elementos para que, quizás, alguien más vier-ta un aporte de contenido científico más es-tricto

El Sagrado Corán expresa que existen uni-versos diferentes al nuestro. Hay dos concep-ciones sobre los múltiples universos, el de la Física moderna -cuántica- y la islámica de Ibn ʿArabi, el más grande pensador del islam.

Puesto que la Física moderna ha llegado a la misma conclusión que el Corán sobre la existencia de múltiples universos, explicaré la historia de este descubrimiento «reciente». El mensaje coránico es «científico» y no está en contradicción con las leyes físicas, sino, al contrario, puede llenar los vacíos que la Fisi-ca, por sí sola, no puede resolver si no es con ayuda de la revelación de Allah.

Veamos cómo han llegado los físicos mo-dernos a la conclusión de que existen uni-versos múltiples. La historia comienza con uno de los «experimentos mentales» más co-nocidos, el denominado «gato de Schrödinger», llamado así por haber sido idea-do por Erwin Schrödinger, uno de los precur-sores de la Mecánica Cuántica. Conocido este planteo sabemos que, pasada una hora, si fué-semos capaces de realizar tan cruel experi-mento, habría dos posibilidades: que estu-viera vivo o que estuviera muerto. Sin em-bargo, según propone la física cuántica, ¡el gato no se hallaría en ninguna de las dos si-tuaciones! Al cabo de una hora, la función de onda que describe al gato no sería la del gato muerto ni la del gato vivo. En vez de ello se trataría, simultáneamente, de las funciones de

onda del gato muerto y del gato vivo: la au-téntica función de onda consiste en la suma de las dos. De manera incontestable, la física cuántica afirma que el gato está a la vez vivo y muerto. Entre los físicos, existe un consen-so generalizado que afirma que esta suma es lo que predice la mecánica cuántica estándar. Pero no se ponen de acuerdo en la interpre-tación, en el significado de dicha suma. Se-gún la versión de Copenhage, existe un pro-ceso denominado «reducción de la función de onda», que provoca que la suma de las funciones de onda del gato vivo y del gato muerto, se reduzca, bien a una u otra fun-ción, pero no a las dos. Toda reducción adi-cional tiene un carácter aleatorio, esto es, en el experimento de Schrödinger, la mitad del tiempo el gato estará vivo y la otra mitad muerto. No existen reglas generales para poder decidir cuáles son los objetos físicos cuya función de onda se ha producido en el momento de ser observado por seres huma-nos. Algunos físicos que dan por válida la in-terpretación de Copenhage opinan que es ne-cesaria la presencia de conciencia para redu-cir la función de onda (Penrose y Wigner per-tenecen a esta corriente), mientras que otros consideran que basta que sea un objeto «gran-de» para que tenga lugar este proceso (John A. Wheeler es de esta opinión). Sin embar-go, tanto los seres humanos como los obje-tos «grandes» están constituidos por átomos, cada uno de los cuales evoluciona según las leyes de la física cuántica habitual, sin que haya ninguna reducción de la función de onda. Por tanto, para los físicos, es difícil en-tender con precisión cómo llega a tener lu-gar en realidad esta reducción. Pero los mu-sulmanes sí sabemos Quién produce la re-ducción de onda. Los musulmanes, constan-temente decimos «Allahu Akbar», Dios es el Más Grande. ¿Qué conciencia es la que siem-

pre está observando? Sabemos que antes del ser humano ya existían los animales, y antes de los animales los vegetales, y antes de ellos el agua, los minerales... Y antes de la tierra ya existía el universo. Por lo tanto no puede ser el ser humano quien reduce la función de onda.

Según la interpretación de los Mundos Múltiples, no existe reducción alguna de la función de onda. Es decir, después de transcurrida una hora en la cámara de acero, el gato se encontraría realmente en estado cuántico consistente en «el gato muerto junto con el gato vivo». Esta interpretación afirma que la desintegración radiactiva del átomo habrá obligado al gato y a todos los demás aparatos del experimento a dividirse en dos mundos distintos: en uno, el gato está vivo; en el otro, muerto. Si ahora tratásemos de comprobar si el gato está vivo o muerto, también nos dividiríamos en dos. En un mundo veríamos que el gato está vivo. En el otro, que está muerto. La interpretación de Copenhague supone que la «reducción de la función de onda» elimina los efectos cuánticos a escalas cosmológicas, muy poco tiempo después de la Gran Explosión. Por tanto, el Universo, actualmente, no es de carácter cuántico salvo a muy pequeña escala. Para los físicos cuánticos que siguen esta interpretación, la reducción de la función de onda es un proceso misterioso. No tienen ninguna forma para discernir la sustancia que puede reducir las funciones de onda, y por eso les resulta imposible realizar un análisis preciso de la contingencia que aparece cuando ese acontecimiento tiene lugar. La interpretación de los mundos múltiples tiene que eliminar ese escollo diciendo que no existe la reducción de la función de onda, y que la realidad física viene dada por la función de onda del Universo. Éste tiene ahora el mismo carácter cuántico que tuvo en sus orígenes. En esta interpretación, el radio del Universo es, simplemente, una variante cuántica más, igual que la vida del gato en el experimento. En consecuencia, existen muchos universos dotados de diferentes radios en el momento de la máxima expansión. Da la casualidad de que

vivimos en uno de esos universos y, sin embargo, hay otros mundos en los que existen otras versiones de nosotros mismos. La física moderna ha llegado a la misma conclusión que se sostiene en el Islam: hay mundos múltiples y hay múltiples versiones de nosotros mismos en estos universos.

Por otro lado, la existencia de mundos múltiples demuestra que existe el libre albedrío, puesto que, lógicamente, si no existieran otros mundos estaríamos destinados a no poder «actuar de otra manera». El que existan múltiples versiones de nosotros mismos en otros universos, implica el que el sujeto «pudo haber actuado de otra forma». La única manera de asegurarse de que el sujeto «pudo haber hecho otra cosa» es que éste hubiese, de hecho, actuado de otra manera. O sea, es necesario que el sujeto lleve a cabo simultáneamente dos o más actos, diferentes el uno del otro o los otros. Evidentemente esto no sería posible en un solo universo, sino que se necesitan múltiples universos para que exista la libertad de elegir entre miles de posibilidades para desarrollarnos completamente (si no existieran múltiples universos y versiones de nosotros mismos actuando de diferente manera), puesto que necesitaríamos cumplir dos condiciones necesarias. La primera, el tiempo. Pero tendría que ser un tiempo infinito, o sea, tendríamos que ser eternos. La segunda, retornar de nuevo a nuestro universo. La primera condición es imposible de cumplir puesto que tenemos un tiempo biológico (según Sagrado Corán, 7,20). El tema de la inmortalidad en este mundo no es posible. La segunda condición, el retorno a este mundo tampoco lo es (según Sagrado Corán, 7,20).

No hay duda pues, sobre la existencia de numerosos mundos.

Nota: *Un equipo de físicos estadounidenses ha demostrado que un átomo puede existir simultáneamente en dos sitios a la vez, a considerable distancia o posición espacial en términos del microcosmos.*

Laboratorio... ¿qué hay de nuevo?



Siguiendo con el afán de difundir el trabajo de docentes y estudiantes de todo el país y de otras tierras, es que iniciamos este espacio de aplicación más específica en el laboratorio. Esto es un complemento ampliado de los espacios «Soluciones Prácticas» y se alimentará de nuevos enfoques de «viejas» y/o conocidas prácticas de Física, así como inéditas y de ideas no completamente desarrolladas o resueltas, para que los lectores puedan dar su aporte para ir «redondeando» con la participación de todos.

1. Movimiento circular

Aporte: Sandry Ramírez - Óscar Collado
Odi Prieto - Alejandra Delgado
Sergio Falcón

Una práctica que usualmente se hace dentro de nuestros laboratorios, es la conocida «foto M.C.U.» (fotografía estroboscópica a escala de un M.C.U.), donde se determinan magnitudes tales como velocidad tangencial, velocidad angular, período, aceleración centrípeta, etc. La misma es relativamente difícil de realizar físicamente en los laboratorios por motivos que no detallaremos.

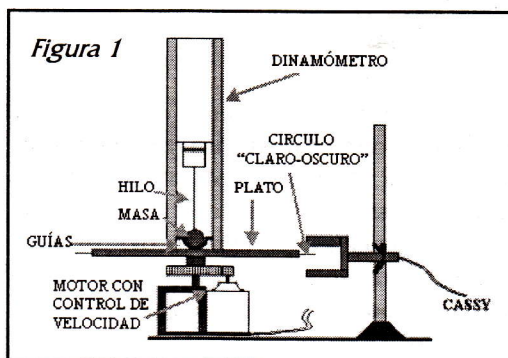
En busca de alternativas y/o complementos ideamos la propuesta que describimos a continuación.

Construir un dispositivo que permita visualizar y medir las magnitudes que verifiquen y complementen con las determinadas en la «foto»; usando CASSY por su precisión, accesibilidad en los laboratorios de segundo ciclo, facilidad de instalación, etc. (de ésta se usa el programa Cronómetro perteneciente al conjunto «Medir y Evaluar»)

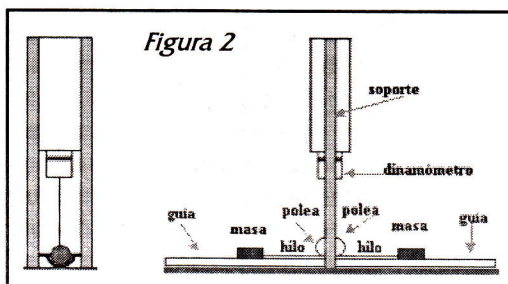
Descripción del dispositivo

Se usa un dinamómetro colocado verticalmente, sobre el eje de giro de un plato controlado por un motor cuya velocidad de giro puede ser regulada; este resorte será el encargado de efectuar la fuerza principal necesaria para mantener un giro de dos

masas unidas a él por un hilo y que deslizan en una guía dispuesta sobre el plato en un diámetro. Para un mayor detalle, se muestra en la Figura 1 un dibujo con la apariencia final del dispositivo y luego se describen sus partes.

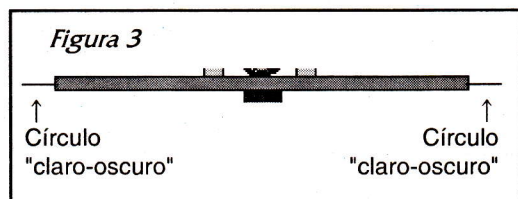


Las masas (ver Figura 2) son cilindros cortados de un barrote de aluminio, limadas hasta que sus valores coincidieron; las poleas son pequeñas y pueden ser fabricadas o «caseras»; el hilo debe ser de la menor elasticidad posible y muy «liviano»; la guía puede ser un cilindro de preferencia transparente o un «bajo plástico» cortado en «me-

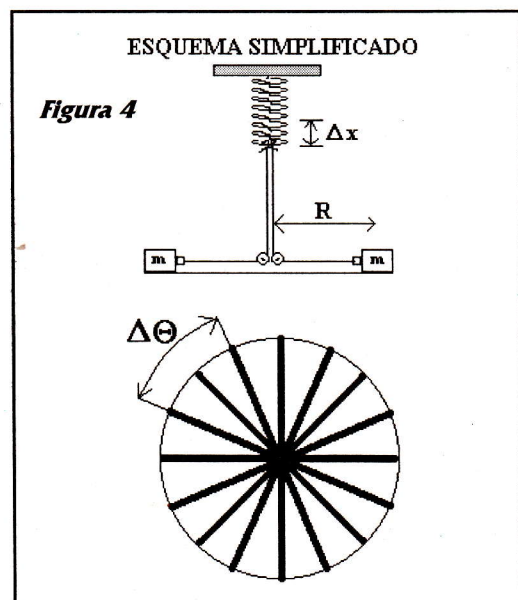


dia caña»; y los soportes verticales deben ser de la misma masa dispuestos simétricamente respecto al eje de giro.

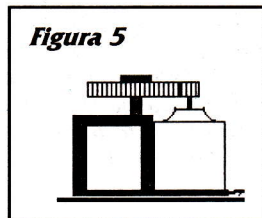
El «plato» (Figura 3) debe tener pegado un círculo «claro-oscuro» para que se puedan tomar los desplazamientos angulares con la interface CASSY. En particular, para fabricarlo, se dibuja, sobre una hoja blanca, una circunferencia de mayor diámetro que el plato y luego con un marcador de trazo grueso, se marcan diámetros separados 20° y finalmente se fotocopia sobre acetato el resultado.



En el esquema de la Figura 4 se muestra el dinamómetro clásico dispuesto verticalmente, las poleas y las masas que se mantienen girando con velocidad angular constante a una distancia (graduada previamente) determinada (R) del eje de giro. (también se muestra el círculo «claro-oscuro»).



El motor que se muestra en la Figura 5, con una reducción mecánica con engranajes, puede ser sustituido por un motor de C.A. unido a un «dimer» que regule su velocidad, incluso se puede probar usando un taladro eléctrico y controlar igualmente su giro.



Todo el dispositivo debe funcionar con solidez, y para ello es conveniente que sus distintas partes estén unidas con un adhesivo de buena calidad.

Sugerencias de uso y aplicación

A continuación se proponen algunas posibilidades de trabajo y objetivos posibles, que pueden lograrse usando este dispositivo. Por ejemplo:

- Determinación y comparación de ω por distintos métodos.
- Determinación y representación de las siguientes magnitudes: velocidad tangencial, aceleración centrípeta y momentum angular usando una reproducción del disco «claro-oscuro» sobre papel.

Procedimiento sugerido

- Se dispone el dispositivo como se indica en el dibujo, atendiendo la posición del sensor para la CASSY.
- En la computadora activar el programa Cronómetro del grupo Medir y Evaluar.
- Teniendo en cuenta las marcas claro-oscuro ($\Delta\theta = 40^\circ \rightarrow 0,698 \text{ rad}$) ingresar como «fórmula» una magnitud de nombre **an**, unidad **rad**, 3 lugares decimales y expresión **$n * 0,698$** .
- Activar: **Iniciar nueva medición F1**
- Activar el dispositivo y regular su velocidad hasta alcanzar uno de los estiramientos marcados en el resorte (dinamómetro).
- Verificar la estabilidad del sistema y presionar F1 para iniciar medición. Detener en 70 u 80 datos aproximadamente.

- g) Desactivar el dispositivo
- h) Graficar $a_n = f(t)$. Trazar la curva (F2) y determinar su pendiente (ALT + F2)
- i) Imprimir la gráfica y los datos desde el número 10 al 20 por ej.
- j) Repetir los pasos desde d) hasta h) unas 20 veces, anotando en cada caso los valores de ω
- k) Anote los valores que figuran en el dispositivo: fuerza elástica, valor de cada masa y radio de giro de las mismas.

Cálculos sugeridos

- a) Con los 20 valores de ω obtenidos en iguales condiciones, calcular promedio y semirango
- b) Análisis dinámico mediante, determinar ω y su incertidumbre, usando los valores de masa, fuerza elástica y radio de giro (¿se puede considerar despreciable el rozamiento?)
- c) Comparar con una gráfica de solapamiento ambos valores. Se sugiere repetir este estudio para un radio algo menor (0,5 cm por ej.) y otro algo mayor para comparar las incertidumbres obtenidas.
- d) Tomar los datos de la tabla impresa y trasladarlos al disco claro-oscuro impreso, teniendo en cuenta el valor del radio de giro
- e) Realizar por procedimientos habituales la determinación y representación de las magnitudes que se sugirieron.

2. Proyectoil con salida horizontal

Aporte: Daniel Baccino - Ana Costa
Victoria Mirianco - Juan Echenique
Claudia Varaksa

El estudio cinemático de la caída libre de los cuerpos que son lanzados con velocidad horizontal 'no demasiado grande' cerca de la Tierra, es una actividad experimental que se realiza habitualmente en los cursos de Segundo año de Bachillerato Diversificado.

En ese sentido existen por lo menos dos conjuntos de formas 'clásicas' de plantear el trabajo:

- Análisis del problema mediante medidas directas de la componentes horizontal y vertical de la posición, para luego estudiar la trayectoria del proyectil y alguna magnitud que se pueda determinar indirectamente.
- Análisis de una foto estroboscópica.

Con la intención de realizar una actividad experimental que sea una alternativa al estudio de una foto estroboscópica, y que al mismo tiempo permita evaluar el intervalo tiempo de caída del proyectil 'in situ', es que dirigimos nuestra atención.

La versión final del dispositivo que hemos construido consta de una barrera óptica que enciende el cronómetro de la interface 'cassy' en el instante que la esfera abandona la rampa y un transductor constituido por un elemento piezoeléctrico y un transistor, que apaga el mismo cronómetro cuando la esfera pega en la barrera vertical.

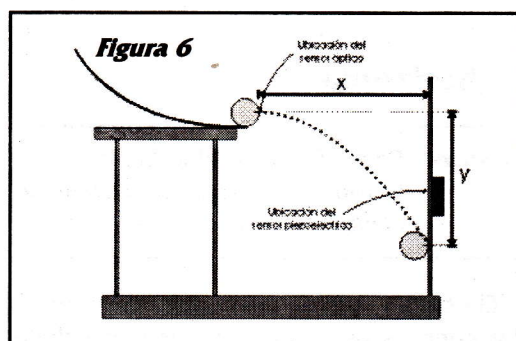
Descripción del dispositivo

El dispositivo experimental (ver Figura 6) consta de:

- Rampa con canaleta, diseñada de manera que la bolita salga con velocidad horizontal.

*Sugerimos una lectura a
"Cita con Rama"
de Arthur C. Clarke.*

*Ciencia ficción y Física no
siempre están en oposición.*



- Tabla con carbónico, (en la que se registran las posiciones verticales).
- Sensor que viene en las cajas de «Mecánica».
- Adaptador diseñado por Pablo García.
- Sensor «piezoeléctrico».

¿Qué se mide? ¿Cómo?

Se medirán las posiciones verticales, y los tiempos correspondientes desde que la bolita abandona la rampa con velocidad inicial horizontal, hasta que choca contra la tabla a medida que varía la distancia horizontal rampa-tabla.

- 1) Para determinar las posiciones vertical y horizontal, lo primero es ubicar el origen del sistema de referencia. Se tomará como origen, la posición del centro de masa de la bolita cuando ésta abandona la rampa. Esto ocurrirá, cuando la bolita avance del borde de la rampa una distancia igual a su radio. A esa altura vertical, marcamos en la tabla la posición correspondiente a $y=0$. Cada im-

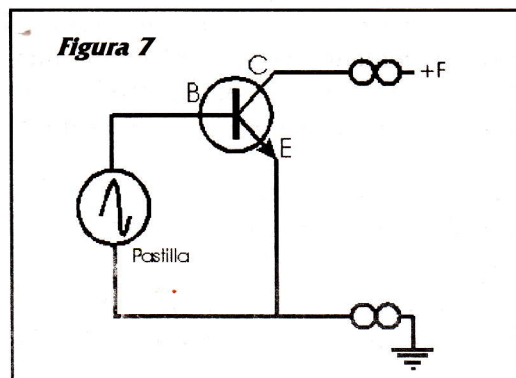
pacto de la bolita, quedará marcado por el carbónico en la tabla. La distancia horizontal se medirá desde el borde anterior de la bolita, en el instante que abandona la rampa, hasta la tabla.

- 2) Para medir el tiempo, se conectarán dos sensores al cronómetro de la «CASSY».
 - a) Para arrancar el cronómetro se colocará el sensor que viene en las cajas de «Mecánica», de forma tal que el fotodiodo quede colocado a la altura del centro de masa de la bolita cuando ésta abandona la rampa, y además a una distancia horizontal de la rampa igual al radio de la bolita. El fotodiodo quedará ubicado en las coordenadas (R, O) y activará el cronómetro de la «CASSY», cuando el borde anterior de la bolita esté separado de la rampa una distancia igual a su radio, o sea en el instante que la bolita deja la rampa.
 - b) El sensor «piezoeléctrico» se colocará apoyado en la tabla, de modo que cuando la bolita golpee contra la tabla, la vibración hará que el sensor detenga el cronómetro.

Precauciones

Para que las medidas experimentales se ajusten a las hipótesis de trabajo, debemos tener especial cuidado en:

- a) Cada vez que lanzamos la bolita, debemos hacerlo siempre de la misma altura de la rampa, y sin darle ningún impulso.
- b) La salida de la rampa debe ser horizontal, de modo que la velocidad inicial de la bolita no tenga componentes en la dirección vertical.
- c) Colocar el fotodiodo del sensor a la salida de la rampa como se indica anteriormente, en las coordenadas (R, O) de nuestro sistema de referencia, de modo que el tiempo medido sea, desde que la bolita abandona la rampa, hasta que golpea contra la tabla.



¿ES CONTINUO EL UNIVERSO?

Juan Grompone

Es Ingeniero Industrial (Informática) de la Universidad de la República, de Montevideo, Uruguay. Fue quien dirigió la primera red de datos del Uruguay (URUPAC), además es conocido como escritor (ustedes han quizás, oído de 'La Conexión MAM', por ejemplo) y tiene una actuación relevante en cuanto a sus conferencias en Tecnología y Sociedad. La presente exposición es un extracto de la conferencia brindada en Colonia del Sacramento.

Introducción

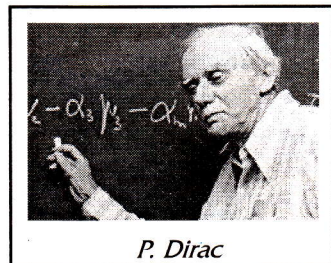
Cuando a mí me invitaron a dar una charla me resultó difícil encontrar un tema. Yo fui algunos años Profesor de Física en la Facultad de Ingeniería. Di cursos de Mecánica y de Electromagnetismo y lo recuerdo como una hermosa época, pero hace muchos años que no me ocupó de la Física. Entonces decidí que tenía que hablar de las cosas que sí me ocupó que son la Informática como profesional y la Epistemología como aficionado. Entonces, les voy a hablar es de algo que sé que es Informática y algo que me gusta que es la Epistemología y estos dos temas se encuentran en el problema de la continuidad del Universo¹.

Nuestra concepción física moderna del Universo se formó en 25 años, entre 1905 y 1930. En esos 25 años que van desde la publicación de cuatro trabajos muy importantes de Einstein —los dos más importantes tienen que ver con la Relatividad Restringida y con la noción de fotón— y finaliza en 1930 cuando Dirac escribe la monumental Principios de la Mecánica Cuántica marcan una gran revolución en nuestra concepción del Universo. Luego de esos 25 años creadores no ha ocurrido ningún cambio esencial en la Física, todo lo que se ha hecho es 'sacarle punta', escarbar, experimentar, acumular datos, pero no hay nada esencialmente nuevo desde ese entonces.

¹ Por alguna razón que escapó a mi control, esta conferencia fue anunciada previamente con el nombre: La superación de infinitésimos por el ordenador. Si bien el título se acerca al tema tratado, he restablecido el título original.

Pero el siglo XX aportó muchas otras cosas importantes a la ciencia fuera del área de la Física. En particular, a

partir de 1930, —cuando la Física se calmó— dio lugar a que otros investigadores se ocuparan de otros temas. La década del '30 es sin duda la década de los matemáticos y la de los lógicos. Es absolutamente increíble todo lo que se descubrió en esa década, tal vez ni siquiera en toda la década sino en los cinco primeros años. Se descubrió casi todo lo nuevo que sabemos sobre estos temas y que revolucionaría el resto del siglo XX. Nos vamos a ocupar hoy de dos descubrimientos que ocurren, uno hacia 1930 y otro hacia 1935. Se trata de dos importantes descubrimientos, uno hecho por un lógico inglés que se llamaba Alan Turing y el segundo hecho por un filósofo vienés que se llamaba Karl Popper. Estos dos descubrimientos se van a juntar para armar lo que quería transmitirles hoy.



P. Dirac

La computabilidad de Turing

Comencemos por el primero, por Alan Turing. Últimamente ha sido una persona muy conocida porque se han escrito obras de teatro sobre él, pero hasta hace 10 años era una persona absolutamente desconocida a pesar de ser, posiblemente, la persona cuya obra tuvo más influencia sobre todos nosotros en el siglo XX. Los problemas que

resolvió Alan Turing son problemas muy viejos que vienen de los griegos. Ya los griegos se habían planteado el problema del conocimiento científico y de como había que organizarlo. Había una respuesta clásica que era la respuesta



A. Turing

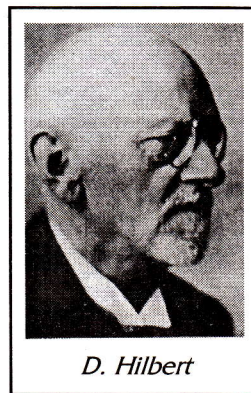
de Euclides. La Geometría debe organizarse como una teoría axiomática en la que hay teoremas, conclusiones, todo organizado de manera sistemática y deductiva. Euclides parecía haber resuelto el problema en forma completa porque luego de él todo el mundo siguió esta línea. Por ejemplo, Arquímedes, que la mayoría de las veces era lo que hoy llamamos un físico experimental, cuando presenta las leyes de la palanca o cuando presenta el célebre resultado empuje hidrostático lo hace en forma deductiva. Escribe postulados, escribe teoremas, hace exactamente lo mismo que Euclides con la Geometría. No era porque Arquímedes no supiera que sus resultados eran experimentales² simplemente porque esa era la manera de exponer —posiblemente influida por el pensamiento platónico— era la única manera que se concebía en la Grecia clásica. Esta idea continuó en el período Alejandrino posterior y continuó hasta el presente. Es muy notorio el caso de un físico experimental como [DyL1] Galilei —constructor de instrumentos y profundo experimentador— expone al estilo de Euclides en forma axiomática. Lo mismo hace Newton —otro gran físico experimental y constructor de instrumentos— en su 'Principia': es una exposición de tipo

deductivo, igual a los 'Elementos' de Euclides, en el cual se introducen los 'axiomas del movimiento' y también hipótesis audaces como la de la Gravitación Universal.

Esta concepción axiomática siguió hasta el siglo XIX. Ya a principios del siglo tuvo algún tropezón porque, por ejemplo, se descubrió que el famoso 'axioma de las paralelas' de Euclides podía ser cambiado por otros distintos y se obtenían geometrías coherentes. Con este resultado se empezó a dudar de la fortaleza del edificio formal que se podía construir mediante axiomas. Pero todavía a fines del siglo XIX y principios del siglo XX parecía como que no nos podíamos liberar de ese tipo de modelo teórico y que allí estaba la única manera posible de presentar el conocimiento científico.

A principios del siglo XX surge un gran desafío que lo realiza un matemático de extraordinaria influencia, David Hilbert. Hilbert plantea el siguiente problema —aparentemente sin mayores consecuencias—: si el conocimiento consiste en enunciar postulados y luego deducir teoremas, parecería que la tarea creadora es formular postulados en tanto que la tarea de extraer conclusiones parece ser una tarea mecánica. Hilbert se formula la siguiente pregunta: ¿no se podrán resolver mecánicamente los problemas de demostrar teoremas? ; ¿no podremos fabricar una máquina que demuestre teoremas? Boole

—50 años antes que Hilbert— había demostrado que la estructura del pensamiento lógico era una estructura matemática. Bertrand Russell —un contemporáneo de Hilbert— demostró que detrás de la Matemática había un



D. Hilbert

² Yo pienso que tampoco Euclides dudaba que sus resultados geométricos eran experimentales, pero entrar en este tema nos llevará muy lejos. En algún trabajo futuro me ocuparé del punto.

formalismo rigurosamente lógico. Entonces la actividad de demostrar parecía ser una actividad esencialmente mecánica. porque, en definitiva, se trataba de aplicar reglas lógicas que habían sido puestas en claro por George Boole. Entonces, ¿no será posible construir una máquina que demuestre teoremas y dejar sin trabajo a todos los matemáticos? Esta era una de las preguntas que se formuló Hilbert.

Seguramente los descubrimientos sobre la estructura de la materia y del Universo realizados entre 1905 y 1930 dejó la pregunta suspendida en el aire, nadie tuvo demasiado tiempo para ocuparse de esa propuesta porque todo lo que se estaba descubriendo hacía que el centro de interés en la Ciencia estuviera en la Física y no en esta cuestión teórica propuesta por Hilbert.

En 1930 se volvieron a retomar las grandes cuestiones teóricas. Alan Turing fue uno de los que tomó el desafío de Hilbert³. El planteo de Turing comenzó por reflexionar sobre lo que era una máquina automática. En los hechos fue la primera persona⁴ que se planteó la pregunta teórica: ¿qué es una máquina automática? Por supuesto que no vamos a seguir el desarrollo de las ideas de Turing porque hoy estamos rodeados de máquinas automáticas; tenemos que plantear el problema en forma mucho más moderna. Hoy tenemos gran cantidad de máquinas automáticas: el reloj de pulsera electrónico es una máquina automática y, en general, todos los equipos electrónicos de los que estamos rodeados son máquinas automáticas. Todos son equipos

digitales que realizan funciones de tipo mecánico y que se pueden denominar autómatas.

Turing había logrado descubrir que podía haber muchos autómatas distintos, a pesar de que él no conocía el horno de microondas, el televisor, el reloj, la calculadora; no las conocía pero se podía imaginar que había muchos autómatas posibles. Su primer gran resultado consistió en demostrar que esa enorme variedad de autómatas no era tal. Era posible concebir un autómata especial, que lo llamaba **autómata universal**, que era capaz de comportarse igual que cualquier otro que podamos concebir.

Este teorema, el teorema de la existencia del autómata universal, es el resultado número uno de Turing y vale la pena detenernos un poco en él. La idea de Turing era la siguiente: la 'conducta' de una máquina automática se puede describir como una 'tabla' de estados y de acciones —frente a 'esta situación' si aprieto 'tal botón' hace 'tal cosa', si yo aprieto 'tal otro botón' hace 'tal otra', si pasa 'tanto tiempo' pasa 'tal otra'—. De modo que una máquina automática se puede describir por una tabla —simple o complicada, pero una tabla al fin— que dice exactamente, luego de 'una entrada', cual será la siguiente acción y 'una salida'. Si, en definitiva, un autómata se puede describir mediante una tabla, entonces lo único que es necesario imaginar es un autómata —Turing no usaba la palabra 'memoria', pero la vamos a usar nosotros porque es una idea corriente— con una memoria **infinita**. Un autómata con memoria infinita simula la conducta de cualquier otro autómata. Supongamos que partimos la memoria infinita al medio y que destinamos 'la parte derecha' para una cosa y 'la parte izquierda' para otra. Con un autómata convenientemente que tenga memoria infinita puedo simular cualquier otro autómata porque coloco del lado derecho toda

³ También de este período es el célebre resultado de Kurt Gödel acerca de los sistemas axiomáticos.

⁴ Charles Babbage, en el siglo XIX, había explorado y construido diversas máquinas automáticas destinadas al cálculo. Sin duda fue un pionero del problema, pero no logró independizarse de la idea de calcular.

la memoria real que tiene el autómata verdadero —la calculadora, el televisor, etc.— aunque también él tenga memoria infinita y esto lo puedo hacer porque, digamos, puedo usar los casilleros pares para el lado izquierdo y los casilleros impares para su lado derecho. Entonces, aunque el autómata que estoy simulando tenga memoria infinita igual lo puedo poner en correspondencia con una memoria semi-infinita⁵. Puedo entonces poner **toda** la memoria del autómata que quiero simular del lado derecho de la memoria del 'autómata universal'. Del lado izquierdo, que todavía no he utilizado, pongo una tabla que describe la conducta del autómata. Pero ahora el autómata universal lo que tiene que te-

ner que hacer es la siguiente secuencia de operaciones:

- Ir al primer lugar del lado izquierdo de la memoria y buscar en la tabla la instrucción que tiene que hacer el autómata a simular.
- Ir al lado derecho de la memoria, ver cuál es el contenido de la memoria del autómata en simulación.
- Hacer lo que le dije que hiciera la instrucción recuperada del lado izquierdo de la memoria y el contenido almacenado en el lado izquierdo.
- Volver al lado izquierdo de la memoria, a la descripción del autómata en simulación, para ver cuál es la nueva instrucción.
- Continuar indefinidamente de esta manera.

La actividad de este autómata universal es idéntica a la del autómata que se desea

⁵ Este problema es similar a poner en correspondencia los puntos de una semirecta [0] con los puntos de una recta.



LOSA LIBROS

Colonia 1551/53 esq. Tacuarembó

<http://www.losa.com.uy>

Teléfono/Fax: 401 2905 y 401 8587

libros@losa.com.uy

11200 Montevideo, Uruguay

TÉCNICOS - INFORMÁTICA - EDUCACIÓN - LITERATURA INFANTIL

EN 1979, M. R. LOSA LIBROS TÉCNICOS SE INSTALA COMO LIBRERÍA EN UN LOCAL UBICADO EN COLONIA 1567. AHÍ DESARROLLARÍA SUS ACTIVIDADES HASTA 1986, AÑO EN EL CUAL SE MUDA A COLONIA 1551, EN LA ESQUINA CON LA CALLE TACUAREMBÓ.

EN ESE MISMO LOCAL NOS ENCONTRAMOS AHORA, SIEMPRE TRATANDO DE MANTENERNOS AL DÍA CON LAS ÚLTIMAS NOVEDADES Y BRINDANDO LOS MEJORES PRECIOS POSIBLES A NUESTROS CLIENTES.

simular. Este resultado se puede enunciar así: todas las máquinas automáticas, por complejas que sean, cualquiera sea la tecnología que empleemos, ahora o dentro de ciento cincuenta mil años, son equivalentes a una actividad del autómata universal. Observen, además, que estamos hablando de máquinas que tienen memoria infinita, es decir que son máquinas bastante potentes que la mayor de las computadoras que conocemos porque estamos aceptando que pueden tener una capacidad de almacenamiento **Infinito**.

A esta altura del fin de siglo le tenemos que cambiar un poco de nombre a las cosas: el 'autómata universal' es lo que hoy conocemos con el nombre de 'la computadora'⁶. El autómata universal que estaba describiendo Turing en 1931, por lo menos quince años antes de que se construyera ninguna computadora en el planeta, estaba describiendo las bases lógicas de lo que era una máquina universal que podía realizar cualquier operación automática. Por cierto que nuestras máquinas no tienen memoria infinita, pero la memoria de las máquinas crece continuamente. Si comparamos la memoria de las máquinas en 1950 con la memoria de los '60 ó '70 obtenemos la escalofriante cifra que la memoria se ha venido multiplicando **por cien cada diez años**. El crecimiento de la memoria es exponencial y, hasta ahora, no se detiene. Hace que las memorias de hoy, de cualquier 'máquina arriba de la mesa', tengan más de quince millones de caracteres. Esto quiere decir que en el 2010 van a tener mil

quinientos millones de caracteres 'arriba de la mesa'.

La descripción del autómata a simular, que llamaba 'tabla', hoy la llamamos '**programa**'; el programa en una computadora no es otra cosa que una manera, mas o menos indirecta, de decir que debe hacer el autómata particular que deseamos construir. Las tablas que describían la conducta del autómata han sido cambiadas⁷, en función de necesidades tecnológicas, por el uso de lenguajes más parecidos al lenguaje natural y que permiten generar automáticamente las tablas efectivas de uso —la compilación de los programas, en la jerga actual—. Lo que tenemos hoy, la computadora con su lenguaje de programación, es el modelo práctico y comercial del autómata teórico de Turing de 1930.

Del hecho que la computadora sea el autómata universal sigue que la computadora invada todos los campos de la actividad. La computadora sirve para escribir, para calcular, para dibujar, para hacer música, para simular problemas de física o el calcular el movimiento de los planetas. ¿Por qué sirve de todas estas cosas?: porque es un autómata universal. Todo aquello que se pueda hacer mediante una máquina se puede simular en una computadora, a lo sumo habrá algunas limitaciones de tamaño o velocidad y habrá que esperar un poco a que tengamos suficientes recursos, porque la hipótesis subyacente es que necesitamos memoria infinita y todo el tiempo necesario. Con lo que sabemos hoy, tarde o temprano, toda máquina será una computadora.

Este resultado ya se sabía en 1930 y hoy lo estamos viendo —a veces muy alegremente porque nos simplifica la vida, otras veces con dolor en carne propia porque nos

⁶ Creo que la palabra correcta a utilizar es **computadora** y no **ordenador**. Ordenador es un galicismo. Parece más justo utilizar la palabra derivada del inglés, **computer**, porque yo reconozco el derecho de los creadores de ponerle nombre a sus creaciones. Por esta razón el título anunciado de esta charla, que tenía la palabra **ordenador** me parecía particularmente infeliz.

⁷ Originalmente, en las computadoras de 1950, se empleaba tablas muy difíciles de manejar.

deja sin trabajo—. Es cierto que esta máquina es universal e invade todos los terrenos. El primer resultado de Turing es un resultado sorprendente y lo vivimos todos los días: existe un autómata universal y este autómata se puede construir. Se han construido millones de autómatas universales, tal vez en este momento haya unos 200 millones de computadoras distribuidos en el planeta y este número sigue creciendo a una velocidad vertiginosa.

Pero es más sorprendente el segundo resultado de Turing. El segundo resultado de Turing es algo que parece que se mantiene en una especie de secreto. Yo lo utilizo mucho para charlas como ésta porque es asombroso que siendo tan importante este segundo resultado tiene poca difusión y le resulta increíble que a la gente cuando lo escucha por primera vez.

Pensemos ahora en todos los programas, en todos los autómatas posibles que podríamos imaginarnos, ideas que, en definitiva, son equivalentes. Todos los programas posibles de computadora están hechos con un conjunto finito de símbolos—un alfabeto finito de símbolos con un conjunto finito de símbolos—. La mayoría de los programas se escriben en lenguajes de computación que usan el alfabeto, los números, algunos signos de puntuación, algunos signos de operaciones aritméticas, paréntesis; en total tal vez con menos de sesenta símbolos se puede escribir todos los programas existentes.

Los programas tienen diferente largo—pueden tener una página, cinco páginas o quinientas páginas, pero tienen un largo determinado—pero son de largo finito. Si estamos hablando de programas finitos escritos con un alfabeto finito, entonces el conjunto de los programas es un conjunto **numerable**. Para numerarlos yo puedo, primero, escribir todos los programas que tienen un símbolo (si es que existen), luego todos los que tienen dos símbolos, luego

todos los que tienen tres símbolos y así puedo seguir. De este modo se podría hacer un catálogo con todos los programas que existen, aunque algunos de ellos no tengan sentido. El hecho fundamental y esencial que hemos obtenido es que **todos los programas que se pueden escribir son numerables**.

Pero entonces hemos encontrado un resultado que es absolutamente asombroso. Observen que algunos de esos programas que hemos catalogado no servirán para nada, otros ayudarán a dibujar y otros, eventualmente, calcularán números⁸. Pero en definitiva **todos los números que se pueden calcular son numerables**. El conjunto de los números 'computables'—el conjunto de los números que se pueden calcular con una calculadora o con una computadora—, hoy o dentro de ciento cincuenta mil años, es un conjunto numerable porque es el resultado de un subconjunto de programas que son un conjunto numerable y por lo tanto también son un conjunto numerable. Pero entonces—y aquí viene el resultado absolutamente asombroso— **la inmensa mayoría de los números reales no se van a poder calcular nunca** porque los números reales—como demostró Cantor a fin del siglo pasado—no son numerables. Quiere decir que hay una barrera brutal entre lo que podemos calcular y los números reales y esta barrera es teórica y conceptual—no depende de la tecnología que las máquinas tengan, ni de su memoria o de su velocidad—. Ni ahora ni nunca el conjunto de los números computables dejará de ser un conjunto numerable. Este es el segundo resultado de Turing.

Sólo puede calcular un subconjunto numerable de los números reales bastante res-

⁸ El hecho de que algunos de todos los programas no tengan sentido no invalida el resultado, si quisiéramos los podría 'tachar' sin cambiar la numerabilidad del conjunto.

tringido y bien definido. Por cierto que la demostración que hemos hecho es una demostración indirecta y no es una demostración constructiva. Turing, además, construyó ejemplos de números no computables. No es fácil dar ejemplos de números no computables. La mayoría de los números con los que estamos acostumbrados a trabajar son computables: ' π ' es un número computable, ' e ' es un número computable, 'el logaritmo de 45' es un número computable. No voy a entrar en el ejemplo concreto que dio Turing porque nos llevaría un poco lejos de nuestro objetivo principal. Solamente vale la pena que retengan este primer resultado: hay números reales que no se pueden calcular ni ahora ni nunca, por razones técnicas.

La refutación de Popper

Vayamos ahora al segundo aspecto de esta presentación: Karl Popper. En 1934 Popper resolvió —o, por lo menos, empezó a resolver— un viejo problema de la Ciencia que venía desde la antigüedad. El problema tenía que ver con las leyes físicas de origen experimental. Observen, por ejemplo, que en la concepción Platónica no tenía sentido pensar que las leyes físicas fueran experimentales; simplemente las leyes eran el reflejo de un mundo perfecto donde las cosas sucedían siempre de la misma manera. En el mundo en el cual vivimos las cosas son diferentes. Esto llevaba, precisa-

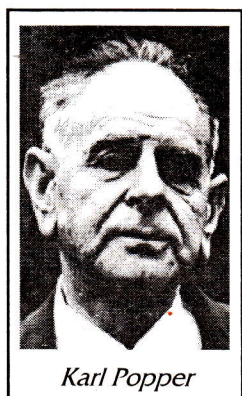
mente, a ese procedimiento deductivo que emplearon los griegos para toda su presentación de la Ciencia.

Todavía en épocas de Galilei, a pesar de que —les repito— era un gran experimentador, no había podido librarse de la

pregunta epistemológica: ¿por qué eran válidas sus leyes? ¿Por qué la todos los cuerpos caen a igual velocidad, independientemente de su masa? Lo único que Galilei podía hacer era tomar como punto de partida algunos axiomas y de allí construir teorías.

En los tiempos de Newton el problema tenía tal magnitud, Newton había encontrado tal cantidad de resultados experimentales que el problema adoptaba características casi escandalosas: ¿por qué se podían encontrar leyes experimentales? La respuesta que se daba en el siglo XVIII —que fue la única respuesta más o menos coherente— fue ésta: las leyes experimentales no son deductivas —como los teoremas geométricos— sino que son leyes **inductivas**.

El procedimiento inductivo consistía en experimentar con una piedra, observar su conducta en la caída, repetir el experimento con otra, con diez, con cuantas desee. Entonces llego a la conclusión que con todas las que experimenté 'da lo mismo' y de allí **realizo la inducción** que este resultado es válido para todas las piedras en todas las condiciones. Esto es lo que se llamaba una ley inductiva o una ley experimental. Y ahí quedó la cosa. Lo que se hacía era tener confianza, que si repito la experiencia tres, cinco, quince y me da lo mismo entonces estoy en presencia de una ley. Eso es lo que decían los empiristas ingleses en los tiempos de Newton y era bastante poco creíble. Lo que es peor, todavía se sigue repitiendo muy a menudo que los científicos piensan que una ley natural obedece al hecho de que lo experimentado un cierto número de veces y permite convenirse que es un resultado de carácter general. Es otra forma de pensamiento Platónico: las instancias de un experimento, son instancias de algo abstracto que está detrás y que obliga a la realidad a que se comporte de esa manera. No tengo más remedio, para creer en la inducción, en creer en

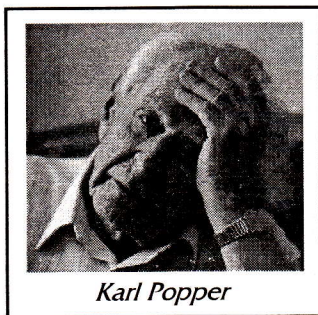


Karl Popper

un orden universal [DyL2]detrás del cual se encuentran los fenómenos. Los cuerpos caen siempre de la misma manera porque hay un 'buen Dios' que los hace caer de la misma manera. Démosle el nombre que le demos, ésa es la idea que tenemos.

A medida que nos internamos en el siglo XX esta idea resultó cada vez más chocante para mucha gente. A principios de siglo se plantearon otras alternativas a esta idea de 'estar descubriendo los secretos de Dios'. Uno de ideas más interesantes que se planteó fue el llamado Principio de Economía de Pensamiento que sostenía que no existen las leyes experimentales. Lo que nosotros llamamos leyes son maneras breves, o cómodas, o expresivas de enunciar un resultado físico, solamente buscamos la economía del pensamiento. Esta manera de pensar no era demasiado alejada de lo que sostenía Poincaré: las leyes, en definitiva, son resultados convencionales; cuando observo una piedra y veo que cae con aceleración constante tengo una explicación, pero cuando observo una hoja de papel que no cae de la misma manera tengo otra explicación. En definitiva, elijo la explicación que más me conviene para cada caso y se acabó. El conocimiento científico es convencional y económico, nada más.

Otros sostenían que el Principio de Economía se basaba en los famosos enunciados del camino mínimo de la luz y todos los 'enunciados de mínimo' de la física que se descubrieron a fines del siglo XIX. Por extensión, se suponía que las leyes físicas eran el resultado de un Principio de Mínima Economía⁹. El problema epistemológico quedó sin resolver. Por cierto que cuando vino la catástrofe de la física de la materia,



Karl Popper

entre 1905 y 1930, el problema fue bastante grave, porque era bastante difícil explicar que pasaba. ¿Por qué el mundo microscópico parecía

contradecir las leyes del mundo macroscópico? ¿Por qué había que crear leyes nuevas para la mecánica? ¿Por qué eran abiertamente contradictorias con lo conocido? Los resultados del mundo subatómico eran sorprendentes. La discontinuidad de la materia era sorprendente. El haber descubierto que la materia era discreta, que la electricidad era discreta, luego que la energía era discreta y, finalmente, que la luz era corpuscular, era una catástrofe tras la catástrofe.

Todo esto motivó a que se pensara nuevamente en ¿qué eran las leyes experimentales? Este es uno de los grandes resultados que debemos a Karl Popper, también en los treinta. El aporte de Popper a la teoría de la ciencia se puede separar en dos grandes ideas importantes. La primera idea consiste en separar claramente lo que podemos llamar afirmaciones de tipo científico de lo que podemos llamar afirmaciones de tipo filosófico o metafísico. Son dos mundos que no tienen nada que ver, que son irreconciliables. Hay afirmaciones que se pueden catalogar como de la familia de las afirmaciones científicas y hay afirmaciones que se pueden catalogar de la familia de las afirmaciones filosóficas, políticas, opiniones, o lo que quieran. La diferencia fundamental está en un solo hecho: para que una afirmación pertenezca a la 'colección' de las afirmaciones científicas **debe ser refutable**. Si se enuncia una ley que no hay ninguna manera de refutarla, entonces esa afirmación es metafísica. La típica afirmación «Dios existe» es una afirmación que no

⁹ La mayoría de las leyes físicas se pueden enunciar como un principio de mínima «acción». Aquí no hay ningún misterio, solamente quiere decir que las ecuaciones diferenciales se pueden presentar como un problema de cálculo de variaciones.

admite refutación. No hay ninguna manera de diseñar un experimento que permita decidir si Dios existe o no. El carácter de la Ciencia está dado por el hecho de que se pueda diseñar un experimento en el cual pueda decir 'tiene que pasar esto' y este resultado se tiene que poder comprobar o verificar que no ocurre. De modo que la posibilidad de refutar es la posibilidad de construir Ciencia.

Esto no es tan fácil en la realidad. Imaginen, por ejemplo, el caso de la gravitación universal. El enunciado de Newton existe dice que existe atracción entre dos masas cualquiera. La pregunta ahora es ¿éste es un enunciado científico o metafísico? Cuando lo enunció Newton tenía todo el aspecto de un enunciado metafísico y por eso Newton tenía tanto temor en enunciarlo, sentía que estaba pisando un terreno resbaloso¹⁰. Pero esta situación de duda duró muy poco tiempo: un siglo después Cavendish, en el laboratorio, logró hacer una balanza de torsión, experimentar y medir la atracción de Newton. A llevar el terreno a un experimento de laboratorio, la afirmación pasó a ser refutable: si hago una balanza con masas de tantos kilos de plomo, las ecuaciones me dicen que tengo que poder medir si existe o no existe la atracción universal. Diseñó la balanza, armó todo el experimento y comprobó que la atracción existía y valía lo que Newton había estimado.

Cavendish **no demostró** la ley de Newton, lo que hizo fue realizar una experiencia que permitía refutar la afirmación de que existía la Gravitación Universal. Hizo dos cosas simultáneamente. Demostró que el enunciado de Newton sobre la gravitación no era un enunciado filosófico sino que era un enunciado físico porque se podía

someter a una refutación experimental. Lo puso en una 'situación de refutación' porque 'si Newton tiene razón, la balanza se va a torcer'. En segundo lugar, realizó el experimento y comprobó que la balanza se torció. El resultado fue notable: **no fue refutada** una afirmación que podía haber sido una refutación de la Gravitación Universal. El carácter que tienen las leyes científicas válidas es que no han sido refutadas todavía; toda ley científica es algo provisorio. La visión de Popper puede resumirse así: **ley científica es aquello que es refutable y que todavía no ha sido refutada**. Este es un punto de vista extraordinariamente importante, que afirma que las leyes son enunciados que tarde o temprano, tal vez, serán refutadas.

El hecho que se descubra, con la Gravitación Universal, la existencia del planeta Neptuno o que se lance un satélite artificial o que la navegación de las cápsulas Apolo sigan las leyes de Newton son experimentos que actúan como 'no refutaciones'. Si se hace el experimento y la curva que sigue la cápsula Apolo no da lo que se espera, entonces esto podría llegar a ser una refutación de la Gravitación Universal. Naturalmente, si esto ocurriese, lo que van a hacer primero los científicos es ver si no hay algún otro fenómeno que está interfiriendo en el experimento. Esto pasó, por ejemplo, con el descubrimiento de Neptuno: un movimiento 'irregular' de algún planeta permitió suponer que podría haber otro planeta que lo estaba interfiriendo. Al encontrar un planeta mediante los telescopios, en el lugar que predecía la gravitación de Newton, mostró que no había sido refutada la Gravitación Universal. Pero podría no haber sido así.

Un ejemplo contrario es el caso del corrimiento del perihelio de Mercurio. Esta observación sí es una refutación de la Gravitación de Newton y es uno de los grandes triunfos de la Relatividad General. Esta es una de las reducidas experiencias que pue-

¹⁰ «No hago hipótesis» es la célebre frase de Newton, que parece desmentir la hipótesis de la gravitación universal.

den demarcar entre una y otra teoría, entre la Gravitación Universal de Newton y la Gravitación Universal de Einstein.

Leyes físicas y computabilidad

Ahora tenemos todos los elementos para intentar juntar estos dos resultados de los 'años treinta': la teoría de los autómatas de Turing y la teoría de la refutabilidad de Popper. Una de las primeras hechas que podemos observar es que, asombrosamente, **todas las leyes físicas son computables**. Nunca hemos encontrado una ley física que trabaje con números no computables.

Para tranquilizarlos un poquito más podemos recordar que los números computables son todos aquellos que se pueden calcular por recurrencia; número es computable si existe una expresión de recurrencia que lo permita calcular. Obtener una expresión de recurrencia es lo mismo que escribir un programa de computadora porque ¿qué es un programa sino una operación de recurrencia?. Todos ustedes saben, por ejemplo, que ' π ' o ' e ' tienen expresiones de recurrencia. También saben que todas las funciones que admiten un desarrollo en serie tienen una expresión de recurrencia¹¹. Las ecuaciones diferenciales son expresiones incrementales, esencialmente tienen una expresión por recurrencia. Con las expresiones de recurrencia fue que se calcularon ' π ' o ' e ' con la aproximación que se desee; también así se calcularon las tablas de logaritmos o de trigonometría y así trabajan los programas de las calculadoras electrónicas. En fin, todos los resultados que conocemos se obtuvieron por ecuaciones de recurrencia. Está muy en el

fondo de la cuestión científica la identidad entre de la computabilidad y la recurrencia.

Felizmente, hasta ahora no hemos encontrado nada en el mundo físico que no sea calculable por recurrencia o computable. Observen, inclusive, que cuando se dice que el Universo se guía por ecuaciones diferenciales, en el fondo se está diciendo que hay una fórmula de recurrencia detrás, porque la ecuación diferencial es algo que se resuelve a partir de valores iniciales con una ley que permite avanzar 'de a poquito'. De modo que decir el Universo se rige por ecuaciones diferenciales es 'respirar tranquilo' y asegurar que hay soluciones de recurrencia y, por lo tanto, computables.

Observen de qué manera 'perversa' se juntan todas las cosas, con esta perspectiva, para decirnos 'hasta ahora ha marchado todo bien'.

Ahora yo quiero enunciar la tesis central de esta exposición: **afirmo que el Universo es esencialmente discontinuo en todos sus aspectos**. Por supuesto, esta afirmación la hago a título absolutamente gratuito, pero no es demasiado distinta a lo que vienen descubriendo los físicos a lo largo del siglo XX cuando debieron cuantificar la energía, la masa, la electricidad, la luz y casi todas las cosas que encontraban al estudiar la materia. Digo un poco más, la afirmación de que el Universo es discontinuo es una afirmación de tipo científico, no es una afirmación filosófica. ¿Por qué? Porque de acuerdo con el criterio de demarcación de Popper es una afirmación que puede ser refutada. La afirmación 'el Universo es discreto' es una afirmación refutable, porque el día que se encuentre una ley que no se pueda calcular por recurrencia se habrá demostrado que era falsa la afirmación de que el Universo era discreto. La afirmación que el Universo está cuantificado es una afirmación de tipo físico que puede ser refutada, o que será refutada el día que se encuentre una ley física que conduzca a una

¹¹ En particular, casi todas las funciones que se emplean en la física pueden desarrollarse en serie de potencias, son funciones analíticas.

expresión no computable, o sea, que no permita ser calculada por recurrencia. Mientras tanto nadie puede objetar mi afirmación de que el Universo no es continuo.

Pero la Ciencia no sólo trabaja con la idea de la refutación sino que también utiliza la idea de la construcción. Observen, por ejemplo, que la Mecánica Cuántica está a favor de la tesis de que el Universo es discreto. Observen las consecuencias de esa afirmación. Observen que todos esos fenómenos continuos que se estudian por ecuaciones diferenciales en el fondo deben ser discretos. Si obedecen a ecuaciones diferenciales que me permiten escribir expresiones de recurrencia se están 'traicionando' que vienen de algo discreto¹².

Pero en este Universo supuestamente continuo pasan cosas siniestras. Hace unos pocos años se completó el llamado último teorema de Fermat: demostrar que no era posible conseguir soluciones enteras para la ecuación $a^n + b^n = c^n$ con n mayor que 2; una especie de 'super teorema de Pitágoras' entre números enteros. La demostración de imposibilidad exigió pasar por una artillería una artillería enorme de análisis en el campo continua. Hasta el momento no se ha logrado encontrar una demostración de la falsedad del teorema de Fermat que no salga de los números enteros. Estamos rodeados de 'perversiones' que nos obligan, en un Universo discreto, a trabajar con ecuaciones diferenciales y demostrar teoremas de teoría de números mediante funciones analíticas que —presumiblemente—

no necesitamos. Estamos viviendo en un mundo perverso, con la óptica de Turing y de Popper. Parece que estamos introduciendo el continuo, una idea innecesaria, lo estamos introduciendo todo el tiempo y tal vez no somos conscientes de ello.

Es necesario dejar en claro que ninguno de estos argumentos anteriores permiten **reforzar** la verdad de la tesis de que el Universo es discreto. El hecho de que no hayamos encontrado nunca una ley no computable no permite adelantar nada en el sentido de decir 'el Universo es discreto'. No hay una manera argumentativa de fundamentar la Ciencia. No se puede demostrar algo por acumulación de pruebas. La famosa idea de los empiristas de que 'hago el experimento con una piedra y tengo un caso favorable, lo hago con otra, lo hago 50 y tengo 50 casos favorables', no refuerza la teoría de la caída de los cuerpos, porque éste no es el mecanismo de la ciencia. Lo que estoy haciendo con la reiteración del experimento es 'otra vez no la refuté', pero no estoy reforzando la tesis principal. A pesar que, psicológicamente, cada vez que 'compruebo' una ley me siento más tranquilo, eso es sólo una cuestión psicológica y no científica.

Crear que acumulando casos favorables obtengo verdades sólo lo creen los estadísticos. Este tipo de «verdades estadísticas» son enunciados sumamente dudosos y que no tienen teoría aceptable. A principios de siglo, Poincaré decía 'los físicos utilizan la estadística porque creen que es un teorema matemático, los matemáticos estudian la estadística porque saben que a los físicos les sirve'. Esto sigue siendo absolutamente cierto. Hasta el día de hoy, si uno le pregunta a un estadístico ¿qué pasa con la distribución normal? le va a decir 'es una cosa que tiene mucha aplicación en la práctica' Si le preguntan a un profesional de las encuestas —alguien que usa permanentemente esos resultados— va a decir 'hay una teoría, hay libros enteros sobre el tema'.

¹² Esto es más que una afirmación retórica. Cuando se comenzó a formalizar la mecánica cuántica se intentaron dos caminos diferentes. Schrödinger escribía ecuaciones diferenciales de la «onda material», Heisenberg escribía matrices infinitas, pero discretas, con propiedades algebraicas. Finalmente se demostró que los dos caminos eran matemáticamente equivalentes. Dirac, al formalizar la mecánica cuántica, emplea un formalismo algebraico, propio de un análisis discreto.

Pero nadie, nunca, pudo dar algún argumento de tipo científico de 'por qué todo eso funciona' Esta observación se aplica, inclusive, a la Mecánica Cuántica: no hay todavía una razón para decir por qué la Física de la materia, en su expresión última, es de tipo estadístico¹³.

Este tema está todavía está abierto. La teoría de si es cierto de que las leyes se refuerzan por acumulación de casos es algo que, por el momento, no tiene respuesta desde el punto de vista filosófico ni desde el punto de vista científico. De modo que, por más que hayamos acumulado cientos y cientos o miles de casos de leyes que se calculan por recurrencia, eso no quiere decir que hemos avanzado en demostrar la tesis de que el Universo es discreto. Lo único que hemos demostrado hasta ahora es que la afirmación **'el Universo es discreto' es refutable pero todavía no ha sido refutada.**

Podemos recordar al viejo Zenón de Elea y su paradoja de Aquiles y la tortuga. La paradoja no está bien porque se trata solamente de sumar una serie convergente, pero la idea que está atrás podía no estar mal. La idea de que Aquiles no podía alcanzar a la tortuga se basaba en el hecho

de que Zenón no sabía que una suma infinita se podía sumar. Nosotros sabemos que se puede sumar y que es un número computable. Hay leyes físicas que dicen que Aquiles alcanza a la tortuga porque esa serie es sumable y computable. También podemos afirmarlo porque es un problema elemental de movimiento rectilíneo. Pero, tal vez, en el fondo, Zenón continúa teniendo razón si el Universo es discreto en todos sus aspectos: entonces podemos tener muchas más sorpresas y también el hecho que Aquiles no alcance a la tortuga¹⁴.

Todo este tema era un pretexto para primero presentarles el resultado de Turing a cerca de los números computables, que creo es una cuestión que es necesario conocer, entender y divulgar, porque es un resultado muy importante. En segundo lugar, presentar el enunciado de Popper acerca de la refutación y del carácter de las afirmaciones científicas, porque es otro enunciado importante que es necesario conocer y divulgar. Éstos fueron los pretextos que elegí para no salirme demasiado de los temas que razonablemente podía tratar y poder hablar en un ambiente de Física que me recuerda viejos tiempos muy gratos.

¹³ Esa duda la ha compartido mucha gente. Está la famosa afirmación (repetida hasta el cansancio) de Einstein 'Dios no juega a los dados'.

¹⁴ Supongamos que la velocidad de la tortuga (o la de Aquiles) fuese una magnitud no computable, en este caso tendríamos serias dudas acerca de la paradoja de Zenón.

¿A qué se llama el "principio de la sepia"?

La sepia es una de las criaturas más antiguas que han sobrevivido. Se mueve absorbiendo agua y emitiéndola después violentamente por un "tubo de escape" posterior que, doblándose, le permite moverse en todas direcciones.

Es el principio del vuelo a reacción: los aviones aspiran el aire, lo comprimen, lo calientan mediante el carburante y lo expelen en un chorro potentísimo.

Fueante: Peter Kolosimo: "Ombre sulle stelle" (1966)

EL ESPEJO QUE REVIERTE EL TIEMPO

CONJUGACIÓN DE FASE

APLICACIONES A LA ÓPTICA Y LA ACÚSTICA

Ismael Núñez

I. P. A.

Resumen. Gran parte de las ecuaciones fundamentales de la Física contienen solamente la derivada segunda respecto del tiempo (la segunda ley de Newton es un ejemplo). Esto significa que el cambio de la variable 't' por '-t' en las soluciones, proporciona otras soluciones igualmente aceptables. En la última década, esta consecuencia teórica ha sido llevada a la práctica con enorme éxito en los temas vinculados a la propagación de ondas electromagnéticas y acústicas. Se han obtenido dispositivos realmente asombrosos y de gran utilidad, que permiten, por ejemplo, corregir las aberraciones de los telescopios casi hasta el límite de la difracción, o enfocar el sonido y el ultrasonido en una pequeña región del espacio seleccionada a voluntad, en medio de una zona altamente perturbadora de las vibraciones (como el cuerpo humano).

1. Introducción

La posibilidad de poder reproducir el pasado tal y como fue ('volver al pasado'), ha sido siempre un semillero de discusiones para los físicos y los epistemólogos.

Esta 'reproducción de la película al revés' (hacer que un sistema físico involucre por el mismo camino por el que evolucionó) es posible, en principio, para todos los sistemas físicos regulados por ecuaciones con solamente derivadas pares respecto del tiempo. Tal es el caso, por ejemplo, de la segunda ley de Newton $F = m d^2x / dt^2$.

No obstante, esta posibilidad ha sido abandonada en lo que respecta a los sistemas mecánicos con muchas partículas, a

pesar de la reversibilidad de la ley de Newton para cada partícula individual. Aquí no se observa la reversibilidad por el gran número de grados de libertad del sistema. Un simple cálculo de probabilidades de la Mecánica Estadística asegura la 'imposibilidad' de que las partículas regresen todas por los mismos caminos hasta sus estados iniciales.

Sin embargo, existe otra ecuación de la Física que también contiene solamente la derivada segunda respecto del tiempo, y es aplicable justamente a medios macroscópicos (no a las partículas individuales): la ecuación de ondas.

Supongamos una magnitud escalar o vectorial $\phi(x, y, z, t)$ que dependa de la posición y del tiempo (desplazamiento o velocidad de las partículas en un medio material, campo eléctrico o magnético, presión acústica, potencial, etc.), y obedezca a la ecuación de ondas

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

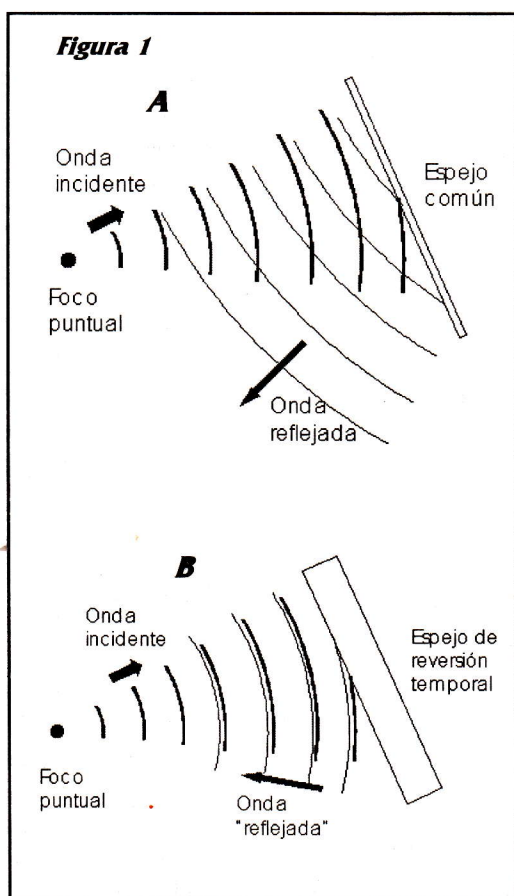
donde c es la velocidad de propagación de la perturbación en el medio (que puede depender de la frecuencia si el medio es dispersivo).

Por la presencia de la derivada segunda en (1), esto es, el tiempo al cuadrado, sabemos que si $\phi(x, y, z, t)$ es solución de (1), también lo es $\phi(x, y, z, -t)$.

Esta sustitución de t por $-t$ en la función ϕ es un poco más sutil de lo que parece. No significa que podemos tener ondas viajando de derecha a izquierda y de izquierda a derecha (lo cual se obtiene simplemente por reflexión), sino que podemos tener una onda con idéntica forma (igual dependen-

cia de x, y, z) a la que viajaba hacia adelante, pero yendo hacia atrás. Exactamente como si se pasara la película al revés. A este proceso se la llama 'reversión temporal'.

Ejemplificaremos esta importante diferencia. La figura 1A muestra la acción de un simple espejo ante las ondas de luz que provienen de un foco puntual. Si el espejo es plano e inciden ondas esféricas, se reflejan ondas esféricas pero con la concavidad cambiada (sus frentes de onda no se pueden superponer con los incidentes). La figura 1B muestra la acción de un 'Espejo de reversión temporal' o de 'Conjugación de fase'. La onda vuelve exactamente con la forma con que incidió, no se cambia la concavidad. Esto equivale a cambiar solamente el signo del tiempo en la solución de (1).



La figura 1 es aplicable también a las ondas acústicas. El 'espejo común' sería entonces cualquier superficie lisa con un cambio brusco de impedancia (un sólido en agua o aire, la superficie libre de un líquido, etc.).

2. Representación de una onda

En la figura 2A se representa una onda óptica o acústica monocromática de frecuencia ω que viaja aproximadamente colimada en la dirección del vector de onda $\mathbf{k}$. Esta onda puede describirse como

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0(\mathbf{r}) \cos[\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi(\mathbf{r})] \quad (2)$$

La magnitud E_0 es una cantidad real y positiva llamada amplitud real del campo ondulatorio, y, en general, depende de la posición $\mathbf{r}$. Por ejemplo, en una onda divergente la amplitud E_0 disminuye a medida que se propaga. En una convergente, E_0 aumenta. Cuando E_0 depende de la posición (o del tiempo), se dice que la onda está modulada en amplitud.

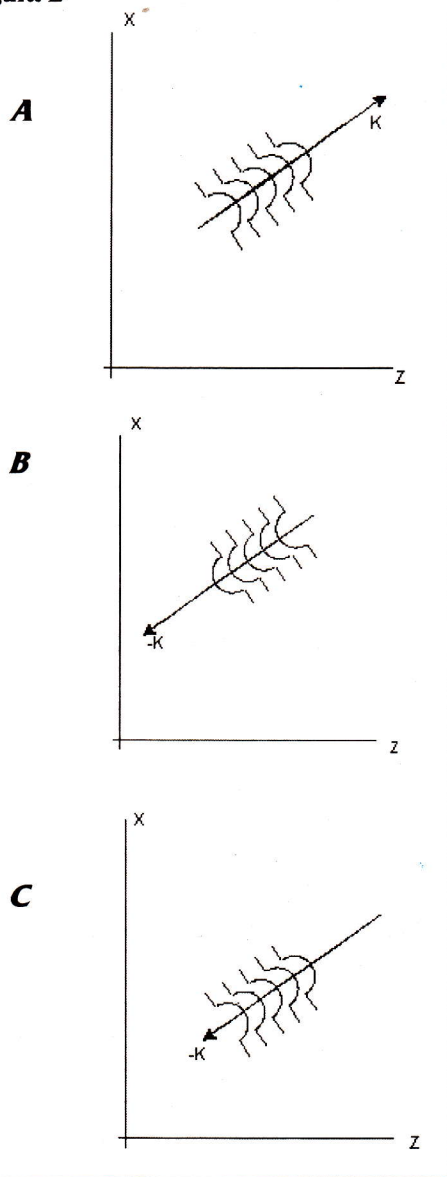
La magnitud angular ϕ también depende de la posición. Es real y puede ser positiva o negativa. Esta cantidad determina la forma de los frentes de onda, si ella es constante los frentes son planos (que no es el caso de la figura 2A). Todo el argumento del coseno en (2) se llama *fase total de la onda*. En tanto que al ángulo ϕ se le llama *fase inicial* de la onda. Cuando ϕ depende de la posición (o del tiempo), se dice que la onda está modulada en fase.

La figura 2B representa la reflexión de la onda de la ecuación (2) en un espejo común. El resultado es una rotación en 180° de la onda de la figura 2A.

Obsérvese que esta onda reflejada se obtiene de la expresión (2) con el solo cambio del vector de ondas $\mathbf{k}$ por $-\mathbf{k}$. Esto es:

$$E_R(\mathbf{r}, t) = E_0(\mathbf{r}) \cos[-\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi(\mathbf{r})] \quad (3)$$

Figura 2



La figura 2C muestra el resultado de aplicarle a la onda de la expresión (2) (figura 2A) el proceso de reversión temporal (cambiar t por $-t$). Su descripción es:

$$E_{RT}(\mathbf{r}, -t) = E_0(\mathbf{r}) \cos[\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \omega t + \phi(\mathbf{r})] \quad (4)$$

Debido a la igualdad $\cos(\alpha) = \cos(-\alpha)$, la onda revertida temporalmente (4) también puede escribirse como:

$$E_{RT}(\mathbf{r}, t) = E_0(\mathbf{r}) \cos[-\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t - \phi(\mathbf{r})] \quad (5)$$

Obsérvese entonces que la diferencia entre la onda reflejada (3) y la revertida temporalmente (5) es un cambio de signo en la fase inicial ϕ . Ésta es la razón por la cual al proceso de reversión temporal se le denomina también *conjugación de fase*.

3. Conjugación de fase óptica

El proceso óptico de conjugación de fase se efectúa mediante el mismo proceso de construcción de hologramas.

Un holograma se construye a partir de un material transparente y sensible a la intensidad luminosa, ya sea porque la intensidad cambie el índice de refracción (como en los cristales foto-refractivos) o produzca una alteración de la transparencia (un ennegrecimiento, como en las películas fotográficas).

En el caso más simple de holografía con película fotográfica, supongamos que una película diapositiva no expuesta a la luz luego de revelada queda totalmente negra, evitando completamente el pasaje de la luz. Decimos que tiene transparencia nula $T=0$.

Por el contrario, cuando se expone a cierto valor máximo de intensidad I_0 se vuelve totalmente transparente luego de revelada. Decimos que tiene transparencia máxima $T=1$.

En general, cada punto (x, y) del plano de la película, que ha recibido una intensidad luminosa $I(x, y)$ entre 0 e I_0 , presentará, luego de revelada una transparencia:

$$T(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0} \quad (6)$$

Si el material del filme tiene un índice de refracción uniforme y sus caras son paralelas, no resulta modulada la fase de la luz que lo atraviesa, sino sólo su amplitud de acuerdo con (6). Supongamos un campo óptico $E_{in}(x, y, z, t)$ que viaja en la dirección

del eje z e incide sobre la transparencia en $z=0$, cuya función de transmisión está dada por (6). El campo óptico a la salida de la transparencia (supuesta de espesor despreciable) en $z=0$, está dado por

$$E_{out}(x,y,0,t) = T(x,y)E_{in}(x,y,0,t) \quad (7)$$

Construcción del holograma

La placa holográfica se graba como indica el esquema de la figura 3A, haciendo interferir sobre la misma un haz monocromático plano de referencia R en la dirección k_R , y un haz de señal S de igual frecuencia, que proviene del objeto en observación en la dirección k_S . Supongamos

que ambos haces tienen la misma amplitud constante A , y que el haz de señal S está modulado en fase (sus frentes de onda no son planos). Estos haces se representan como

$$R=A\cos(k_R.r-\omega t) \quad S=A\cos(k_S.r-\omega t+\phi) \quad (8)$$

El resultado de la interferencia de ambos haces sobre el plano de la película es $E=S+R$. Construyendo un diagrama fasorial para sumar ambas ondas y aplicando el teorema del coseno, obtenemos una amplitud resultante

$$E_0 = A \sqrt{2+2\cos[(k_S-k_R).r+\phi]} \quad (9)$$

Las intensidades luminosas son proporcionales al cuadrado de las amplitudes. Elevando la (9) al cuadrado tenemos, para la intensidad luminosa resultante,

$$I = 2I_A[1+\cos[(k_S-k_R).r+\phi]] \quad (10)$$

donde I_A es la intensidad correspondiente a cada haz incidente en (8).

Según (10) la máxima intensidad es $I_0=4I_A$, por lo que la función de transmisión (6) en la película es

$$T = \frac{1}{2} \{1+\cos[(k_S-k_R).r+\phi]\} \quad (11)$$

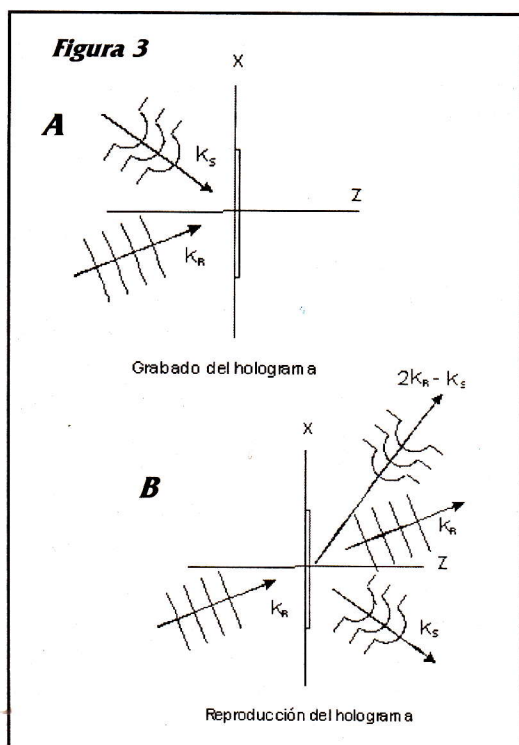
Reproducción del holograma

La figura 3B muestra lo que sucede si iluminamos la placa holográfica revelada con el mismo haz de referencia R que se usó en el grabado. Del lado derecho de la placa tendremos un campo óptico E_{out} que es el producto del campo incidente R por la función de transmisión T . De acuerdo con la ecuación (11), será:

$$E_{out} = TR = \frac{1}{2} \{1+\cos[(k_S-k_R).r+\phi]\} A\cos(k_R.r-\omega t) \quad (12)$$

Efectuando este producto, tenemos el resultado:

$$E_{out} = \frac{A}{2} \cos(k_R.r-\omega t) + \frac{A}{4} \cos(k_S.r-\omega t+\phi) + \frac{A}{4} \cos[(2k_R-k_S).r-\omega t-\phi] \quad (13)$$



Los tres términos del segundo miembro de (13) están representados en las tres ondas transmitidas en la figura 3B. El primero es la propia onda incidente R que continúa del otro lado. El segundo término es la continuación de la señal incidente S que estaba cuando se grabó el holograma, con su fase original. Finalmente, el tercer término de (13) es una onda que lleva la conjugada de S en la dirección $2k_R - k_S$.

A los efectos de la reproducción holográfica, el término útil es el segundo de (13), que reproduce la señal incidente S con la que se grabó el holograma, y hace que el objeto que la emitió se vea virtualmente al mirar la placa holográfica desde la derecha en la figura 3B.

El holograma como conjugador de fase

Para nuestros intereses, la placa holográfica puede ser utilizada como conjugador de fase (o espejo de retorno temporal) del haz de señal S utilizado para construirlo en la figura 3A.

La figura 4 ilustra la situación en que se ilumina la placa revelada pero desde el lado derecho (vector de onda $-k_R$) con el haz de referencia R . El campo óptico de salida, ahora a la izquierda de la placa, será

$$E_{out} = TR = TAcos(-k_R \cdot r - \omega t) \quad (14)$$

Sustituyendo en (14) el valor de T de (11), y efectuando el producto, resulta:

$$E_{out} = \frac{A}{2} \cos(k_R \cdot r - \omega t) + \frac{A}{4} \cos(-k_S \cdot r - \omega t - \phi) + \frac{A}{4} \cos[(k_S - 2k_R) \cdot r - \omega t - \phi] \quad (15)$$

Los tres términos del segundo miembro de (15) están representados por las tres ondas emergentes a la izquierda de la placa holográfica en la figura 4.

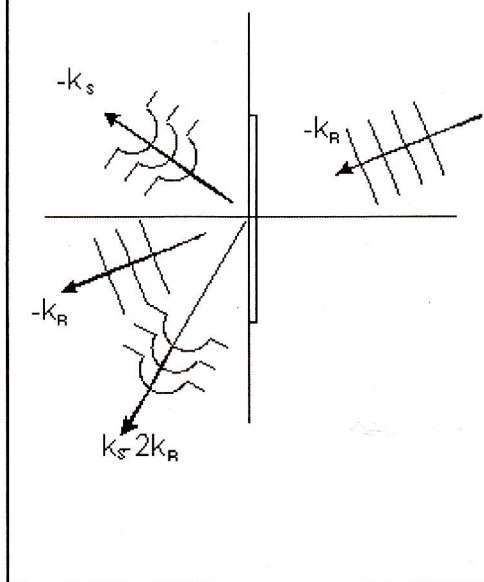
El primer término es la continuación de la onda R incidente en la dirección $-k_R$. El tercer término de (15) no es útil a nuestros propósitos, y representa la onda S que sale en la dirección $k_S - 2k_R$. El segundo término es el que representa exactamente la conjugada de la onda S viajando en la direc-

ción $-k_S$, opuesta a la dirección original de incidencia. Es, por lo tanto, la reversión temporal de la misma.

Holografía dinámica. Cristales foto-refractivos

El gran inconveniente del proceso holográfico antes mencionado es el requerimiento de dos etapas, necesariamente separadas en el tiempo. Primero hay que grabar la placa holográfica con el haz de

Figura 4



señal que se desea conjugar y el haz de referencia plano. Luego hay que revelar la placa, volver a situarla en el mismo lugar relativo a los haces originales, y finalmente utilizar el haz conjugado del de referencia para generar el haz de señal conjugado en fase.

Esto significa, de una parte, que la placa holográfica fabricada resulta útil para un único haz de señal. De otra parte, no se puede trabajar en tiempo real. Es decir que no se puede conjugar el haz S a medida que va llegando, sino que hay que esperar el proceso de revelado. Estos inconvenientes no hacen demasiado útil el proceso holográfico tradicional para conjugar ondas luminosas.

Felizmente, se han descubierto y desarrollado en las últimas dos décadas ciertos materiales cristalinos transparentes llamado foto-refractivos. Estos cristales tienen la propiedad de cambiar su índice de refracción localmente con la intensidad de la luz, de forma que la interferencia de dos ondas en su interior produce una modulación espacial en el índice de refracción, que sigue las modulaciones de intensidad luminosa debidas al patrón de interferencia.

Este proceso equivale a la grabación de un 'holograma dinámico' (en el índice de refracción) en el interior del cristal. Si alguno de los dos haces que interfieren cambia

su forma de onda o intensidad, el holograma también cambia, con tiempos de respuesta que van desde algún microsegundo hasta varias horas, según el cristal utilizado.

La gran ventaja de este proceso, es que se pueden efectuar simultáneamente tanto la escritura como la lectura del holograma. Entonces se obtiene la conjugación de fase S^* del haz de señal S en un mismo y único proceso simultáneo (en tiempo real). La figura 5 muestra una configuración en que se utiliza el mismo haz de referencia incidente R (que continúa luego de atravesar el cristal), para conjugarlo y generar la conjugación de fase S^* de la señal S que viene llegando al cristal desde la izquierda. Este es el propiamente llamado 'espejo de conjugación de fase' o 'espejo de reversión temporal'.

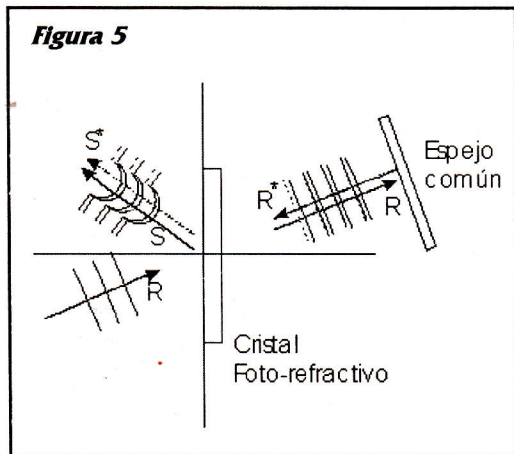
4. Conjugación de fase acústica

La reversión temporal de ondas acústicas, fundamentalmente con ultrasonido, ha sido estudiada y desarrollada principalmente en esta década por Mathias Fink y sus colaboradores en el Laboratoire Ondes et Acoustique de l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de Paris (Universidad de Paris 7).

La conjugación de fase con ondas acústicas se puede hacer sin necesidad de acudir a los procesos interferométricos. Esto evita tener que usar el haz de referencia R que se utilizó en la conjugación de fase óptica.

Esto es así debido al valor relativamente grande de las longitudes de ondas acústicas, en comparación con las ópticas. Un receptor (transductor) extenso de ondas acústicas puede estar formado por una gran cantidad de transductores pequeños individuales, cada uno de los cuales recibe parte del frente total de ondas, y lo puede procesar por separado (electrónicamente), y

Figura 5



luego reenviar la señal temporalmente invertida. Al cabo de pocos milímetros de distancia del transductor extenso, las pequeñas onditas generadas se unen para reconstruir un frente de onda conjugado del original incidente. La figura 6 ilustra el proceso de registro de la señal acústica a conjugar.

La ‘electrónica de reversión temporal’ de la figura 6, recibe las señales eléctricas individuales de los transductores y las reenvía temporalmente invertidas. Esto es, la primera señal en llegar será la última en salir.

Esto determina que se genere una serie de pulsos eléctricos de regreso, con el mismo perfil que en la figura 6, pero viajando hacia los transductores. Los pulsos genera-

rán una onda emitida que formará un frente idéntico al incidente, pero viajando en sentido inverso, como se ilustra en la figura 7. Este es el espejo acústico de conjugación de fase o de retorno temporal.

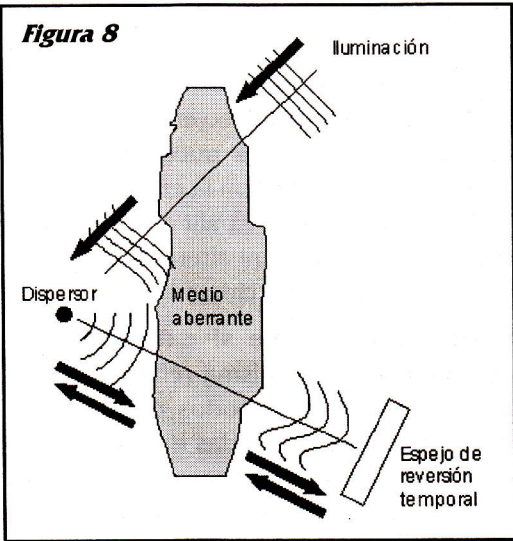
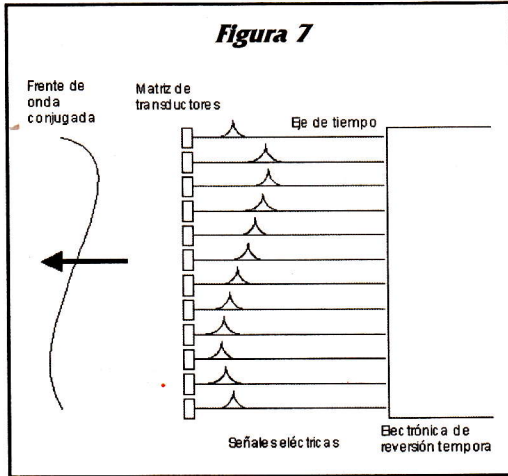
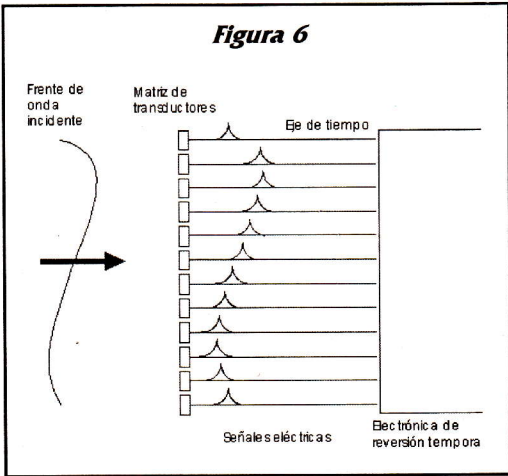
5. Aplicaciones

Focalizador de energía óptica o acústica

Potencialmente, los procesos de conjugación de fase óptica o acústica pueden tener una gran variedad de aplicaciones aún no descubiertas, y otras aún no exploradas suficientemente.

Las más populares, por el momento, son las posibilidades de focalización de las ondas en medios altamente distorsionantes de los frentes de onda. Supongamos, por ejemplo, que se ‘ilumina’ (con luz, sonido o ultrasonido) a través de una región muy heterogénea (un medio llamado ‘aberrante’), como ilustra la figura 8.

Supongamos que, en el interior de este medio aberrante, existe un pequeño dispersor de ondas, que se desea identificar. Este objeto dispersará parte de la radiación incidente, muy débilmente, convirtiéndose en un foco de ondas esféricas. Pero



estos frentes esféricos se deformarán de manera imprevisible al atravesar el medio aberrante. El registro de estas señales deformadas en el exterior hará muy difícil la localización del dispersor.

No obstante, se le aplica a estas ondas aberradas un proceso de conjugación de fase, y se las reenvía nuevamente al medio distorsionante. Por el mecanismo de funcionamiento del retorno temporal, estas ondas reenviadas con la fase conjugada se convertirán nuevamente en esféricas en la proximidad del dispersor, pero ahora convergentes hacia el mismo. El resultado de esto es que se logran focalizar las ondas exactamente sobre el dispersor a través de un medio que puede ser aleatoriamente distorsionante.

Lo notable de este proceso es que puede ser iterativo. Al recibir el dispersor el impacto de la onda focalizada, vuelve a emitir como un foco puntual de más intensidad, con lo cual se puede repetir el proceso de reversión temporal, y así sucesivamente. En cada instancia se van obteniendo radiaciones de potencia creciente que se focalizan sobre el dispersor, hasta lograr un cambio en el estado del mismo.

Por ejemplo, si se utiliza luz láser de potencia y el dispersor es una partícula sólida o líquida, se la puede fundir o vaporizar. Si se utiliza ultrasonido y la partícula es una piedra o depósito calcáreo en el interior del cuerpo humano, se la puede pulverizar (litotricia). Todo esto con la enorme ventaja de que la energía va allí a donde se la necesita, sin destruir ni alterar mayormente el resto del medio circundante.

Por supuesto que si existen varios dispersores con la misma reflectividad, el proceso los afecta a todos por igual. Es decir, las ondas generadas en cada proceso de retorno temporal se vuelven a focalizar sobre todos y cada uno de los dispersores.

Si existe algún dispersor con mayor reflectividad que los demás, la iteración del proceso hace que la energía se vaya incrementando en progresión geométrica sobre este dispersor, en detrimento de los demás. Por lo que éste resulta ser el primero en identificarse (o destruirse, si es el caso).

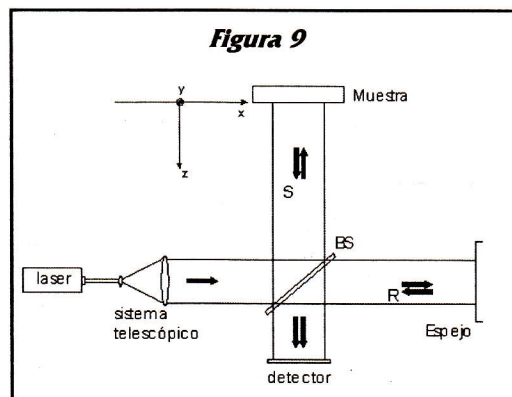
Eliminación de speckle en interferometría

La interferometría de campo extenso se utiliza, entre otras cosas, para observar una perturbación que varía con el tiempo sobre una superficie de prueba. Puede ser, por ejemplo, una vibración localizada, o un pulso de ondas que viaja sobre la superficie de un sólido o un líquido.

En la figura 9 tenemos un simple interferómetro de Michelson de campo extenso, utilizado para la observación de una vibración de amplitud $z(x,y,t)$ en un punto (x,y) de la superficie de la muestra M .

En el interferómetro de Michelson de la Figura 9 el sistema telescópico expande el haz hasta el diámetro deseado, generando un haz casi plano (limitado por difracción). De ahí el nombre de interferometría de campo extenso.

El divisor de haz BS lo divide en intensidades iguales. El haz que continúa hacia la derecha se refleja en un espejo plano de muy alta calidad óptica, y se refleja como frente plano. Es el haz de referencia R . La



otra parte del haz reflejado por **BS** a 90° incide sobre la muestra que contiene, por ejemplo, una perturbación vibratoria que viaja por la superficie (onda de superficie), la que se desea observar. Al reflejarse constituye el haz llamado de señal **S**.

Ambos haces se encuentran de regreso en el **BS**. Nos interesa la parte de **S** que sigue hacia abajo y la de **R** que se refleja hacia abajo. Ambos interfieren en la superficie del detector o pantalla, produciendo el campo óptico $E=R+S$.

Sea I_0 es la intensidad de cada uno de los haces del interferómetro, $k = 2\pi/\lambda$ el número de onda de la luz, y $u(x,y,t)$ es el campo de desplazamientos (estático o dinámico) de la superficie de la muestra (supuesto siempre $u \ll \lambda$). Eligiendo adecuadamente la diferencia de longitudes entre los brazos del interferómetro, la intensidad luminosa sobre el plano detector será [2]

$$I(x,y,t) = 2I_0[1 + 2ku(x,y,t)] \quad (16)$$

donde se ha explicitado el hecho de que los desplazamientos u , y por tanto la intensidad I dependen de la posición y el tiempo.

La relación (16) es lineal, y permite obtener los desplazamientos en la superficie de la muestra a partir de la medida de la intensidad de luz en el patrón de interferencia.

El principal obstáculo para la aplicación de la expresión (16) en un interferómetro de campo extenso, es que en ausencia de perturbaciones ($u=0$), el frente de onda del haz de señal debe de ser tan plano como el de referencia reflejado en el espejo de alta calidad óptica. Con esto estamos diciendo que la calidad óptica de la superficie de la muestra debe de ser muy alta, lo que no es posible en la prácti-

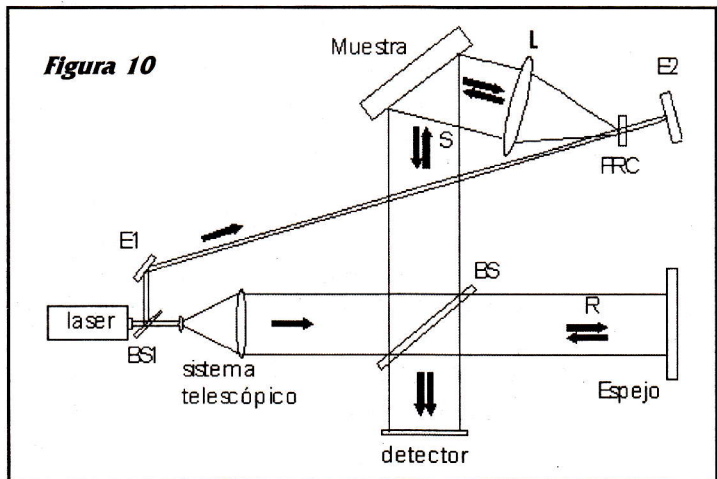
ca. La muestra es usualmente una pieza metálica común, que lo mejor que puede pulirse dista mucho de parecerse al espejo óptico usado como generador del haz de referencia en la Figura 9.

Las irregularidades inevitables en un proceso de pulido, dejan a la superficie de la muestra con una pequeña granulosidad, que determinan que la luz reflejada se difunda produciendo el llamado «speckle».

Nuevamente, el proceso de conjugación de fase óptica puede ayudarnos. Un haz plano que se refleja en una superficie granulosa sale distorsionado. Pero si se conjugó este haz y se lo vuelve a hacer incidir sobre la misma superficie, se refleja tan plano como el que incidió.

La Figura 10 presenta un esquema de un interferómetro con corrección de speckle, que utiliza un cristal foto-refractivo como conjugador de fase.

En la Figura 10, el haz que proviene del sistema telescópico y se refleja hacia la muestra, ya no es retornado directamente hacia el detector, sino que es concentrado sobre el cristal foto-refractivo **PRC** a través de la lente **L**. Este haz contiene sus frentes de ondas distorsionados por el speckle originado en las imperfecciones de la superficie de la muestra, y es utilizado para grabar el holograma sobre el **PRC**.



El otro haz necesario para la grabación del holograma es el haz plano obtenido directamente de la salida del láser mediante el divisor de haz **BS1** y el espejo **E1**. Estos dos haces que interfieren para grabar el holograma son, respectivamente, los haces **S** y **R** de la Figura 5.

El espejo **E2** de la Figura 10 genera el haz de lectura del holograma (haz **R*** en la Figura 5), que a su vez genera el haz conjugado en fase que retorna hacia la muestra (haz **S*** de la Figura 5). Este haz conjugado se refleja nuevamente sobre la superficie de la muestra en la Figura 10. Debido a la reversibilidad de las ondas, emerge como haz plano rumbo al detector, a pesar de las imperfecciones que pueda tener la superficie de la muestra.

Este sistema corrige todas las aberraciones estáticas o de lenta variación (vibraciones de ruido del sistema). Pero como el cristal foto-refractivo tiene una cierta «inercia» en su respuesta, no corrige las vibraciones de alta frecuencia, como son las ondas de superficie que producen los desplazamientos $u(x,y,t)$ sobre la muestra.

El resultado final de esto, es que el haz de señal **S** que retorna al detector en la Figura 10 es un haz esencialmente plano con

la única modulación de fase debido a los desplazamientos u que se pretende estudiar. Estamos entonces en las condiciones teóricas ideales para la validez de la ecuación (16) para el interferómetro.

Bibliografía

- [1] V.V. Shkunov y B. Ya. Zel'dovich. Conjugación de fase óptica. 'Temas', especial de la revista Investigación y Ciencia. N°6: La ciencia de la luz
- [2] E. Hecht, A. Zajac. Óptica. Fondo Educativo Interamericano, S.A. (1977). (Holografía, pp.521-533).
- [3] K. Iizuka. Engineering Optics. Springer-Verlag (1986). (Holography, pp. 187-222).
- [4] O.S.A., Handbook of Optics. Vol II, 2nd. Edition, McGraw-Hill (1995). Chap. 39 'Photorefractive Materials and Devices'.
- [5] G. Andersen, J. Munch, and P. Veitch. Applied Optics. Vol. 36(7), pp.1427-1432 (March 1997).
- [6] M. Fink. Time-reversal of ultrasonic fields - Part I: basic principles, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (UFFC). Vol. 39(5), pp. 555-566 (1992).
- [7] F. Wu, J.L. Thomas and M. Fink, Time-reversal of ultrasonic fields - Part II: experimental results, IEEE Trans. on UFFC. Vol. 39(5), pp. 579-592. (1992).
- [8] M. Fink. Revue du Palais de la Découverte. Images Ultrasonores. Vol. 18, N° 179 (juin 1990).

C & T

CIENCIA & TECNOLOGÍA

MATERIALES PARA LA EDUCACIÓN Y LA INVESTIGACIÓN

- LEYBOLD - CASSY
- VERNIER
- ENOSA - Óptica - Electricidad
- LEGO DACTA - Tecnología y Robótica

Solicite nuestra visita por el telefax 613 88 79
Alejandro Korn 1916 - c.p. 11 400 - Montevideo
e-mail: eoribect@chasque.apc.org

MISCELANEA

✓ FRITJOF CAPRA

Fritjof Capra, pionero del cambio del paradigma, es doctor en Física por la Universidad de Viena, Investigador en el campo de las altas energías en las facultades de París, Berkeley y Standfordt.

Ha difundido enormemente los conceptos de "nuevo paradigma", "ecología profunda", "ecoltura" y "sostenibilidad" como alternativa a los deteriorados modelos actuales de sociedad y civilización (incluso desde el cine).

Es fundador y presidente del Elmwood Institute de Berkeley, dedicado básicamente a implantar la ecoltura a distintos niveles del estrato social, desde la enseñanza escolar hasta el reciclaje y entrenamiento de ejecutivos empresariales; dirigió el curso **Gala, Ecología y la visión de la vida a través de la teoría de sistemas** con la participación de alumnos de 14 países en el Schumacher College de Dartington (sudoeste británico); En su libro **Ecomanagement** se introduce el pensamiento ecológico en el mundo de los negocios, etc.



Fritjof Capra

EDICIONES

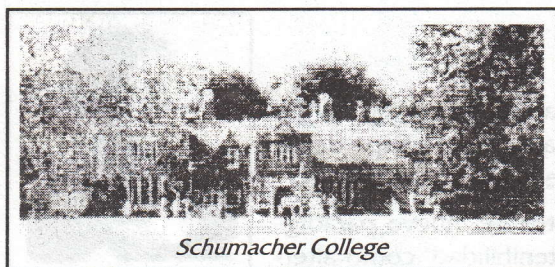


Mercedes 1786
11200 Montevideo

Telefax: 408 6985
E-mail: edideas@adinet.com.uy

**Un proyecto editorial
con una meta muy clara:
unir esfuerzos
con autores nacionales.**

Bibliografía esencial: *El Tao de la Física; El punto crucial; Sabiduría insólita y Pertenece al Universo.*



Schumacher College

Filmografía principal: *Mindwalk* (1990).

Algo más, sugerido por algunos docentes: en Internet, se puede encontrar una extensa página del colega Marcos Sarasola acerca del viejo y nuevo paradigma en *La danza de Fritjof Capra*, en la siguiente dirección:

<http://www.geocities.com/Athens/Delphi/6259/sarasola.html>

✓ FRÍO, FRÍO ...

¿Por qué sentimos el mismo frío a -20°C sin viento que a 0°C con una fuerte ventisca?

Cómo enfría el viento					
Velocidad (km/h)	Temperatura $^{\circ}\text{C}$				
Sin viento	20	10	0	-10	-20
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), sin viento, a la que tenemos la misma sensación de frío.				
12,89 - 18,42	5	-10	-20	-35	-45
36,84 - 42,37	-15	-30	-45	-60	-75
60,79 - 66,31	-20	-35	-55	-70	-85

✓ ¿ESTAMOS SOLOS EN EL COSMOS?

Ahora me parece que no está solo el hombre. En sus manos ha elaborado como si fuera un duro pan, la esperanza, la terrestre esperanza.

(Pablo Neruda)

¿Qué opina?

✓ ¿CÓMO DIJO?

"No hay piedras en el cielo; así que no pueden caer sobre la Tierra".

(Lavoisier)

✓ ¡Uuuuy...!

"Carl Sagan posee el toque del rey Midas. Todos los temas que aborda se convierten en oro, y lo mismo puede decirse de Los dragones del Edén¹. Nunca hasta ahora había leído un relato tan interesante y cautivador sobre el tema de la inteligencia humana". (Isaac Asimov)

¹ Premio Pulitzer 1978

EDUCACIÓN en FÍSICA

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay

Volumen 5 Número 2

Diciembre, 1999

S u m a r i o

- EDITORIAL pág. 1
- CON RELACIÓN A LA PRESENTE EDICIÓN
CÓMO ENVIAR SUS TRABAJOS pág. 2
- ORDENANDO... ENTROPÍA. Procesos termodinámicos
e irreversibilidad - *Gustavo Carbonell* pág. 3
- CURIOSOS CASOS, COSAS CURIOSAS pág. 6
- CÓMO ADAPTAR EL SENSOR DE BARRERA
LUMINOSA ENOSA A LA INTERFACE CASSY
Edgar Gómez y Mariel Mayero pág. 7
- ESPACIO DE A.P.F.U. pág. 10
- WEB pág. 11
- SOLUCIONES PRÁCTICAS pág. 12
- APLICACIONES DEL LÁSER - *Pablo Garategui* pág. 13
- EL MODELO DEL ELECTROMAGNETISMO CLÁSICO:
AMPÈRE-FARADAY-MAXWELL - *Mario Guerra* pág. 15
- FÍSICA DEL HUMOR pág. 22
- OTRA VEZ EL GATO... ¿U OTRO GATO? pág. 23
- LABORATORIO ... ¿QUÉ HAY DE NUEVO? - *Sandry Ramírez ,
Óscar Collado, Odi Prieto, Alejandra Delgado, Sergio Falcón,
Daniel Baccino, Ana Costa* pág. 25
- ¿ES CONTINUO EL UNIVERSO? - *Juan Grompone* pág. 29
- EL ESPEJO QUE REVIERTE EL TIEMPO. Conjugación de fase.
Aplicaciones a la Óptica y la Acústica pág. 41
- MISCELÁNEA pág. 51