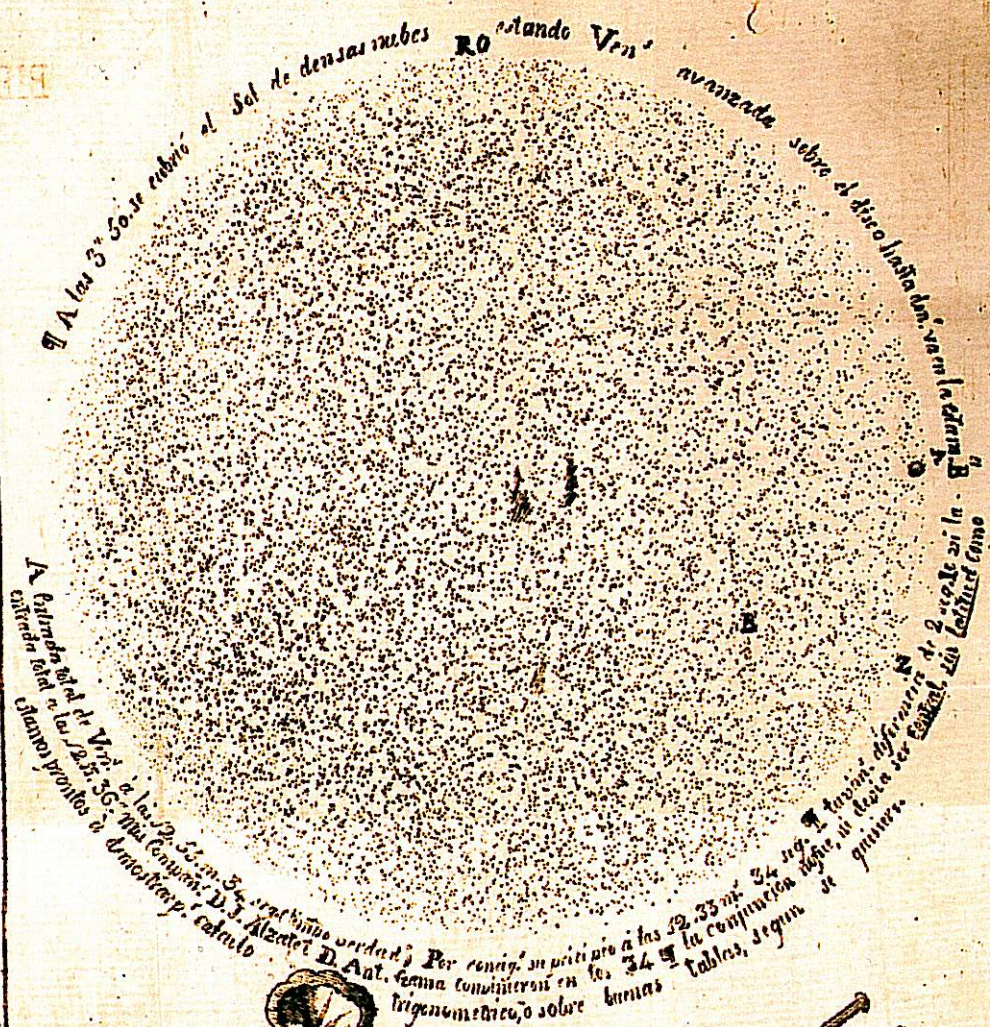


SUPLEMENTO.

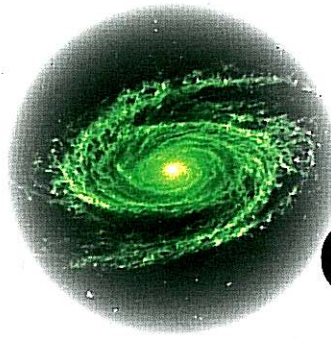
ALA FAMOSA OBSERVACION DEL TRANSITO DE VENUS P. EL DISCO DEL SOL.
 hecha de encargo de la Muy Noble Imperial MEXICO p. D. J. Ig. Bartolache y D. J. Ant.
 Leon. 2. Alzate el 3 de Junio de 1769. Tom. 4.

EXPLICACION SUCINTA.

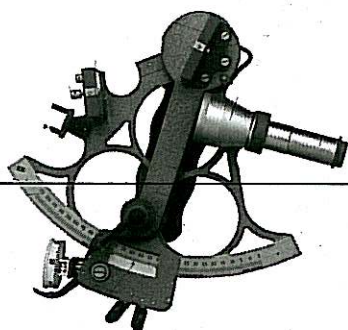
Trasmito es lo mismo que pasaje de una parte a otra.
Venus es un Planeta: quiere decir, es un cuerpo celeste, que tiene su movimiento propio, harto sensible, con que se acerca o se retira de las tierras en ciertos tiempos.
Disco del Sol llaman los Astrónomos a aquella parte mía, que mira hacia nosotros, y aparece de figura plana circular, como si en la estampa; aunque realmente es el Sol un globo de fuego vivo, mas de 500 veces mayor que Venus o la tierra cubta de esta como 30 millones de leguas.
 Así pues se entiende lo que es pasar **Venus** sobre el disco del Sol. es interponerse entre él y la tierra; bien que a una enorme distancia de una y otra: pero segun principios de Óptica, debe aparecer el pequeño Planeta interponiéndose como si fuera una mancha circular sobre el mismo Sol.
 En quanto a la utilidad de esta semejanza. Observaciones, deben ser curiosas, lo bien tomen el trabajo de instruirse, que con ellas tenemos mapas, y cartas marinas, y salbarán gente la vida de los marinos; Es por ventura poco. Se omiten lo demás, remitiendo a nuestra relacion explicada, p. quando se publicare.



FISICA



COSMOS



COSMOS

Enciclopedia de las ciencias
y la tecnología en México

Física

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL DISTRITO FEDERAL

Director General
Dr Óscar Monroy Hermosillo

Dirección y coordinación editorial
Dr. Carlos Herrero B.

Proyecto científico y editorial
Dr. Óscar Monroy Hermosillo y Dr. Carlos Herrero

Ilustración
Carlos Herrero

Fotografía
Carlos Alcázar

Diseño y formación
Natalia Rojas
Javier Guzmán
Roberto SanMartín

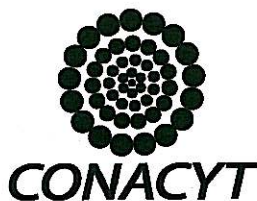
Colaboradores de la colección
Agustín Rodríguez, Óscar Quijano, Beatriz Díaz,
José Ruiz de Esparza, Emiliano Gallegos, Leonardo
Herrera, Marco Antonio Mora, José Guadalupe
Reyes Victoria

Rector General
Enrique Fernández Fassnacht

Secretaria General
Isis Santa Cruz Fabila

Unidad Iztapalapa
Rector
Javier Velázquez Moctezuma.
Secretario
Oscar Comas Rodríguez

Director División Ciencias Sociales Y Humanidades
Pedro Solís Pérez



© Universidad Autónoma Metropolitana, UAMI
2010

Obra Completa: ISBN 978-607-477-1374-4
Física: ISBN 978-607-477-161-9

FÍSICA

Dirección y coordinación editorial
Dr. Carlos Herrero B.

Coordinador científico del volumen
Dr. Leopoldo García Colín

Colaboradores científicos del volumen
José Ruíz de Esparza, Alfredo Macías, Octavio Obregón, Maria Esther Ortíz Salazar,
Arturo Menchaca Rocha, Jorge Flores Valdes, Jorge Hirsch Ganievich, Carmen Cisne-
ros, Daniel Malacara, Eduardo Píña, Manuel López de Haro, Fernando del Rio Haza,
José Luis Morán López, Rubén G. Barrera, Jorge Flores.

MONS PULCHER fufficit vndas



MECHANICA
HYDRAVLICOPNEVMATICA
Ad Eminentiss: S:RI:Principem
Ioannem Philippum
Electorem Mogunt:
Auctore
P. GASPARE SCHOFFO.
Soc: Jesu

Cosmos

ENCICLOPEDIA DE LA CIENCIA Y LAS TECNOLOGÍAS EN MÉXICO

TOMO I. *Ingeniería, diseño y tecnologías*

Dr. Óscar González Cuevas (COORDINADOR)

TOMO II. *Ciencias Biológicas*

Dr. José Ramírez Pulido (COORDINADOR)

TOMO III. *Física*

Dr. Leopoldo García Colín (COORDINADOR)

TOMO IV. *Química*

Dr. Antonio Campero (COORDINADOR)

TOMO V. *Matemáticas*

Dr. Richard Wilson (COORDINADOR)

TOMO VI. *Medicina*

Dr. Ruy Pérez Tamayo (COORDINADOR)

TOMO VII. *Ciencias de la tierra*

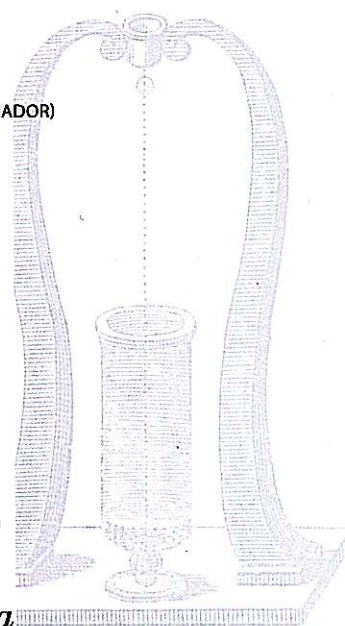
Dr. Dante Morán (COORDINADOR)

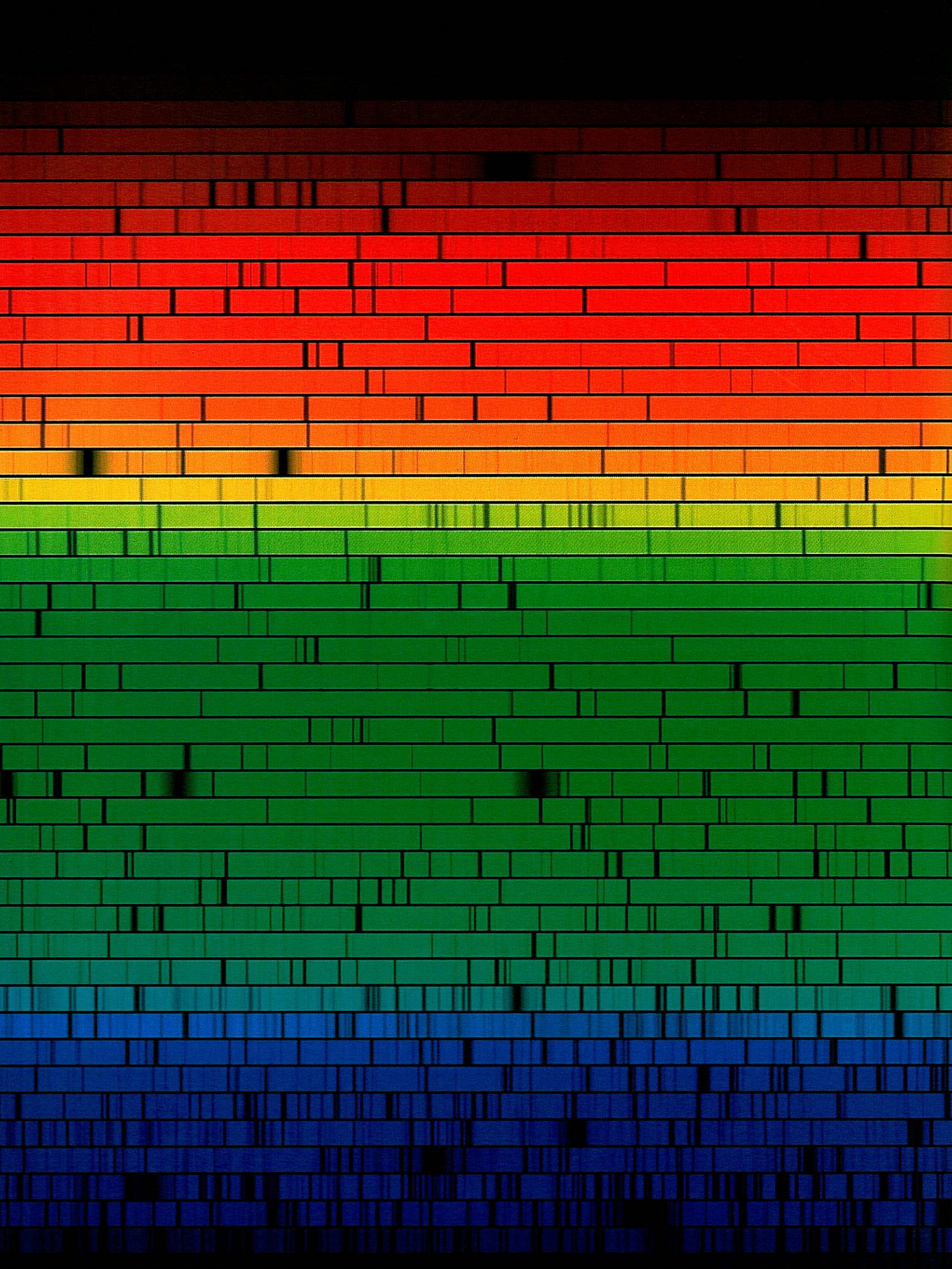
TOMO VIII. *Geografía*

Dr. Daniel Hiernaux (COORDINADOR)

TOMO IX. *Ciencias Sociales y Humanidades*

Dr. Carlos Herrero (COORDINADOR)





Las Propiedades Ópticas de los Materiales



■ Rubén G. Barrera

Introducción

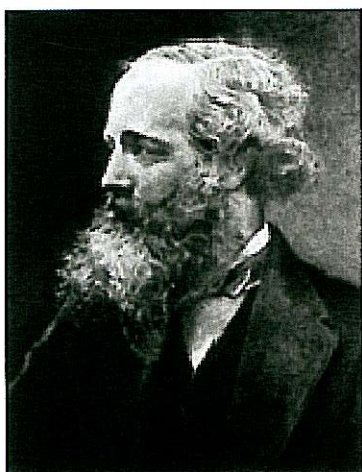
De todas las cosas inanimadas, la más interesante es... sin duda... la luz. Es curioso hacer notar que en varias de las tradiciones culturales sobre el origen del mundo, lo primero que los dioses hacen es... la luz... y después... la materia. Pero para nosotros, habitantes del siglo XXI, ¿qué podemos decir sobre nuestra concepción actual sobre lo qué es la luz... y... sobre lo qué es la materia?, y más interesante aún, ¿cuáles son nuestras ideas sobre la forma en que la luz actúa sobre la materia y la forma en que la materia actúa sobre la luz? El objetivo de este artículo es, precisamente, exponer el entendimiento que tenemos hoy en día sobre la interacción entre luz y materia, y como este entendimiento puede ser utilizado para entender más a fondo la materia misma o la propia luz... o también para apreciar aplicaciones con tenor más utilitario.

Con relación a la materia, nuestra concepción actual es que toda... absolutamente toda la materia... está compuesta por pequeños sistemas consistentes en conjuntos de minúsculas partículas... a los llamamos átomos o moléculas... y a las minúsculas partículas las llamamos, electrones, protones o neutrones. La característica fundamental de esta concepción sobre la materia, es que las partículas que componen los átomos y moléculas son todas idénticas entre sí... son las componentes fundamentales que componen todo lo que conocemos como materia... y por esto han sido llamadas también “partículas elementales”. El basto programa encaminado a explicar todas... absolutamente todas las propiedades de todos... absolutamente todos... los diversos tipos de materiales que conocemos, en términos solamente de las propiedades de los átomos y moléculas que los componen, y de la manera en que estas se organizan en cada material, fue un programa iniciado por la comunidad científica a finales del siglo XIX, y conocido ahora como: “La visión molecular de la materia”.

Por otro lado, la naturaleza de la luz fue un problema harto escurridizo. Desde el asociar la naturaleza de la luz a conceptos vagos y poco precisos, como los llamados “vórtices” en los tiempos de Descartes, o a las partículas luminosas propuestas por Newton, hasta la idea de concebir a la luz como una onda, similar a las ondas que se propagan en el agua, hubo un largo trecho. En la segunda mitad del siglo XIX, paralelamente al desarrollo de la visión molecular de la materia, el físico escocés James Clerk Maxwell recogía los esfuerzos y las ideas de una pléyade de mentes brillantes, para concebir a la luz como las ondulaciones de un medio muy tenue que impregnaba todo el universo. Este medio poseía propiedades muy especiales, todas ellas muy alejadas de las propiedades usuales encontradas en los materiales comunes. La existencia real de este medio era la suposición fundamental de aquella época. A este medio se le denominó el “éter luminífero”, y la gran contribución de JC Maxwell fue el identificar este “éter luminífero” con otro éter que él concibió, y al que se le llamaba “éter electromagnético”.

El éter electromagnético era el medio que se necesitaba para poder entender toda la fenomenología asociada a los fenómenos llamados electromagnéticos, y que eran los fenómenos asociados a las fuerzas producidas por las cargas eléctricas en reposo y por las cargas eléctricas en movimiento, las llamadas corrientes eléctricas. Este éter tenía también propiedades físicas muy extrañas, y las llamamos extrañas porque no correspondían a las propiedades usuales de los materiales comunes. La palabra electro-magnético compuesta por los vocablos electro y magnético, surge de haber identificado que el origen del magnetismo producido por los imanes se

La óptica es una rama de la física que se encarga de estudiar el comportamiento y propiedades de la luz, incluyendo las interacciones con la materia y la construcción de instrumentos para detectarla. En la figura se muestran, una variedad de colores que pueden obtenerse al separar ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético; cada bloque absorbe luz en ciertas frecuencias, y refleja el resto



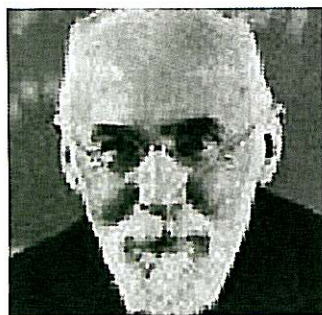
James Clerk Maxwell

debía a corrientes eléctricas producidas en el seno de los átomos y moléculas que componían el imán. A estas corrientes se les llamó "corrientes moleculares". En otro orden de cosas, se logró también producir en el laboratorio efectos magnéticos, utilizando únicamente las corrientes eléctricas transportadas en los alambres de cobre utilizados en los laboratorios de la época. En este sentido el magnetismo no era

otra cosa más que fuerzas producidas por las corrientes eléctricas, por lo que a fin de cuentas, lo eléctrico y lo magnético tenían un mismo origen: las cargas eléctricas. Dado que los vocablos eléctrico y magnético tenían un mismo origen, éstos quedaron indisolublemente unidos en una sola palabra: electromagnético.

Finalmente, la magna obra que integra todos los esfuerzos para comprender la esencia de los fenómenos electromagnéticos fue elaborada, durante muchos años, por JC Maxwell y publicada en 1881, en dos voluminosos tomos bajo el título "Un tratado sobre la electricidad y el magnetismo". En esta obra JC Maxwell escribe por primera vez las ecuaciones que gobiernan la dinámica del éter electromagnético, el cual era concebido como un medio continuo responsable de la transmisión, a través del espacio, de las fuerzas producidas por las cargas eléctricas. Estas ecuaciones se conocen ahora bajo el nombre de: Ecuaciones de Maxwell, y son las ecuaciones que se siguen utilizando actualmente para resolver todo tipo de problemas electromagnéticos, desde aquellos relacionados con el suministro y distribución de la electricidad en poblados y ciudades, hasta aquellos relacionados con la transmisión de información por antenas de radio y televisión. Por otro lado, en esta obra JC Maxwell identifica también al éter electromagnético con el éter luminífero, y establece con diáfana claridad y de una vez por todas, que la luz no es otra cosa que una onda electromagnética. Se podría decir que la identificación de la luz como una onda electromagnética es uno de los grandes... o tal vez... el más grande triunfo de la concepción maxwelliana del electromagnetismo. Esto justifica que en las escuelas de ciencias e ingeniería de hoy en día, uno vea a chicos y chicas luciendo camisetas con la leyenda: "...y Dios hizo la luz..." y luego... abajo de esta frase, y escritas con todo detalle: las ecuaciones de Maxwell.

Hendrik Antoon Lorentz



El final de esta historia es realmente sorprendente, pues resulta que si el éter realmente existía debería haber una velocidad relativa entre ese éter y... digamos... la tierra, sobre todo aceptando el hecho de que la tierra se mueve en el espacio girando alrededor del sol y girando sobre su propio eje. Por lo tanto, aunque se diera la extraordinaria coincidencia de que el éter estuviera en reposo con relación a las llamadas "estrellas fijas", el movimiento anual y diurno de nuestro planeta le daría a la tierra un movimiento relativo con relación al éter. Esto sería aún más evidente si el éter tuviera un movimiento propio... si hubiera una especie de "viento de éter". Pero... ¿por qué este movimiento relativo resultaba importante? Pues resultaba importante simplemente por el hecho de que la luz debería tener una velocidad diferente, dependiendo si su dirección de propagación estuviera a favor o en contra del "viento de éter"... a favor o en contra del movimiento relativo entre la tierra y el éter. Exactamente lo mismo que le sucede a la velocidad de una barca, cuando remando en un río con el mismo esfuerzo, la barca va a favor o en contra de la corriente. Por otro lado, como no se sabía la dirección del "viento de éter", la idea era hacer mediciones de la velocidad de la luz en diferentes direcciones y en aquella dirección en donde la velocidad resultara ser máxima, esa dirección debería coincidir con la dirección del "viento de éter".

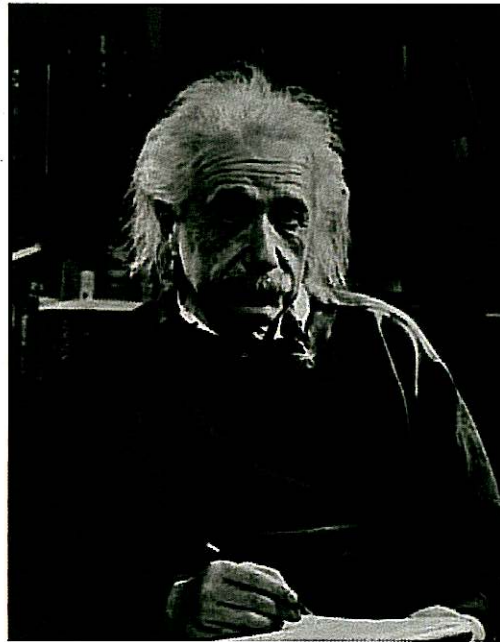
Ahora, lo que fue realmente interesante es que todos... absolutamente todos los esfuerzos que se hicieron para medir los cambios en la velocidad de la luz, cuando cambiaba la velocidad relativa entre... digamos... una lámpara emisora de luz y el supuesto éter, resultaron infructuosos. Uno de los experimentos más famosos para medir estos cambios, fue el llamado experimento de Michelson-Morley realizado en la Universidad de Chicago, en los Estados Unidos. La sensibilidad del experimento requería que el aparato de medición flotara en una enorme tina de mercurio para evitar que las vibraciones del suelo se transmitieran al aparato. Por otro lado, se le pidió al alcalde de la ciudad de Chicago, que durante la realización del experimento dejara de funcionar la línea del metro que pasaba muy cerca de la universidad, con el fin de eliminar, en el límite de lo posible, todas las vibraciones del terreno que pudieran afectar la precisión del experimento.

Los resultados fueron contundentes, la velocidad de la luz no cambiaba cuando cambiaba la velocidad relativa entre el éter y la lám-

para emisora de luz. Estos resultados eran difíciles de comprender, ya que tenían implicaciones harto extrañas. Una de las mentes más preclaras de la época, Hendrik Antoon Lorentz, demostraba que de aceptar los resultados del experimento de Michelson-Morley, tendría uno que aceptar también que el tiempo y el espacio no eran algo absoluto, como siempre se había creído, sino que dependían del estado de movimiento del observador. O sea, que el tiempo medido por dos observadores que tuvieran una velocidad relativa entre ellos iba a ser diferente... sus relojes iban a "caminar" a distinto ritmo. También si un observador medía un cierto objeto con su cinta métrica y otro observador realizaba la misma medición pero moviéndose a una cierta velocidad con respecto al primero, los resultados de las mediciones iba a ser diferente, como si la longitud de las cintas métricas dependiera de la velocidad relativa entre ambos observadores. Obviamente estas conclusiones eran harto incómodas.

Ante este panorama de confusión y caos intelectual, la solución apareció por donde menos se esperaba, y fue dada por Albert Einstein. Lo que Einstein propuso fue simplemente: (i) aceptar que la luz no necesitaba un éter para transmitirse y (ii) que su velocidad no dependía de la velocidad relativa que hubiera el observador y los emisores de luz, es decir, la velocidad de la luz era siempre... siempre... la misma. Aunque estas hipótesis se ven muy simples, y tal vez hasta un poco ingenuas, no era fácil aceptar algo que iba en contra del llamado "sentido común"... ¿cómo era posible aceptar que las oscilaciones electromagnéticas pudieran viajar en el vacío sin necesitar de un medio que "oscilara"... que las transportara?, y más aún, que su velocidad siempre fuera constante... independiente de la velocidad del emisor de luz. Sin embargo... después de muchos debates... discusiones... pleitos... burlas... estas hipótesis fueron aceptadas... fueron asimiladas... fueron elaboradas... y sus consecuencias fueron estudiadas y desarrolladas, dando lugar a lo que ahora se conoce como: la teoría de la relatividad especial, cuyos resultados más impactantes son los ya predichos por Lorentz: que el espacio y el tiempo... las cintas métricas... la marcha de los relojes... no son absolutos, sino que dependen de la velocidad relativa que exista entre los observadores.

Esto es sin lugar a dudas sorprendente... pero tal vez... lo más sorprendente... es que en el torbellino de estos cambios radicales sobre la concepción de la naturaleza de la luz y en la aceptación de que el espacio y el tiempo no eran



algo absoluto...hubo algo que no se inmutó ante esta tormenta intelectual y que mantuvo su misma forma...matemática...y estas fueron... precisamente: las ecuaciones de Maxwell,... estas ecuaciones permanecieron incólumes, preservando su forma matemática original y precisando únicamente de una reinterpretación de las funciones matemáticas a las que hacían referencia. Estas funciones, que en la concepción de JC Maxwell representaban ciertas características del éter electromagnético, ahora se reinterpretan bajo los nombres de campo eléctrico y de campo magnético, y se denotan comúnmente con las letras E y B , respectivamente, y la flechita que se escribe sobre las letras significa, desde el punto de vista matemático, que los campos E y B son vectores, es decir, son cantidades que tienen magnitud, dirección y sentido... como las fuerzas.

El campo eléctrico está relacionado con las fuerzas que producen las cargas eléctricas, mientras que el campo magnético está relacionado con las fuerzas que producen las corrientes eléctricas. Esto puede sonar un poco raro, porque uno esperaría que el campo magnético estuviera relacionado con las fuerzas producidas por los imanes... sí... por los imanes... y que es en lo que uno piensa primero cuando oye la palabra magnetismo. Sin embargo, uno de los resultados de las ecuaciones de Maxwell es que lo único que produce un campo magnético es la corriente eléctrica... es decir, el efecto de una corriente eléctrica sobre una brújula es idéntico al efecto que produce un imán. Es más, una corriente eléctrica cerrada, circulando en una pequeña espira, produce exactamente el mismo efecto que un

GLOSARIO

Ley de inercia

Todo cuerpo persiste en su estado de reposo o movimiento en línea recta con rapidez constante a menos que una fuerza total lo obligue a cambiar dicho estado. Se conoce como primera Ley de Newton.

Ley de la reflexión

Cuando una onda incide sobre una superficie, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

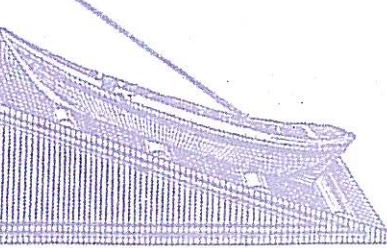
Ley de Ohm

La corriente que fluye en un circuito es directamente proporcional al voltaje que se aplica e inversamente proporcional a su resistencia.

Longitud de onda

Distancia entre la cima de una cresta a la cima de la cresta siguiente; también se puede medir la longitud de onda entre valle y valle siguiente, en general entre partes idénticas sucesivas de una onda.

Albert Einstein



BIOGRAFÍAS

Gaspar, Juan Avelino (s. XVII).

Médico-Astrónomo. Se doctoró en la Real y Pontificia Universidad de México. Escribió: Especulación astrológica y física de la naturaleza de los cometas y juicio de que este año de 1682 se ve en todo el mundo, México -Imprenta de la Vda. de Bernardo Calderón, 1682-; y, Disertación sobre los cometas y sus influencias sobre la tierra y singularmente sobre el aparcido nuevamente en México. México 1683. (Cfr.: Elías, Trábulse Historia de la Ciencia en México, México, 1989, 4 vols.).

pequeño imán colocado en el centro y perpendicular al plano de la espira. Ante estas evidencias, a los antiguos electrodinámicos no les quedó otra que imaginarse que en las moléculas que formaban el imán, y en general cualquier otro material, había cargas eléctricas que se movían en trayectorias cerradas, como en una pequeña espira, y que estas corrientes moleculares producían un campo magnético equivalente al de un pequeño imán. Estas corrientes existían de por siempre en las moléculas y no se necesitaba de ninguna fuente de energía para mantenerlas en circulación... extraño... ¿verdad?... pero que otra les quedaba... si lo que se buscaba era la consistencia de la teoría... y la consistencia con las "evidencias" experimentales.

En el caso de los imanes, estas "corrientes moleculares", estas pequeñas espiras, por alguna razón, se encontraban todas orientadas en la misma dirección, de tal manera que el campo magnético total producido por las corrientes "moleculares" se sumaba en esa dirección y, por lo tanto, resultaba ser muy grande. Ahora bien, en los materiales que no son imanes, estas "corrientes" moleculares no están orientadas... los planos de las "espiras" moleculares están orientados al azar, por lo que el campo magnético resultante, en cualquier dirección, sería prácticamente nulo. A esta forma de concebir el magnetismo, y en particular, a esta forma de ver los imanes es a lo que llamamos ahora el modelo "amperiano", en honor de Jean Marie Ampere, brillante físico francés que trabajó en Francia a principios del siglo XIX, en los tiempos de nuestras guerras de independencia. Por otro lado la razón por la cual en unos materiales estas corrientes moleculares se encuentran orientadas y en otros materiales no lo están, es una pregunta que todavía no se responde a nuestra entera satisfacción, y la seguimos considerando un tema actual de investigación.

En un cierto sentido podemos asociar los campos eléctricos y magnéticos a las fuerzas eléctricas y magnéticas, y la palabra campo se refiere a que estas fuerzas están definidas... existen... están... en todos los puntos del espacio... aunque no se encuentren ahí partículas cargadas que revelen su presencia. Esto es a lo que llamamos un campo de fuerzas... además... estas fuerzas... este campo de fuerzas... puede cambiar en el tiempo... puede tener una dinámica propia... un "movimiento" propio... y este "movimiento" propio de los campos eléctrico y magnético... o juntando los vocablos... este "movimiento" propio del campo electro-

magnético... es lo hoy en día nos viene a la mente cuando oímos decir... que la luz "viaja"... cuando oímos decir... que la luz se propaga... en el espacio vacío.

En resumen, nuestra visión actual sobre la naturaleza de la luz es que la luz son oscilaciones del campo electromagnético que viajan a través del espacio vacío, y que el comportamiento de estas oscilaciones se rige por las leyes de la electrodinámica enmarcadas en las ecuaciones de Maxwell. Por otro lado, el objetivo de este trabajo es el de analizar que sucede cuando la luz, en vez de viajar por el espacio vacío, viaja ahora en un espacio donde hay materia, y en especial cuando esa materia se presenta en forma de lo que hoy llamamos "materiales", los cuales pueden estar tanto en estado sólido como en estado líquido.

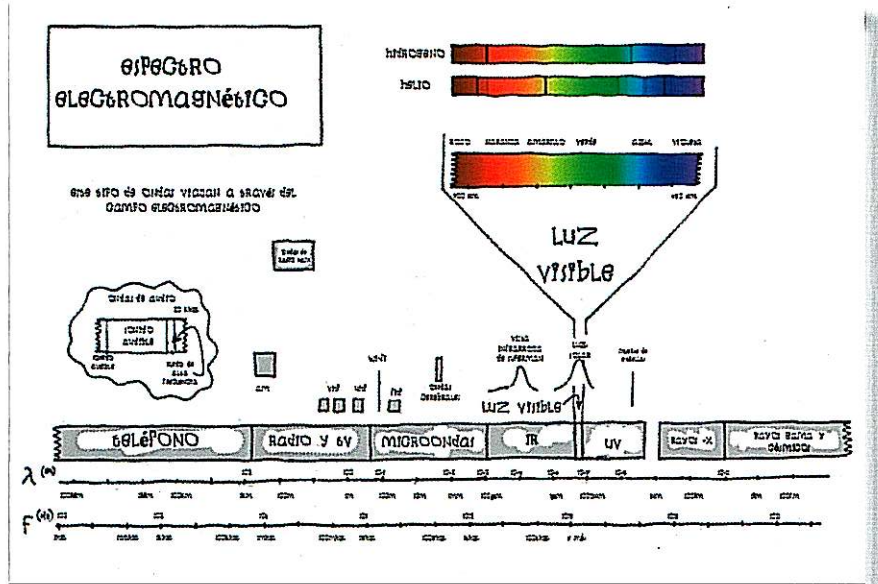
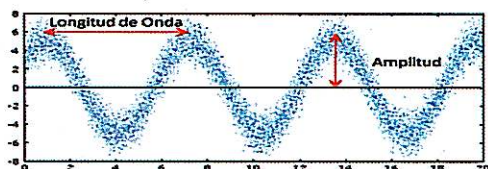
Las ondas electromagnéticas

Primeramente haremos una pequeña relación sobre las características y el comportamiento de las ondas electromagnéticas en el vacío para después compararlo con su comportamiento dentro de los materiales. En el vacío las ondas electromagnéticas pueden viajar "indefinidamente" sin perder energía. Esta es la razón por la cual podemos recibir luz de las estrellas... y aún de las galaxias más lejanas en los confines de nuestro universo... y aunque el espacio exterior no es estrictamente vacío... la densidad de materia es tan pequeña en los espacios interestelares, que podríamos considerarlos en una buena aproximación... como vacío.

Es interesante hacer notar que las ondas electromagnéticas se nos presentan de modos diversos. Son ondas electromagnéticas las ondas de radio que sirven para transmitir información utilizando antenas... son ondas electromagnéticas las que se concentran dentro de un horno de microondas y las que se reciben en las antenas de televisión... son ondas electromagnéticas la radiación infrarroja que sentimos como calor, la luz visible que detectamos con nuestros ojos y la luz ultravioleta que broncea nuestra piel y que nos puede llegar a provocar quemaduras... son ondas electromagnéticas los rayos X que se utilizan en la toma de radiografías en caso de una fractura. La diferencia entre ellas reside en una característica muy importante de las ondas electromagnéticas, y esta es su frecuencia de oscilación. Durante una oscilación la magnitud del campo eléctrico y del campo magnético crece... después decrece... y después vuelve a crecer hasta llegar, otra vez, a su valor inicial... completando

así un ciclo... este ciclo se vuelve a repetir... y se vuelve a repetir... un número muy grande de veces... El número de veces que se repite por segundo es a lo que llamamos la frecuencia de oscilación... y es esta frecuencia de oscilación la que distingue los distintos tipos de radiación electromagnética. En las ondas de radio los campos oscilan a cientos de miles de ciclos por segundo... en las micro-ondas, la frecuencia de las oscilaciones aumentan a cientos de miles de millones de ciclos por segundo... y en la radiación infrarroja, la luz visible y la radiación ultravioleta, los campos oscilan a frecuencias hasta del orden de 100 000000000000 ciclos por segundo... como vemos las oscilaciones son realmente muy rápidas... extremadamente rápidas. A toda esta gama de frecuencias de oscilación, que va desde las ondas de radio, pasando por la luz, hasta los rayos X, y los llamados rayos X duros... de altísima frecuencia... a toda esta gama de frecuencias se le denomina: el "espectro electromagnético". Dentro del espectro electromagnético la luz (visible) ocupa un pequeño intervalo de frecuencias... una pequeña ventana... a la que se le denomina comúnmente... el espectro óptico. Dentro del espectro óptico las ondas asociadas al color azul oscilan más rápido que las asociadas al color rojo. Cabe añadir que el color no es una propiedad de las ondas electromagnéticas, el color es una sensación construida en nuestro cerebro cuando las ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia inciden en nuestra retina.

Aunado al concepto de frecuencia está el concepto de longitud de onda. Los campos eléctricos y magnéticos al oscilar avanzan en el espacio y recorren una cierta distancia. La distancia que recorren en una oscilación se denomina longitud de onda. Por consiguiente entre más grande es la frecuencia de oscilación menor es la longitud de onda. Si quisiéramos graficar la magnitud de uno de los campos... digamos la magnitud del campo eléctrico... conforme éste avanza en el espacio... como función del espacio, la gráfica se vería como la que aparece en la Fig. 1, en donde el eje vertical corresponde al valor de la magnitud del



campo y el eje horizontal a la distancia. Al valor máximo de la magnitud del campo en una oscilación se le llama: Amplitud.

Figura 2. Espectro electromagnético

En términos de la longitud de onda, las ondas de radio tiene una longitud de onda del orden de kilómetros, en las microondas y las ondas de televisión, la longitud de onda es del orden de milímetros y en el infrarrojo, la luz visible y el ultravioleta, es del orden de micras. Una micra es un milésimo de milímetro, es decir un millonésimo de metro. A la unidad que corresponde a un milésimo de micra, o sea, un milmillonésimo de metro, se le denomina nanómetro, se escribe nm, y el prefijo "nanos" proviene del griego que significa enano. En estas unidades la longitud de ondas de las ondas electromagnéticas asociadas al azul es de 400 nm, las asociadas al verde-amarillo es de 550 nm y las asociadas al rojo es de 700 nm. En la Fig. 2 se muestra, esquemáticamente, el espectro electromagnético en términos de los valores correspondientes a la longitud de onda. Vemos en esta figura que el espectro "visible" es sólo una pequeñísima ventana dentro de todo el espectro electromagnético, y que nuestros ojos son sólo capaces de "ver" en esta ventana de frecuencias.

Otra característica importante de las ondas electromagnéticas es su direccionalidad... o sea... que las oscilaciones además de tener una amplitud, una frecuencia y una longitud de onda, tienen una dirección de oscilación... a esta dirección de oscilación se le llama la "polarización" de la onda, y cuando esta dirección de oscilación se encuentra en un plano, esto quiere decir que sobre ese plano la onda oscila siempre en la misma dirección, se dice entonces que la onda está planamente polarizada... y así

Figura 1. El eje vertical es la magnitud del campo, mientras que el eje horizontal es distancia

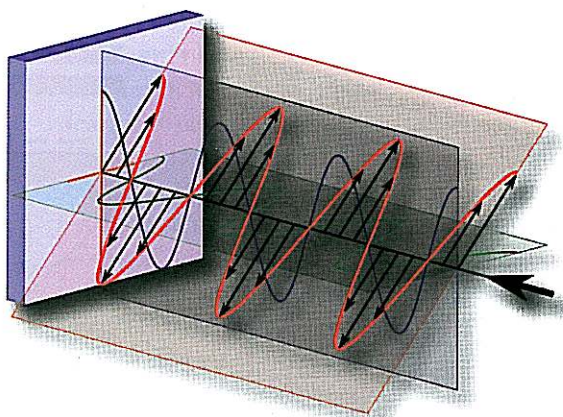


Figura 3. Onda planamente polarizada (en azul). La línea en morado representa la dirección de oscilación.

hablamos de luz polarizada... Cuando se descubre el fenómeno de la polarización de la luz, este resulta tan sorprendente que los antiguos electrodinámicos decían que la luz "tenía lados", queriendo decir con esto que la luz se comportaba diferente en una dirección que en otra. En la Fig. 3 se muestra (en azul) una onda planamente polarizada y se indica (en morado) el plano de polarización. La luz que nos llega del sol o de las estrellas... o de un foco en la casa o en la calle está, en general, no polarizada, y para polarizarla se requieren polarizadores, que son materiales que sólo dejan pasar la luz que oscila a lo largo del llamado "eje" del polarizador... La luz al reflejarse se polariza parcialmente a lo largo del plano reflector, y unos anteojos polarizados que no dejen pasar esta luz nos ayudan a disminuir ese "brillo" molesto provocado por la luz reflejada.

En resumen, las características más importantes de las ondas electromagnéticas son: su amplitud, su frecuencia de oscilación, su longitud de onda y su estado de polarización... y de aquí en adelante nos restringiremos a esa parte del espectro electromagnético al que llamamos el espectro óptico y que barre del infrarrojo al ultravioleta.

Luz y materia

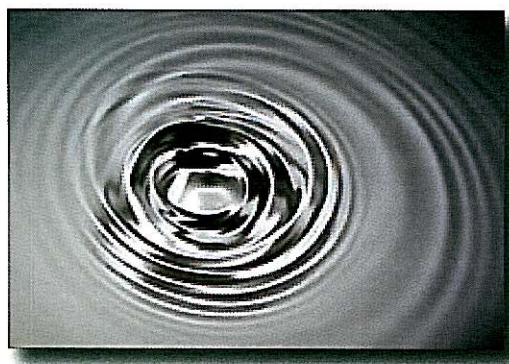
Retomemos ahora la llamada "visión molecular" de la materia y analicemos que sucede cuando la luz ya no viaja en el vacío, sino que viaja en presencia de materia, y con esto quiero decir que viaja en presencia de átomos y moléculas. Y nos va a interesar, en especial, el caso cuando éstos átomos y moléculas se encuentran muy próximos unos a otros formando un material relativamente denso. Un camino posible para atacar es-

te problema sería comenzando a analizar la forma en que el campo electromagnético actúa sobre un átomo o una molécula aislada. Es decir, analizar que sucede cuando las fuerzas eléctricas y magnéticas que se propagan como campo electromagnético en una dirección determinada, inciden sobre el sistema de cargas que constituyen al átomo o a la molécula.

Esperaríamos que los campos eléctricos y magnéticos ejercieran fuerzas sobre las cargas eléctricas de la molécula modificando su movimiento, y lo que sabemos es que esta modificación de su movimiento, de acuerdo con las mismas ecuaciones de Maxwell, tiene como consecuencia que una parte de la energía transportada por la onda electromagnética incidente sea absorbida por la molécula, mientras que otra parte de la energía vuelve a ser reemitida como onda electromagnética, pero ahora viajando en todas direcciones... a semejanza de lo que sucede cuando lanzamos una piedra en un plácido estanque y observamos que del lugar donde cayó la piedra emergen ondas circulares que viajan en el estanque con un radio cada vez mayor y una amplitud cada vez menor (ver Fig. 4). De la misma manera, la molécula que ha sido perturbada por la onda incidente reemite parte de su energía como onda electromagnética pero con características distintas a las de la onda incidente, ya que esta reemisión se realiza en forma de ondas "esféricas" viajando en todas direcciones y con una amplitud que va disminuyendo conforme las crestas de la onda esférica se alejan de la molécula en cuestión (ver Fig. 5).

A este proceso se le llama: esparcimiento de radiación electromagnética por una molécula... ¿y a que se debe?... pues se debe necesariamente a que las partículas cargadas pertenecientes a la molécula, específicamente los electrones, al sentir las fuerzas producidas por los campos eléctricos y magnéticos asociados a la luz incidente modifican su movimiento "natural" en la molécula, y este cambio en su dinámica (en su movimiento) tiene que ser el responsable de la reemisión en forma de ondas esféricas. Es claro también que la amplitud de los campos reemitidos por la molécula, debe depender directamente de la amplitud de la onda incidente... porque a mayor amplitud, mayor será el cambio en el movimiento "natural" de los electrones en la molécula. Todas estas ideas relacionadas con lo que sucede cuando una onda electromagnética actúa sobre una molécula pueden o no ser correctas... sin embargo uno de los objetivos de la física es precisamente el poder "demostrar" si estas ideas son

Figura 4. Ondas circulares en un estanque tranquilo.





Instituto de Física de la UNAM

mente... imposible de resolver. Hay que reconocer, sin embargo, que ha habido esfuerzos y enfoques alternativos para encontrar una solución al problema de esparcimiento múltiple con un número tan grande de moléculas, a cambio... nada es gratis... de perder información... y esto se ha hecho utilizando los llamados: métodos estadísticos.

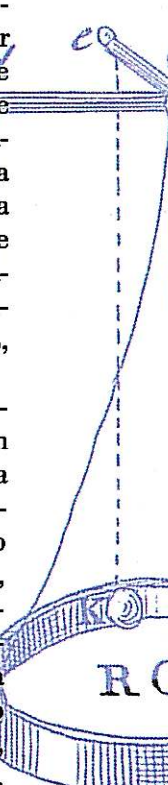
Sin embargo, es necesario ahora reconocer que el camino trazado tratando de resolver, primero, el problema de esparcimiento múltiple no es el camino adecuado... más aún... no es el camino correcto... ¿porqué?... porque existe una dificultad adicional. Cuando dos moléculas llegan a estar muy cerca una de otra, las moléculas comienzan a perder su identidad individual... comienzan a dejar de ser ellas mismas... comienzan a compartir algunas de las minúsculas partículas que las componen... comienzan a compartir electrones... y a configurar sistemas moleculares más complejos. De esta manera cuando tenemos un material cualquiera, compuesto por miles de trillones de moléculas dispuestas a distancias muy próximas unas de otras, sucede entonces que al estar tan cerca unas de otras... las moléculas pierden sus individualidad, y los electrones que les "perteneían"... que eran parte de su identidad como moléculas... comienzan a ser

compartidos por todas ellas, y en ciertos casos... estos electrones son capaces de migrar libremente por todo el interior del material... por lo ya no se puede hablar de un material compuesto por moléculas individuales, sino un estado diferente del sistema molecular denominado: el estado sólido.

En contraposición, cuando el material se encuentra en estado líquido, la pérdida de la individualidad molecular no es tan drástica... no es tan impactante... y todavía es posible hablar, como en el caso del agua, de las moléculas que componen al líquido. Para tratar de describir la dinámica... o sea... el movimiento... de las partículas que componen la materia en el estado sólido, es necesario utilizar la llamada mecánica cuántica... que es la teoría física adecuada para tratar la dinámica... para describir el movimiento... de partículas tan pequeñas como los electrones y en general de todas las llamadas partículas subatómicas... queriendo decir con esto las partículas que componen átomos y moléculas. Si las moléculas tienen dimensiones menores a un nanómetro, las dimensiones de las partículas que las componen es aún mucho menor. Recordemos que la longitud de onda de la luz en el visible es de cientos de nanómetros... décimos de micra.

No es este el momento, ni el lugar, para hablar de la mecánica cuántica, lo único que diremos es que es una teoría que nace en la década de los 20 (1920-1930) para describir el movimiento de las partículas subatómicas, y que en ella desaparece el concepto de trayectoria de una partícula, siendo remplazado por un concepto probabilístico, que aceptaba que era imposible saber, al mismo tiempo, donde estaba un electrón y que velocidad tenía, relacionándolo con el proceso de medición. Esta imposibilidad intrínseca rompía con la larga tradición de una física determinista, capaz de predecir con un alto grado de precisión las trayectorias y las velocidades de los objetos macroscópicos, tales como proyectiles, planetas, satélites y cometas.

Sin embargo, en ciertos círculos intelectuales esta nueva teoría cuántica no fue tan bien recibida... el propio Albert Einstein expresaba su reticencia, cuando refiriéndose al nuevo concepto probabilístico dijo: "... es que Dios no juega a los dados...", queriendo decir con esto, que si no éramos capaces de describir la trayectoria de los electrones, no era porque la naturaleza tuviera una esencia probabilística imposible de ser descrita en detalle, como lo afirmaban los paladines de la teoría cuántica, sino que todo era fruto de nuestra ignorancia...



porque no teníamos toda la información necesaria pudiendo existir "variables ocultas", que cuando fuésemos capaces de identificar, sería entonces posible determinar con precisión la trayectoria de los electrones.

Dejando a un lado estas cuestiones, hasta cierto punto filosóficas, volvamos a plantear el problema de entender, desde el punto de vista de la física, la interacción de la luz con los medios materiales, cuando estos están compuestos por un gran número de moléculas que han perdido su identidad molecular, y cuya dinámica tiene que ser tratada necesariamente con la mecánica cuántica. El camino que siguieron los primeros electrodinámicos... que por cierto antecedieron a la teoría cuántica... para resolver este problema resultó ser tan ingenioso... tan simple... y al mismo tiempo tan general... que este sigue siendo el camino que seguimos hoy en día para abordar este mismo problema. En ausencia de modelos específicos sobre la estructura de la materia, es decir, el conocimiento de las posiciones y velocidades de todas las partículas subatómicas que la componen y... en ausencia de teorías tan sofisticadas como la mecánica cuántica... los primeros electrodinámicos decidieron dividir el camino hacia la solución del problema en dos partes... en una primera fase suponían que los materiales podían ser considerados como un medio continuo... es decir... se olvidaron de la naturaleza molecular y subatómica de los materiales, que en esa época comenzaba a gestarse, y consideraron que ese medio continuo estaba provisto de ciertas propiedades relacionadas con su manera de responder... de reaccionar... ante la presencia de campos electromagnéticos... una especie de "éter" asociado a cada material... y cuyas propiedades podrían ser determinadas, diseñando y realizando mediciones específicas para cada material. La segunda parte del camino sería la de calcular las propiedades electromagnéticas de este medio continuo asociado a cada material, a partir de los llamados modelos microscópicos, en los que se hace referencia a los electrones y demás partículas subatómicas que lo componen. Los primeros electrodinámicos dejaron, esta segunda parte del camino para las generaciones futuras... en mucho porque su visión molecular de la materia era aún muy limitada. Pero aún, en esta segunda parte del camino, es preciso reconocer que los primeros electrodinámicos realizaron avances importantes, construyendo modelos moleculares y soluciones ingeniosas aplicables, al menos, al caso de los líquidos y los gases...

todo esto con el fin de obtener un entendimiento más profundo sobre la forma en que la luz se propaga dentro de los medios materiales. De esos cálculos y de estos modelos hablaremos más tarde en este mismo trabajo.

A lo que hemos estado llamando la primera parte del camino, o sea el considerar a los materiales como un medio continuo, caracterizado por la forma en que éstos responden a la presencia de campos electromagnéticos, producidos por fuentes externas, es lo que ahora se conoce bajo el nombre de: electrodinámica del medio continuo, o simplemente "Electrodinámica Continua"... la otra parte del camino consistiría en calcular estas propiedades del medio continuo asociado a los distintos materiales, utilizando modelos de su estructura microscópica con todo el poder y el alcance de la mecánica cuántica. Mientras que la electrodinámica continua es una disciplina bien establecida, que ocupa un lugar importante en los cursos regulares de electrodinámica clásica... la que hemos llamado la segunda parte del camino, que completa el objetivo original y que colocando al medio continuo como un paso intermedio... es también una área bien establecida de la física del estado sólido denominada: teoría de la respuesta dieléctrica. Es importante también recalcar que tanto en la electrodinámica continua como en la teoría de la respuesta dieléctrica, existen problemas abiertos que siguen atrayendo el interés de muchos investigadores.

En el presente trabajo nos vamos a restringir a la primera parte del camino, es decir, vamos a considerar el problema de la interacción luz-materia bajo los supuestos de la electrodinámica continua. Por otro lado, el estudio de la interacción luz-materia puede tener distintas intenciones. Si la intención es utilizar la materia para controlar o comprender mejor las propiedades de la luz, entonces caemos en lo que actualmente llamamos: óptica... pero si nuestra intención es utilizar a la luz para controlar o comprender mejor las propiedades físicas de la materia, entonces caemos en lo que actualmente se conoce como: propiedades ópticas de la materia. En resumen, nuestro objetivo aquí es exponer los principios básicos y los avances actuales en investigación sobre las propiedades ópticas de los materiales bajo el enfoque de la electrodinámica continua. Haremos también referencia a las contribuciones en este campo se realizan por nuestro grupo de investigación, en el Instituto de Física de la UNAM.

GLOSARIO

Mancha solar

Región oscura de la fotosfera donde el campo magnético es tan intenso que no deja escapar el flujo de energía confinado por debajo de este. Al no permitir el acceso de energía, la mancha solar se enfría por debajo de la temperatura promedio, apareciendo más oscura que las áreas vecinas.

Máquina térmica

Dispositivo que permite transformar energía interna en trabajo mecánico.

Masa

Medida de la cantidad de materia que contiene un cuerpo.

Masa crítica

Cantidad mínima de masa de material fisionable necesaria para que se produzca una reacción en cadena constante en un reactor nuclear o en una bomba nuclear.

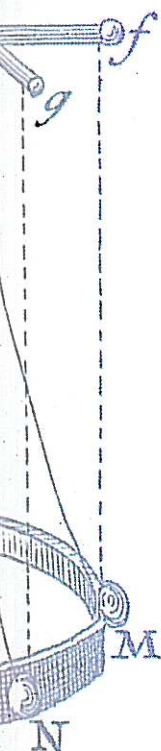
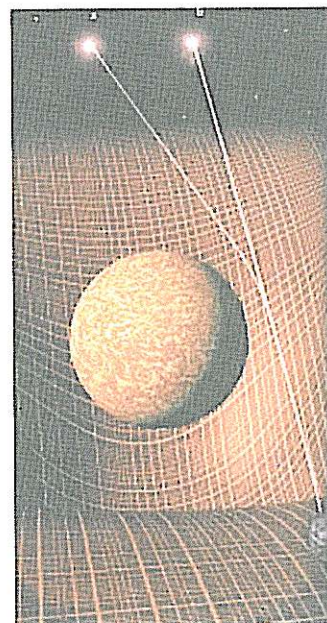
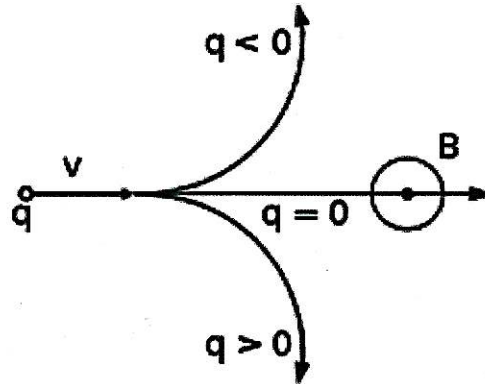


Figura 6. Fuerza del campo magnético sobre partículas con carga q . El campo magnético B está dirigido hacia afuera del papel y v representa la velocidad de la partícula.

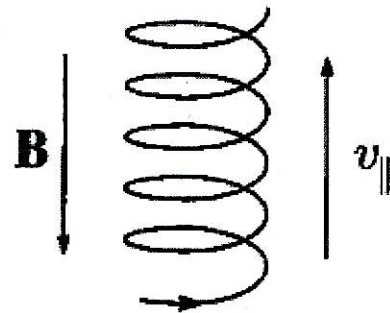


Las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas

Habíamos dicho que el campo electromagnético era un campo de fuerzas, es decir, fuerzas distribuidas en todo lugar y que podían viajar libremente a través del espacio vacío. Pero esas fuerzas... ¿sobre quien actúan?... pues esas fuerzas actúan sobre las partículas cargadas... así el campo eléctrico empuja a una partícula cargada positiva en la misma dirección que lleva el campo, mientras que a una partícula cargada negativa la empuja en la dirección contraria. Por otro lado, el campo magnético no ejerce ninguna fuerza sobre las partículas cargadas que están en reposo... el campo magnético actúa sólo si las partículas están en movimiento, y actúa de tal manera que tiende a desviarlas de su trayectoria ejerciendo una fuerza perpendicular a su velocidad y al campo magnético mismo, para un cierto lado si su carga es positiva y para el lado contrario si su carga es negativa (ver Fig. 6).

Por ejemplo, si un cierto número de partículas cargadas entran en una región del espacio donde existe un campo magnético de magnitud constante y dirigido en una cierta dirección, digamos hacia arriba, y las partículas entran con una velocidad dirigida en direc-

Figura 8. Movimiento helicoidal de una partícula cargada en un campo magnético B constante. $v_{||}$ es la velocidad de la partícula paralela al campo magnético.

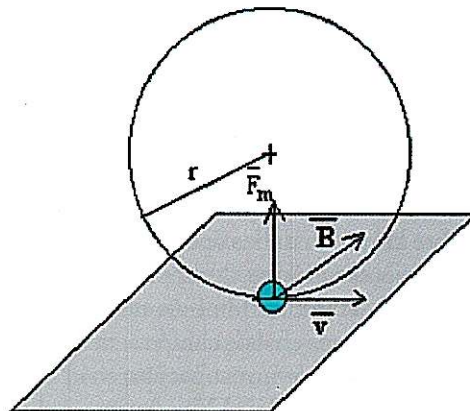


al campo y entonces se mueven en... hélices... sí en hélices, que es el movimiento combinado, de un movimiento circular con un movimiento rectilíneo con velocidad constante. El eje de la hélice estará necesariamente en la dirección del campo magnético (ver Fig. 8).

Por cierto, una forma en que se solía detectar la energía de las partículas provenientes del espacio exterior, los llamados "rayos cósmicos", era colocando un campo magnético intenso en las llamadas "cámaras de niebla", y midiendo el radio de las hélices que se hacían visibles debido a la condensación de gotitas de agua a lo largo de las trayectorias de las partículas.

Cuando una partícula cargada se encuentra en presencia de un campo electromagnético sufrirá el efecto combinado de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética, y este efecto dependerá naturalmente de la magnitud de su carga y de su velocidad. En este caso la magnitud de la fuerza eléctrica es usualmente mucho mayor que el de la fuerza magnética, a menos que la partícula este moviéndose a ve-

Figura 7. Movimiento circular de una partícula cargada que se mueve con velocidad v en presencia de un campo magnético B constante. F_m denota la fuerza magnética.



locidades comparables a la velocidad de la luz. De hecho, el cociente de la magnitud de la fuerza magnética a la fuerza eléctrica sobre la partícula, es igual a $\frac{v}{c}$, en donde v es la velocidad de la partícula y c es la velocidad de la luz. Teniendo en cuenta que la velocidad de luz es igual a 300,000 kilómetros por segundo, la partícula cargada tendría que ir a velocidades altísimas para que el efecto de la fuerza magnética fuera comparable al de la fuerza eléctrica. Si consideramos, por ejemplo, las velocidades de los electrones en un átomo, éstas llegan a ser, a lo más, iguales a un décimo de la velocidad de la luz, por lo que en este caso la magnitud de la fuerza magnética es apenas un centésimo de la magnitud ocasionada por la fuerza eléctrica.

La polarización de la materia

Vamos ahora a pensar que sucede cuando la luz se encuentra con un material cualquiera... pero a fin de cuentas... ¿qué es un material cualquiera?... un material cualquiera no es otra cosa que un conjunto de átomos y moléculas... pero los átomos y moléculas están constituidos por electrones, protones y neutrones... los protones están cargados positivamente, los electrones están cargados negativamente y los neutrones no tienen carga eléctrica... pero los protones y neutrones se unen íntimamente en lo que se llama el núcleo, con carga necesariamente positiva y que constituye la parte más pesada del átomo o la molécula... por consiguiente... y dado que en el estado sólido los átomos y las moléculas pierden su identidad... un material cualquiera no es otra cosa que un conjunto de partículas cargadas... unas positivas y pesadas... los núcleos... y otras negativas y muy ligeras... los electrones. Por otro lado, las leyes de la electricidad nos dicen que cargas de signos distintos se atraen, mientras que cargas de signos iguales se repelen. Por lo tanto para que estas atracciones y repulsiones se encuentren balanceadas, y la materia se encuentre en un estado estable, es preciso que en un material cualquiera exista el mismo número de cargas positivas que de negativas... a este estado se le llama "neutro" y la tendencia "natural" de la materia es la de buscar siempre un estado de neutralidad.

De haber un exceso de cargas de algún signo, éstas tratarán de traer a cargas de signo contrario que se encuentren fuera del material...por lo que en este estado...llamado "cargado"... no se puede decir que la materia sea estable. Y fue precisamente esta tendencia a la

neutralidad lo que hizo difícil que los antiguos se percataran de la existencia de las cargas eléctricas...de la existencia de la electricidad... para cargar un material habría que despojarlo de sus cargas "a fuerza" ...frotándolo...y así frotando el ámbar los antiguos griegos descubrieron el estado "cargado" de la materia...por cierto ámbar en griego se dice *ελεκτρον* (electrón)...de ahí el nombre de las partículas a las que ahora llamamos electrones y de la misma palabra electricidad.

Con esta visión en mente nos preguntamos ahora... que sucede cuando una onda electromagnética, en particular la luz, encuentra un material cualquiera en su estado "natural" ... en su estado "neutro". Tomando en consideración que las velocidades de las cargas eléctricas que constituyen ese pedazo de materia no viajan a velocidades muy grandes...cercasas a la velocidad de la luz...podríamos decir entonces que la fuerza preponderante sobre las cargas será la fuerza eléctrica...siendo la contribución de la fuerza magnética muy pequeña en comparación a la eléctrica. Pero... ¿que es lo que hace la fuerza eléctrica en un material cualquiera? ...pues simplemente empuja a las cargas positivas en una dirección...la dirección del campo...y a las negativas las empuja en la dirección opuesta...en pocas palabras trata de "separar" las cargas positivas de las negativas...y a esto es a lo que llamamos "polarizar" la materia...infelizmente se usa la misma palabra: polarizada, para indicar este estado de la materia en donde las fuerzas eléctricas están separando las cargas positivas de las negativas, del estado en el cual la luz se encuentra oscilando en una dirección definida...luz polarizada...en uno indica un estado de la materia y en el otro una forma de oscilación de la luz...esperamos que esto no cause confusión al lector y trataremos de ser muy explícitos cuando usemos este término en el curso de este trabajo.

Pues bien, cuando la luz llega a un material cualquiera, la fuerza eléctrica que esta conlleva empuja a las cargas positivas en una dirección y a las negativas en la dirección contraria...tratando de separarlas...pero...¿porqué separarlas?...¿es que acaso se encontraban unidas?...pues si...porque la cargas positivas... los núcleos...que son pesados...atraen a las cargas negativas, los electrones... que son mucho más ligeros...y éstos no caen en los núcleos debido a su movimiento...así como la tierra no cae en el sol debido a su movimiento en una órbita definida...en el caso de los electrones en el seno de la materia, éstos se mueven frenéti-

GLOSARIO

Mecánica

Es la más antigua de las ciencias físicas, estudia el comportamiento de los objetos materiales y tiene como especialidades la cinemática y la dinámica.

Mecánica cuántica

Rama de la física que consiste en el estudio del movimiento de los cuantos en el mundo microscópico del átomo.

Medición Física

Medir es encontrar una relación (en números) de la magnitud, de una cantidad física, para compararla con otra de la misma especie elegida como unidad. Las mediciones son indispensables en la etapa experimental del método científico, buscar

relacionar cuantitativamente las cantidades físicas que entran en juego en los fenómenos físicos.

camente, unos lo hacen alrededor de los núcleos y otros recorriendo todo el espacio ocupado por el material con trayectorias por demás indescriptibles... indescriptibles porque ya no podemos hablar de trayectorias, sino que su movimiento requieren de una descripción "cuántica"...es decir...una descripción proporcionada sólo por la mecánica cuántica. Pero independientemente de eso...son estas fuerzas de atracción entre los núcleos y los electrones las que configuran a la materia y le dan ese aspecto sólido...denso...y por lo demás con una gran diversidad...tenemos por un lado sólidos cristalinos con la belleza del diamante...o sólidos mas dúctiles como el grafito...o más brillantes como el oro y la plata...en fin...en el seno de la materia los núcleos y los electrones forman estructuras compactas...que son a la vez dinámicas...los electrones están siempre en movimiento.

Pero las fuerzas eléctricas que la luz conlleva son relativamente débiles en comparación a las fuerzas que ejercen entre ellos núcleos y electrones...por lo tanto el efecto de las luz...en este sentido...es relativamente débil y por eso decimos que su efecto es el de "separar"... de separar un poco...sólo un poco... las cargas positivas de las negativas, y decimos que la materia en este estado se encuentra "polarizada". En el caso más simple, el de un líquido, en cada molécula existe una separación de cargas y el estado polarizado es el conjunto de todas las moléculas cada una con las cargas "separadas" (ver Fig. 9).

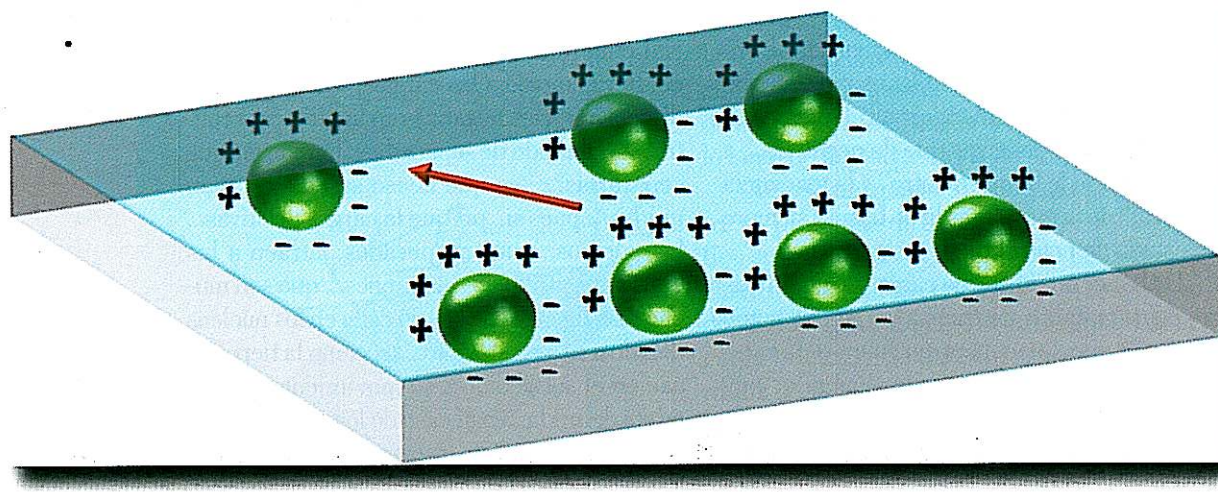
Sin embargo, hay que recordar que las fuerzas eléctricas que la luz conlleva sí varían en el tiempo, es más, oscilan extremadamente rápido, por lo que esta separación entre las cargas... esta alteración en la distribución de carga que la luz provoca...debe también oscilar extremadamente rápido... de hecho debe oscilar tan rápido como la propia luz. Sin em-

bargo, la masa que tienen las cargas hace que éstas no puedan responder instantáneamente, y a veces se "atrasen" y no puedan "seguir" a las oscilaciones de la luz incidente. Se dice entonces que las oscilaciones de la distribución de carga están "fuera de fase" con relación a las oscilaciones de la luz incidente... por el contrario cuando éstas la siguen fielmente se dice que ambas oscilaciones están "en fase". En conclusión...la presencia de la luz en un material provoca que su distribución de carga se altere...las cargas positivas y negativas se separan un poco y esta separación oscila a la frecuencia de la luz incidente... a veces en fase... a veces fuera de fase.

Otra de las consecuencias de las leyes de la electrodinámica es predecir el hecho de que cuando una partícula cargada es acelerada, la partícula va a radiar ondas electromagnéticas... en particular si se pone a la partícula a oscilar con una cierta frecuencia, ésta generará ondas electromagnéticas de exactamente la misma frecuencia... y la energía que cuesta poner a oscilar a la partícula cargada es exactamente la misma energía que es transportada por las ondas electromagnéticas así generadas... este es uno de los resultados más sorprendentes e interesantes de la electrodinámica, y a este tópico se le denomina: "teoría de la radiación", en donde la palabra radiación significa generación... producción... emisión... de ondas electromagnéticas.

Por cierto, uno de los enigmas más inquietantes durante los inicios de la mecánica cuántica era explicar porqué, si en el seno de los materiales los electrones se encuentran en movimiento perpetuo, realizando una "danza" interminable con movimientos... rápidos... muy rápidos... y seguramente acelerados. La pregunta era ¿porqué, si se tienen evidentemente partículas cargadas en movimiento acelerado... porqué éstas partículas no emiten

Figura 9. Representación esquemática de la materia. Los círculos (verdes) representan las moléculas, los signos + y - representan las cargas de polarización y la flecha (roja) es la dirección del campo eléctrico responsable de la polarización.



ondas electromagnética? Por otro lado si emitirían radiación electromagnética, ésta transportaría energía, la cual debería provenir necesariamente de la energía de movimiento de las cargas, las cuales al emitir radiación tendrían que ir disminuyendo su energía de movimiento y con el paso del tiempo, terminar finalmente unidas a los núcleos...en completa pasividad... en reposo absoluto.

Pero esto no sucede... y no sucede porque estas partículas cargadas en movimiento no son capaces de producir radiación electromagnética... simplemente no son capaces de radiar. Pero esto está en contra de las leyes de la electrodinámica... de las ecuaciones de Maxwell... pues sí... es cierto... está en contra de las leyes de la electrodinámica... pero... que le vamos hacer... si no son capaces de radiar... o ¿será porqué como no tienen trayectorias definidas, no se puede decir que están aceleradas?... ¿será?... Pero independientemente de la razón que pudiéramos encontrar, vamos a tener que aceptarlo... que otra nos queda... en efecto... no nos queda otra... y lo que se hace en estos casos es ponerle a esta aceptación un nombre rimbombante, para hacerla parecer como algo más profundo. De esta manera decimos ahora que dentro de los principios de la mecánica cuántica existe lo que se llama: un "estado base" o un "estado fundamental" de la materia, el cual está caracterizado por poseer una energía mínima. Y como en este estado fundamental la energía del sistema de cargas no puede disminuir... está en un estado de mínima energía... y como la producción de radiación haría que la energía de movimiento de las cargas forzosamente disminuyera... pues entonces... las cargas no pueden radiar... ¿pero, porqué?... porqué el sistema de cargas está en su estado fundamental... punto. Claramente esto no es ninguna explicación... ninguna en absoluto... es simplemente una aceptación... una aceptación adornada con la elegancia de los tecnicismos, como el de: "estado fundamental"... y no más.

La electrodinámica continua

Regresemos ahora a nuestro problema de describir que sucede cuando la luz se encuentra con un material cualquiera, tomando en cuenta lo comentado arriba. Propondríamos entonces cambiar un poco la forma en que el problema estaba formulado y ahora nos preguntaríamos... ¿qué sucede cuando la luz se encuentra con un material cualquiera... en su estado fundamental?... pues lo que ahora

podemos decir es que las fuerzas ejercidas sobre las cargas que componen la materia la polarizan... separan un poco las cargas positivas de las negativas produciendo oscilaciones en la distribución de carga que sacan a la materia fuera de su estado fundamental... como estas oscilaciones adquieren la frecuencia de las luz incidente y la materia ya está fuera de su estado fundamental... entonces ya es posible la radiación... ya es posible que estas oscilaciones de cargas produzcan radiación electromagnética con la misma frecuencia que la luz incidente. Por lo tanto, en el seno del material tenemos un campo electromagnético extremadamente complicado... un campo electromagnético que es la suma del campo electromagnético incidente más la suma de los campos electromagnéticos radiados por todas las cargas que componen al material. Este campo electromagnético varía en el espacio de forma muy irregular y abrupta en distancias del orden de la separación entre los núcleos atómicos... y aún más chicas... y el cálculo de este campo electromagnético sería clasificado dentro de lo que antes llamamos teorías de esparcimiento múltiple... y que aseguramos eran humanamente imposibles de realizar.

Sin embargo vamos ahora a pensar en algo más práctico... y a la vez más realista. Hay que pensar primeramente en el objetivo de nuestro cálculo... ¿para qué queremos calcular ese campo electromagnético usando las teorías de esparcimiento múltiple?... ¿para qué? Pues lo queremos calcular para compararlo con las mediciones que hagamos de ese mismo campo y así poder discernir si nuestros modelos sobre la estructura microscópica de los materiales es consistente con las mediciones... dándonos así una mayor confianza para poder utilizar estos modelos para predecir otras propiedades del mismo material o poder explicar otros fenómenos o experimentos relacionados con él. Pero para hacer esto tenemos que poner atención no sólo en lo que vamos a medir, sino también en la sensibilidad y la precisión de nuestras mediciones. Por ejemplo si queremos medir el campo electromagnético que se genera en el interior de un material cualquiera, vamos a tener que reconocer que nuestros aparatos de medición no tienen la sensibilidad suficiente para discernir variaciones espaciales tan...tan pequeñas... con dimensiones atómicas... entonces ¿qué caso tiene tratar de desarrollar una teoría que sea capaz de calcularlas con ese grado de precisión?... nos preguntamos entonces ¿cuál es la sensibilidad espacial de nuestros aparatos?...

GLOSARIO

MeV

Mega-electrón-volt, o 1 millón de electrón-volt de energía.

Método científico

Es una serie de pasos lógicos que garantizan un cambio efectivo para adquirir, organizar y aplicar nuevos conocimientos.

Método deductivo

Procedimiento científico que explica casos físicos particulares a partir de principios o leyes generales.

Método inductivo

Procedimiento científico que parte de hechos individuales y concretos para remontarse a leyes generales que los interpretan.

Metro

Es la longitud de trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo. Símbolo [m].

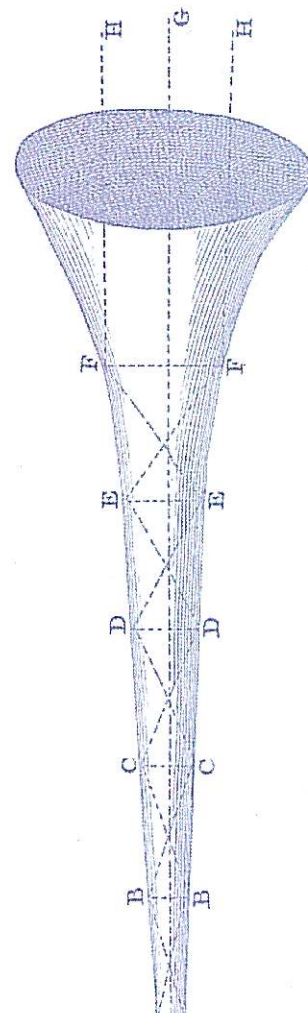
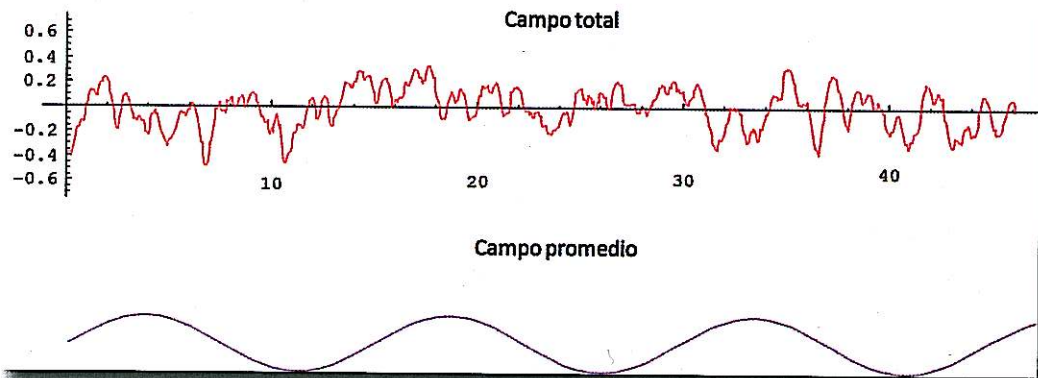


Figura 10. El promedio visto como un proceso de "suavización" de las variaciones "rápidas" del campo total.



pues depende... ¿depende de qué?... pues depende de cual sea la longitud de onda del campo incidente... bueno digamos que se encuentra en la parte del espectro electromagnético correspondiente al visible... en este caso nuestro aparatos podrán discernir fácilmente variaciones espaciales del orden de la longitud de onda del visible... que serían de unas décimas de micra... ¿y se podrían discernir variaciones espaciales más pequeñas... digamos... del orden de las dimensiones atómicas? ... no creo... aunque tal vez fuera posible... pero no sé... lo que es seguro es que sería mucho muy difícil.

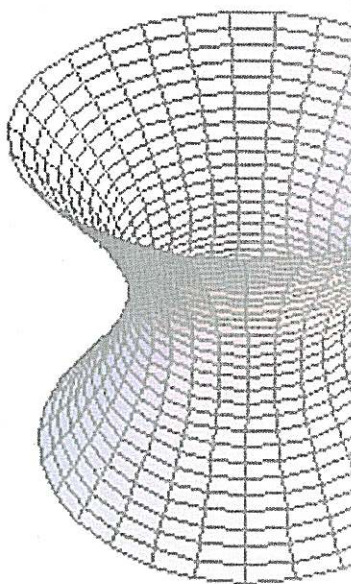
Ante esta situación es claro que si estamos interesados en las propiedades ópticas de los materiales sería suficiente conocer el campo electromagnético a la escala de la longitud de onda del visible, o sea, de unas décimas de micra, que es la correspondiente a la sensibilidad espacial de nuestros aparatos de medición. Desde el punto de vista del problema teórico... del problema del cálculo del campo electromagnético en el interior de una material cualquiera... esto se puede realizar promediando el campo electromagnético... el procedimiento para promediar es un procedimiento matemático perteneciente a los llamados método estadísticos. Para nuestro propósito aquí baste decir que el resultado de este proceso de promediar es el de "suavizar" las variaciones espaciales hasta una escala de longitud determinada... que en nuestro caso sería del orden de unas décimas de micra. Al resultado de este proceso se le llama el campo electromagnético promedio o campo electromagnético macroscópico (ver Fig. 10).

Bajo este proceso podríamos entonces pensar que el campo electromagnético total en el seno de un material cualquiera se puede concebir como la suma del campo electromagnético promedio, más lo que quedó del campo electromagnético total después de haber quitado el promedio. Esto que quedó

es a lo que se llama: las fluctuaciones del campo o campo fluctuante, y resulta que las variaciones espaciales de este campo fluctuante no sólo son menores a la longitud de onda, como era de esperarse, sino que resultan ser mucho... mucho... menores. Por lo tanto, el campo electromagnético total se puede concebir como la suma de dos campos: el campo promedio, que viaja en una sola dirección y que varía "lentamente", espacialmente hablando, más, el campo fluctuante, que viaja en muchas direcciones y que varía muy "rápidamente", también espacialmente hablando (ver Fig. 11). Como si hubiera sólo dos escalas de variación espacial, una del orden de la longitud de onda del campo incidente y otra mucho más pequeña, del orden de las dimensiones atómicas. Pero pensándolo bien, tal vez este resultado era de esperarse, ya que en nuestro sistema físico existen también sólo dos longitudes características, la longitud de onda de la luz incidente y la distancia "típica" entre electrones y electrones, electrones y núcleos, núcleos y núcleos... y estas distancias son del orden de las dimensiones atómicas.

Por cierto, la palabra fluctuante viene de la palabra fluctuación, que en el lenguaje común quiere decir vacilación, balbuceo... que indica un comportamiento distinto, breve e incontrolable de una persona en relación a su comportamiento habitual... y en física se usa esta palabra para indicar el comportamiento, en general azaroso y no muy significativo, de alguna cantidad, en comparación al comportamiento del promedio de esa misma cantidad.

Ahora, lo que es realmente extraordinario, es que el campo promedio se comporta de una manera no esperada... se comporta como una onda electromagnética que viaja en la misma dirección que la onda incidente, que tiene la misma frecuencia de oscilación, que tiene una sola longitud de onda... pero diferente... sí... diferente a la longitud de onda

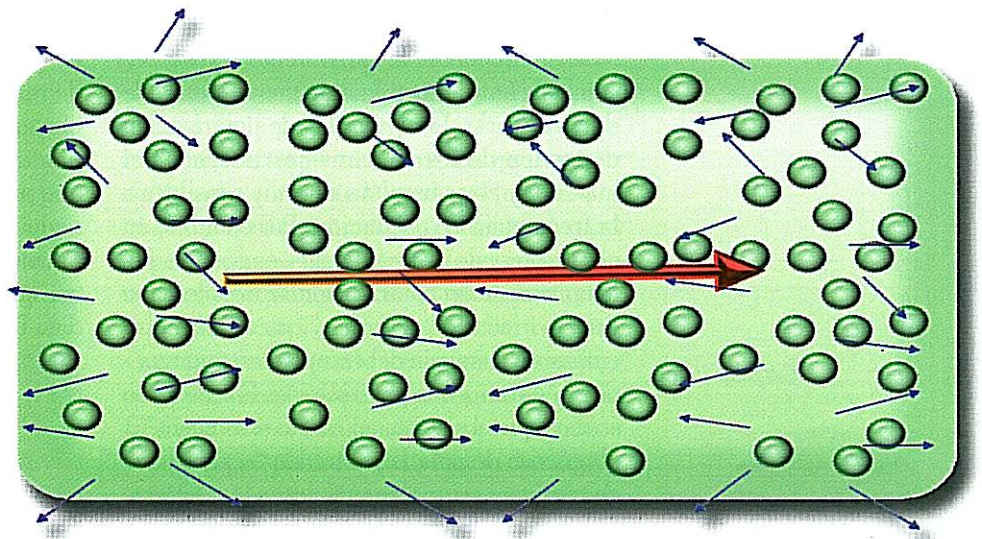


de la luz incidente. Además, la energía que transporta el campo promedio resulta ser mucho... mucho mayor que la que transporta el campo fluctuante. Resumiendo, tenemos el siguiente panorama, cuando una onda electromagnética con una cierta longitud de onda incide en un material, las fuerzas que ésta ejerce sobre las cargas que componen el material, sacan a la materia de su estado fundamental y provocan oscilaciones de la distribución de carga que oscilan a la misma frecuencia que la onda incidente. Debido a esta oscilación fuera del estado fundamental, las cargas del material reemiten a su vez un campo electromagnético, con una distribución espacial complicada. Sin embargo este campo electromagnético con una distribución espacial complicada, puede ser considerado como la suma de un campo promedio, más un campo fluctuante. El campo promedio se comporta como una onda electromagnética que viaja en la misma dirección que la onda incidente pero con una longitud de onda distinta, y el campo fluctuante, con variaciones espaciales mucho muy pequeñas, viaja en todas direcciones transportando una energía mucho menor que la que transporta el campo electromagnético promedio.

Con esta visión en mente, el proceder de lo que llamamos ahora la Electrodinámica Continua o Electrodinámica Macroscópica, es el de despreocuparse de la presencia de la componente fluctuante del campo electromagnético. En física la palabra despreocuparse no tiene ninguna carga afectiva, quiere decir simplemente, ignorar... no tomar en consideración. Por consiguiente, la Electrodinámica Continua no toma en consideración la presencia del campo fluctuante, y considera a los materiales como medios continuos en donde viaja únicamente el campo electromagnético promedio. Este proceder resulta aproximadamente correcto... casi correcto... debido a que la energía que transporta el campo fluctuante es mucho menor que la transportada por el campo promedio. Esto sucede en "el visible" para la gran mayoría de los materiales, razón por la cual la Electrodinámica Continua o Macroscópica es considerada como una teoría adecuada para describir el comportamiento del campo electromagnético, en especial el de la luz, en el interior de los medios materiales.

La permitividad eléctrica

Es conveniente agregar, que dentro de la Electrodinámica Continua los fenómenos de polarización de la materia están referidos, naturalmente, a la polarización promedio provocada por el campo eléctrico promedio. La magnitud de esta polarización promedio resulta ser directamente proporcional, en una gran cantidad de materiales, a la amplitud del campo eléctrico, promedio, responsable de provocarla. Es decir, si la amplitud de este campo promedio se duplica, la polarización promedio también se duplica... si se triplica, la polarización también se triplica... etcétera. A estos materiales se les llama materiales lineales, porque en matemáticas, a la proporcionalidad directa se le llama dependencia "lineal", y a esta capacidad de polarizarse, se le denomina la permitividad eléctrica y se denota comúnmente por la letra griega ϵ (épsilon). Entre más grande sea ϵ mayor será la facilidad de este material para ser polarizado. Por tradición, y en la física la tradición es muy respetada, la permitividad eléctrica de los materiales no se mide a partir de cero, sino que se mide a partir de un valor denominado ϵ_0 (épsilon cero) y que según la tradición, correspondería al valor que Maxwell le asignó a la polarización del éter electromagnético.



Con esta convención el vacío tiene $\epsilon = \epsilon_0$, la porcelana $\epsilon = 7\epsilon_0$ y el agua $\epsilon = 80\epsilon_0$. Como se ve el agua es un material altamente polarizable. El caso del agua es un caso peculiar porque lo que sucede en el agua, es que las moléculas son "polares", es decir, ya tienen, permanentemente, las cargas positivas un poco separadas de las negativas. Ahora, en presencia de un campo eléctrico, estas moléculas

GLOSARIO

Micra o micrón

La millonésima parte de un metro.

mol

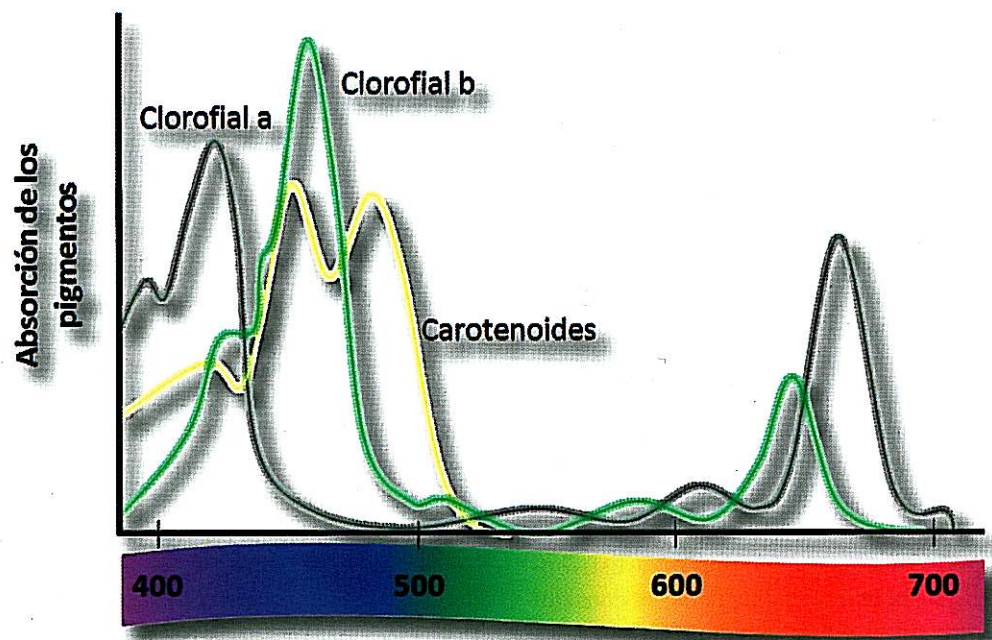
Es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0.012 kilogramos de carbono ¹². Unidad [mol].

Molécula

La combinación a través de enlaces entre dos o más átomos de algún tipo. 2) Mínima cantidad de una sustancia que conserva sus propiedades químicas. Por lo general, una molécula está compuesta por varios cuantos átomos, y se la llama diatómica, triatómica o poliatómica según estén formadas por dos, tres o muchos átomos, respectivamente.

Figura 11. Representación esquemática de la dirección de propagación del campo promedio (rojo) y del campo fluctuante (azul). Las esferas (verdes) representan partículas cargadas.

Figura 12. Longitu de onda



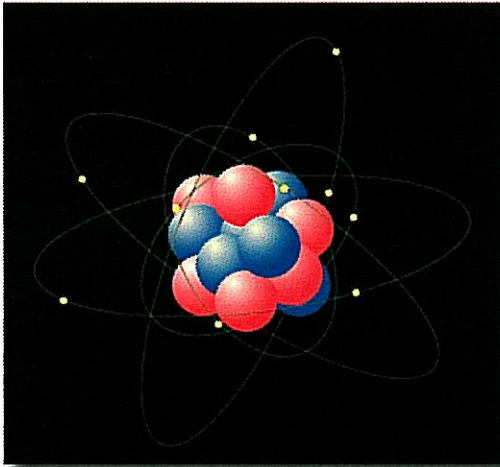
se “orientan” muy fácilmente a lo largo de la dirección del campo, provocando una polarización muy intensa. Estos valores de ϵ corresponden al caso cuando el campo eléctrico que polariza la materia es un campo constante, que no varía en el tiempo. Por esta razón, en este caso, a la permitividad eléctrica también se le llama constante dieléctrica. Pero este no es, definitivamente, el caso de la luz, porque el campo eléctrico que la luz conlleva oscila muy rápidamente... y resulta pues... que la polarización promedio de un material depende de la frecuencia de oscilación del campo electromagnético responsable de provocarla. Los procesos de polarización dependen de los mecanismos internos del material y estos resultan ser muy sensibles a la frecuencia de oscilación. Por ejemplo, en cierto intervalo de frecuencias, es posible que los procesos de polarización se acoplen con los movimientos “naturales” que tendrían las cargas en ausencia del campo electromagnético que provoca la polarización. En este caso se dice que el sistema entra “en resonancia”... el proceso de polarización... de “separación” de cargas... se vuelve más intenso y en este intervalo de frecuencias el material absorbe preferentemente mucho más energía, que en frecuencias mayores o menores que las del intervalo. A estos intervalos de frecuencias se les llama “bandas de absorción”. Como a la luz de una determinada frecuencia le corresponde una cierta longitud de onda, en la Fig. 12 mostramos las bandas de absorción de algunos pigmentos como función, no de la frecuencia del campo electromagnético, sino como función de su longitud de onda.

Wolfgang Pauli



Un ejemplo muy familiar de las “bandas de absorción” es lo que sucede en un horno de microondas. Las frecuencias del campo electromagnético en el interior del horno, que corresponden a las microondas, están ajustadas a las frecuencias “naturales” de rotación de las moléculas de agua en ausencia del campo. En este intervalo de frecuencias, durante medio ciclo el campo eléctrico “orienta” a las moléculas de agua en una dirección mientras que en el otro medio ciclo las “orienta” en la dirección opuesta... provocando un acoplamiento con sus movimientos naturales de rotación. El resultado de todo esto es que el agua absorbe energía, se calienta... se calienta... y es este calentamiento del agua lo que produce la cocción. Para aquellos aficionados a la cocina, es claro que existe una gran diferencia entre cocinar en un horno normal que cocinar en un horno de microondas. Por ejemplo, mientras en un horno normal la cocción de un trozo de carne comienza por la superficie, que es la región más próxima al calor, y lentamente va hacia el centro, en un horno de microondas, la cocción comienza por el centro, que es la región del pedazo de carne más húmeda... con mayor cantidad de agua... y lentamente va a la superficie... que es la región más seca.

Desde un punto de vista más técnico se dice que la permitividad eléctrica ϵ es una función de la frecuencia... que depende de la frecuencia... que es distinta para distintas frecuencias, y se escribe como $\epsilon(\omega)$, en donde la cantidad entre paréntesis es la letra griega ω (omega), que denota la frecuencia, y se lee como: épsilon de omega. A esta dependencia



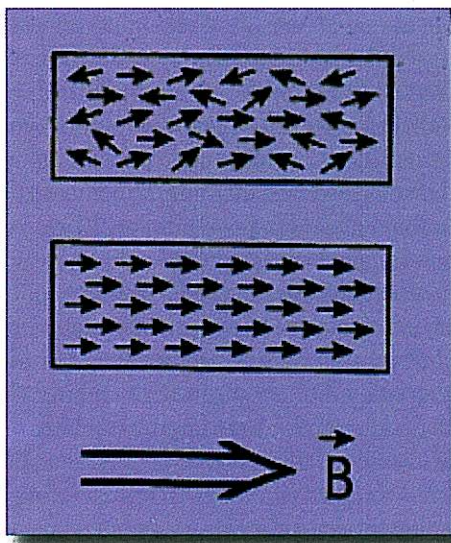
con la frecuencia se le llama "dispersión" y a los medios materiales que la presentan se les llama medios dispersivos.

La permeabilidad magnética

Creo que es conveniente, si no que por complejidad, comentar algo sobre los efectos magnéticos que provoca la luz en los materiales. Ya habíamos dicho que las partículas subatómicas, electrones y núcleos, no iban suficientemente rápido para que los efectos de las fuerzas magnéticas que conlleva luz, fueran comparables a los efectos de las fuerzas eléctricas... y eso es cierto...absolutamente cierto...sobre todo en el intervalo de frecuencias correspondiente a la luz visible. Sin embargo existe otro hecho, desconocido por completo para los antiguos electrodinámicos, que resulta ser de primordial importancia para la comprensión y el entendimiento del magnetismo. El hecho es que a principios del siglo XX, en 1925 para ser más precisos, se propone que para poder explicar... para poder interpretar... ciertos experimentos de física atómica, era necesario suponer que el

electrón, además de tener carga eléctrica con la cual genera campos eléctricos, también posee espín, con el cual también generaba campos magnéticos. La palabra espín, viene del inglés: to spin, que significa, rotar... girar. La idea del espín fue propuesta por Wolfgang Pauli, uno de los impulsores de la mecánica cuántica, un año antes de la exitosa interpretación de los experimentos arriba mencionados, y en términos muy mundanos se puede uno imaginar que el electrón es una partícula muy pequeña, con carga negativa, que gira sobre sí misma, a manera de trompo... y como ese giro implicaba el tener cargas en movimiento... es decir... el tener corrientes eléctricas... este giro generaba entonces campos magnéticos (ver Fig. 13). El espín resultó ser entonces el actor principal en las ideas que se generaban para explicar el magnetismo. Esto no excluía a las corrientes moleculares, pero las desplazaba a jugar un papel de actores secundarios. Cuando los espines y/o las corrientes moleculares se orientan a lo largo de una dirección, se dice que el material está magnetizado... y esta magnetización, para cierto tipo de materiales, llamados materiales lineales, y que no son los imanes, resulta ser directamente proporcional al campo magnético promedio que la provoca (ver Fig. 14). Al igual que introdujimos anteriormente el concepto de permitividad eléctrica, se introduce aquí el concepto de permeabilidad magnética, que se denota con la letra griega μ (mu) y cuya magnitud indica la facilidad que tiene un material para ser magnetizado. Al igual que el caso de la permitividad eléctrica, ésta se mide no con respecto a cero sino que a partir de un valor constante llamado μ_0 (mu cero), y que de acuerdo a la tradición correspondería al valor que Maxwell le atribuía a la magnetización del éter electromagnético. Al igual que la permitividad eléctrica la permeabilidad magnética es una función de la frecuencia, lo que significa que su valor va a depender de la frecuencia de oscilación del campo magnético promedio, responsable del proceso de magnetización. Así, para el vacío, que no se puede magnetizar, tenemos que $\mu = \mu_0$, mientras que para la mayoría de los materiales, en las frecuencias correspondientes al visible, la μ difiere de la μ_0 , por valores del orden de ± 0.000001 veces μ_0 ... o sea, que es prácticamente igual a la del vacío... implicando así, que los efectos de magnetización para estas frecuencias, no juegan ningún papel relevante.

Por último quiero añadir que la comprensión y el entendimiento del magnetismo en imanes y materiales magnéticos no lineales,



GLOSARIO

Momentum

Producto de la masa de un objeto por su velocidad.

Momentum angular

Producto de la inercia rotacional por la velocidad rotacional.

Monitor de neutrones

Detectores colocados, generalmente en la superficie terrestre para contar neutrones producidos en colisiones de rayos cósmicos energéticos con los núcleos de átomos atmosféricos. La tasa de conteo es generalmente usada para medir la intensidad de los rayos cósmicos galácticos en las cercanías de la Tierra.

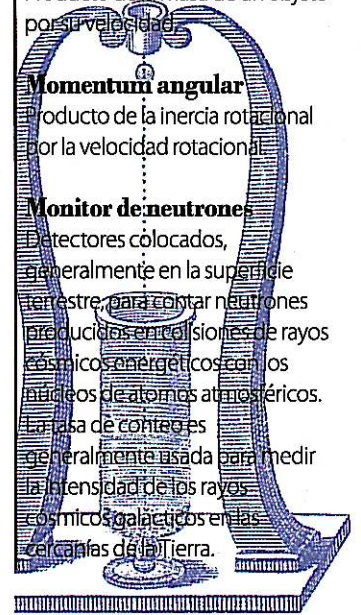


Figura 13. El electrón además de carga tiene espín. Figurativamente puede uno imaginarlo como una partícula girando sobre su propio eje.

Figura 14. El campo magnético B orientando a los espines y a las corrientes moleculares. En los materiales lineales la orientación es proporcional a B.

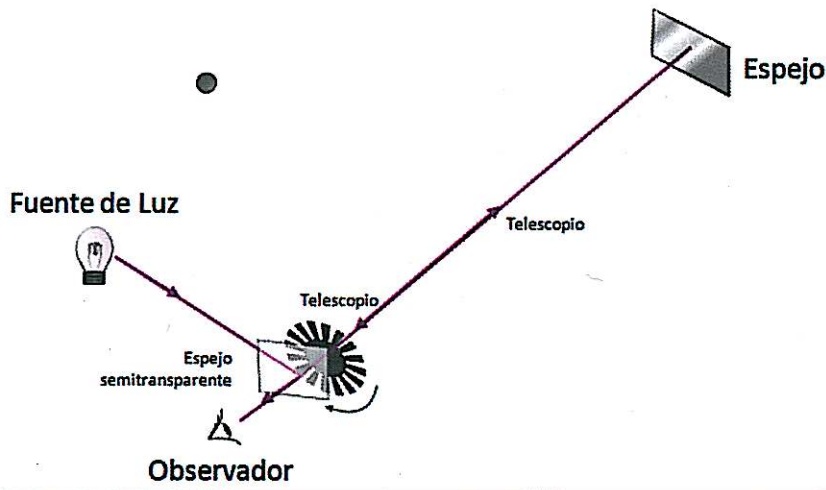


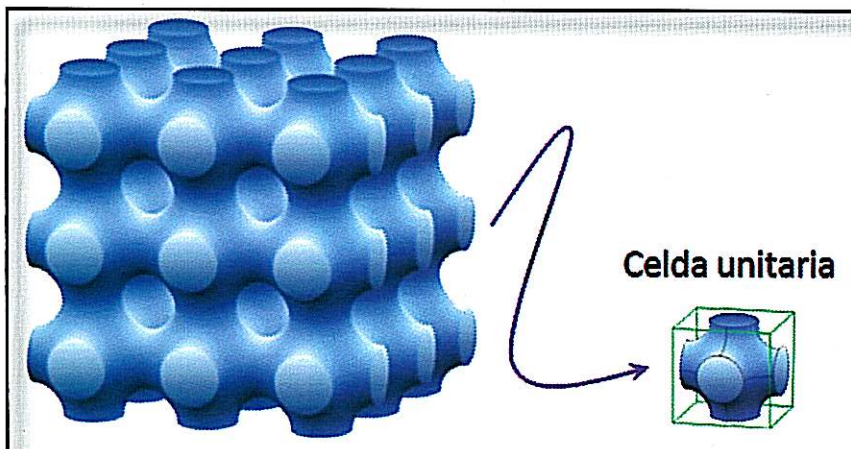
Figura 15. El montaje del experimento de Fizeau para medir la velocidad de la luz.

es algo sumamente complicado, que aunque ha habido avances importantes, esta todavía lejos de ser comprendido en su totalidad.

El índice de refracción

Bajo la visión de la Electrodinámica Continua cuando la luz de una cierta longitud de onda entra a un medio material simplemente sigue viajando dentro del material como una onda electromagnética de la misma frecuencia, pero con una longitud de onda distinta, en general, más grande. Como esta longitud de onda "aparente" es en general mayor que la de la luz incidente, se puede pensar que la luz tarda más en completar un ciclo de oscilación... o sea... se puede pensar que la luz dentro del material viaja más despacio. Esta fue precisamente la interpretación que adoptó el físico francés Leon Foucault cuando fue capaz de medir directamente, en el laboratorio, y con precisión, la velocidad de la luz en el agua, allá por 1862. Foucault fue discípulo de Armand Fizeau, que fue el primero en medir la velocidad de la luz sin utilizar métodos astronómico, sino con mediciones hechas en la ciudad de París, en 1849,

Figura 16. Material periódico mostrando la celda unitaria, la cual se repite en las tres dimensiones



un año después de la ocupación del ejército norteamericano en México. A. Fizeau colocó, dos espejos separados 31 kilómetros, en dos colinas de la ciudad de París, uno de ellos en Montmartre y el otro en Suresnes, e hizo que la luz pasara entre los espacios libres de una rueda dentada que giraba rápidamente, y a la cual podía observar por medio de unos telescopios. El propósito de la rueda dentada era el de producir pulsos de luz y tratar de medir el tiempo que tardaban en ir y regresar después de ser reflejados por un espejo (ver Fig. 15). Posteriormente, Foucault perfeccionó el método de Fizeau utilizando un espejo giratorio, en vez de la rueda dentada, e interpuso en el viaje de la luz un tubo lleno de agua. De esta manera fue capaz de medir con mucha precisión la velocidad de la luz en el agua, dentro de su propio laboratorio. El resultado de sus mediciones indicaba que la velocidad de la luz en el agua era $3/4$ de su valor en el aire. Dado que la diferencia entre el valor de la velocidad de la luz en el aire y en el vacío es imperceptible, se puede decir que la velocidad de la luz en el agua es $3/4$ de la velocidad de la luz en el vacío. Es más, al cociente de la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en un medio material se le dio un nombre técnico... se le llamó: el índice de refracción, y así cada material tiene asociado un índice de refracción, que indica, que más rápido viaja la luz en el vacío con respecto a su velocidad en el interior del material. Así, para el agua el índice de refracción es $4/3 = 1.333$ (el inverso de $3/4$), para el vidrio común es alrededor de 1.50, para el bióxido de titanio es 2.8, y así... para todos los demás materiales se cuenta ahora con tablas en donde aparecen listados una gran cantidad de materiales... o se consulta en Google.

Para determinar el índice de refracción de un material dado, hay que medir la velocidad de la luz en el seno de dicho material y después, utilizando la definición de índice de refracción dada anteriormente, habría que dividir la velocidad de la luz en el vacío entre esta cantidad. Es interesante hacer notar que hubiera sido mucho más simple comenzar este trabajo diciendo, por ejemplo: "El concepto fundamental en las propiedades ópticas de los materiales es el índice de refracción, que está definido como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en el medio"... y punto. Sin embargo hemos dado un rodeo muy largo y en cierto sentido tortuoso... hablamos de átomos... moléculas... mecánica cuántica... estado fundamental... radiación electromagnética...

campo promedio... fluctuaciones... y todo... ¿para qué? Todo esto, para poder entender con mayor claridad, que cuando se dice que la luz viaja más despacio en un material, como el agua, no se quiere decir realmente que la luz viaja más despacio. A este respecto queremos insistir que la luz nunca "viaja más despacio"... la luz siempre "viaja" a la misma velocidad... y como ya habíamos comentado anteriormente, este es uno de los principios más respetados de la física moderna. Lo que queremos decir realmente con la frase: "la luz viaja más despacio", es que si despreciamos las fluctuaciones del campo electromagnético, la velocidad "aparente" de el campo electromagnético promedio en el seno de un material cualquiera, es menor que la velocidad de la luz en el vacío... y ahora si entendemos lo que esto quiere decir.

En los materiales existe otro fenómeno que es necesario incluir en nuestra descripción de la propagación de ondas electromagnéticas en medio materiales. Este fenómeno es: la absorción. Cuando una onda electromagnética pasa a través de un material, ésta, en general, pierde energía, es decir, a su paso por el material la onda va cediendo energía al material, la cual, en general, se convierte en calor, y por esta razón su amplitud del campo va disminuyendo. Si la absorción es suficientemente grande o el material es suficientemente ancho, es posible que la luz ya no lo pueda atravesar y decimos entonces que el material ya no es transparente, sino que es opaco.

El tratamiento matemático de la absorción conlleva a dificultades matemáticas muy severas, porque los mecanismos de absorción en la mecánica cuántica no tienen una formulación simple y completamente aceptada por la comunidad de físicos en este tema y usualmente lo que se hace, es que los efectos de absorción se introducen "a mano", es decir en términos de ciertas cantidades ajenas a la teoría pero que pueden simular adecuadamente los decaimientos de amplitud de las ondas electromagnéticas debidos a la absorción de energía. Al final el valor de estas cantidades se ajusta "a mano" para que los decaimientos de amplitud resulten congruentes con los obtenidos en las mediciones experimentales.

No quisiera terminar esta sección sin escribir una ecuación... una sola ecuación... la única ecuación en este escrito... una ecuación, a la que mi amigo Peter Halevi, distinguido investigador de Tonanzintla, cataloga como la ecuación más importante de toda la física. Esta ecuación es extremadamente sim-



ple y de una belleza extraordinaria... cautivadora... se deduce de las ecuaciones de Maxwell... y se escribe así:

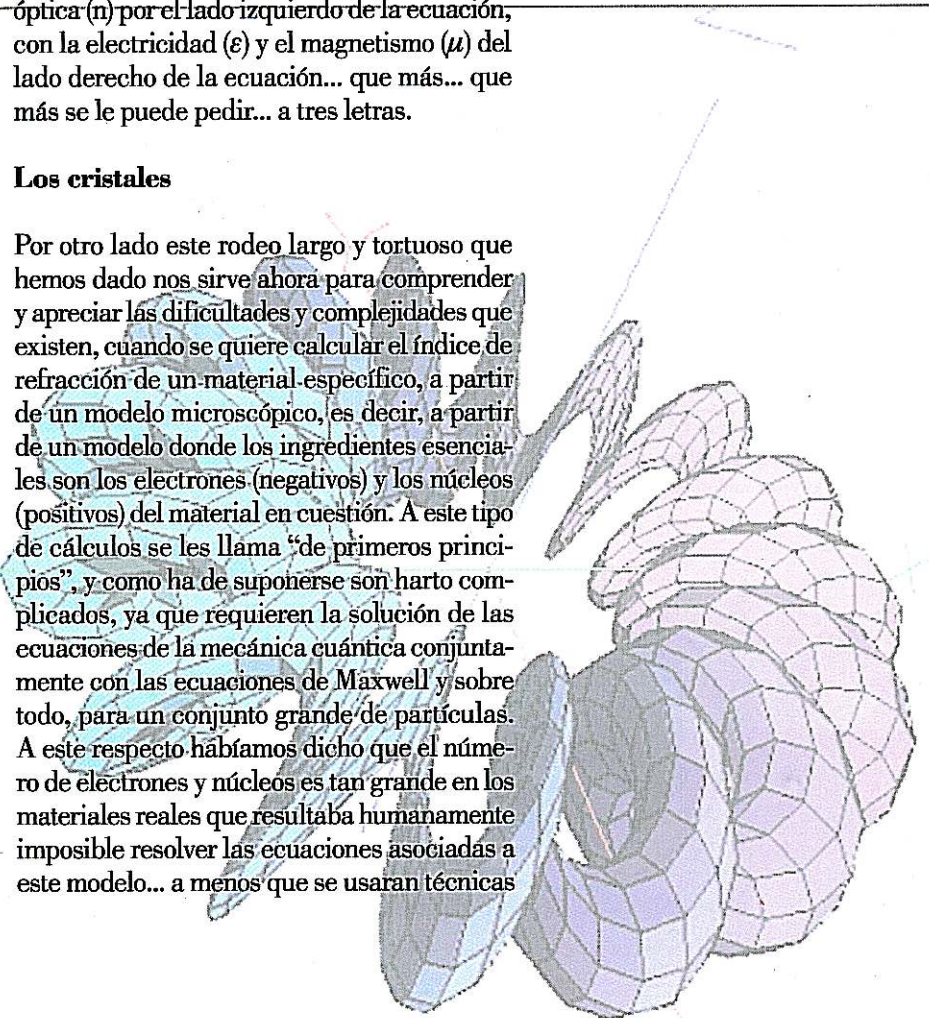
Material opaco

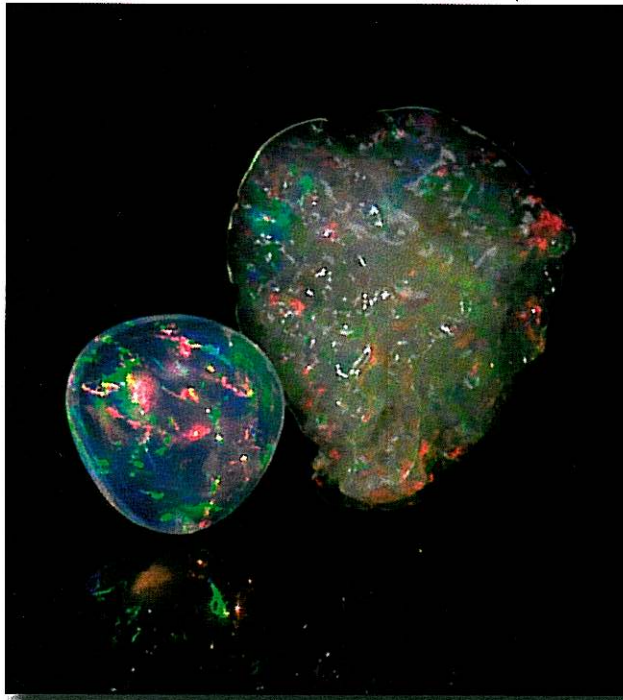
$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

Esta ecuación relaciona al índice de refracción n , con la permitividad eléctrica ϵ y la permeabilidad magnética μ . Y se lee: ene igual a la raíz cuadrada de épsilon por mu. Pero... ¿porqué esta ecuación puede ser considerada la más importante de toda la física?... pues... simplemente... porque en una sola línea... y con únicamente tres letras... una latina y dos griegas... esta ecuación unifica tres ramas de la física que durante varios siglos fueron consideradas como disciplinas distintas: la óptica (n) por el lado izquierdo de la ecuación, con la electricidad (ϵ) y el magnetismo (μ) del lado derecho de la ecuación... que más... que más se le puede pedir... a tres letras.

Los cristales

Por otro lado este rodeo largo y tortuoso que hemos dado nos sirve ahora para comprender y apreciar las dificultades y complejidades que existen, cuando se quiere calcular el índice de refracción de un material específico, a partir de un modelo microscópico, es decir, a partir de un modelo donde los ingredientes esenciales son los electrones (negativos) y los núcleos (positivos) del material en cuestión. A este tipo de cálculos se les llama "de primeros principios", y como ha de suponerse son harto complicados, ya que requieren la solución de las ecuaciones de la mecánica cuántica conjuntamente con las ecuaciones de Maxwell y sobre todo, para un conjunto grande de partículas. A este respecto habíamos dicho que el número de electrones y núcleos es tan grande en los materiales reales que resultaba humanamente imposible resolver las ecuaciones asociadas a este modelo... a menos que se usaran técnicas





pico, y lo que se repite, es esta celda unitaria, la cual no contiene partículas subatómicas sino pequeñas partículas compuestas por un material, que ya de por sí tiene su propio índice de refracción.

Un ejemplo típico de un cristal fotónico es el ópalo... sí... el ópalo... esa bella piedra que encontramos en anillos y collares adornando las manos y los cuellos de las damas... y que se compran en joyerías. El ópalo es el resultado de apilar, por sedimentación y compresión en el seno de la corteza terrestre, durante periodos geológicos, pequeñas esferitas de silicato, formándose así amplias regiones con un arreglo periódico tridimensional. En este caso, la celda unitaria contiene una sola esferita, la cual se repite... y se repite... cuando uno se desplaza en las tres

los sesenta. Tampoco es una exageración afirmar que uno de los cristales más estudiados es el silicio, en mucho por sus aplicaciones en la industria de transistores, y que una concordancia aceptable entre los resultados de los cálculos de la permitividad eléctrica y las mediciones experimentales, no se logra hasta bien entrada la década de los setenta. El problema fundamental se encuentra en poder resolver las ecuaciones de la mecánica cuántica, con un cierto grado de aproximación, tomando en consideración de una manera más o menos precisa, la repulsión entre los electrones. Aunque existen técnicas sofisticadas para tratar este problema, como las teorías enmarcadas en la llamada "física de muchos cuerpos", la repulsión electrónica sigue siendo actualmente el meollo de las dificultades.

Los cristales fotónicos

Un problema de gran actualidad y que ha atraído la atención de muchos investigadores es el estudio de la propagación de la luz en los llamados cristales fotónicos. La diferencia entre los cristales comunes, como el diamante, la sal, y los cristales fotónicos consiste en el contenido de la celda unitaria. Mientras en los cristales comunes la celda unitaria contiene, átomos, moléculas o, en general, núcleos y electrones, en los cristales fotónicos la celda unitaria contiene partículas de tamaño mesoscópico, con un índice de refracción bien definido. Por tamaño mesoscópico queremos decir un tamaño que está entre lo microscópico y lo macroscó-

direcciones del espacio (ver Fig. 18). El silicato tiene un índice de refracción de alrededor de 1.5 y las esferitas se encuentran rodeadas de aire, con un índice de refracción igual a 1.0. Por lo tanto, si queremos ser más precisos, el contenido de la celda unitaria no contiene sólo una esfera de silicato, sino también contiene al aire que la rodea, y esta configuración: esfera más aire, es la que se repite y... repite... una gran cantidad de veces. Como vemos en la celda unitaria existen dos materiales: silicato más aire, con índices de refracción muy distintos: 1.5 y 1.0. Se dice entonces que la celda unitaria contiene materiales con un alto contraste de índices de refracción.

La manera en que la luz se propaga en el interior de los ópalo, y en general, en el interior de los cristales fotónicos, depende del contraste en índice de refracción de los materiales que conforman la celda unitaria y en la forma que estos tienen. En el caso del ópalo, el material: silicato, tiene forma de esfera... pero podríamos pensar que pudieran construirse materiales similares pero con otras

GLOSARIO

Monocromático
Que es de un solo color o frecuencia.

Movimiento armónico simple
Movimiento periódico en el que la aceleración es proporcional a la distancia que separa al objeto de su punto de equilibrio y está dirigida hacia dicho punto.

Movimiento browniano
Movimiento aleatorio de las partículas microscópicas suspendidas en un fluido.

Opalo

Figura. 18. El ópalo esta compuesto por un arreglo periódico de pequeñas esferas de silica.

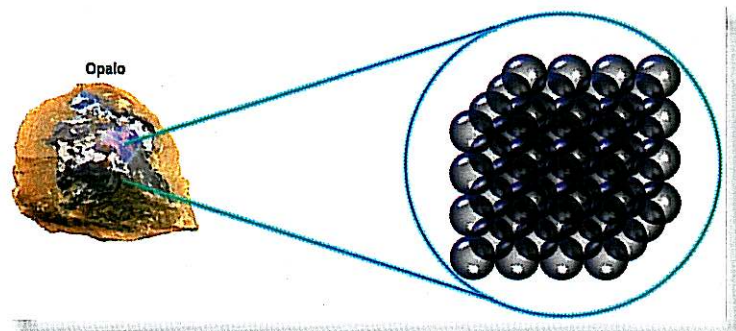
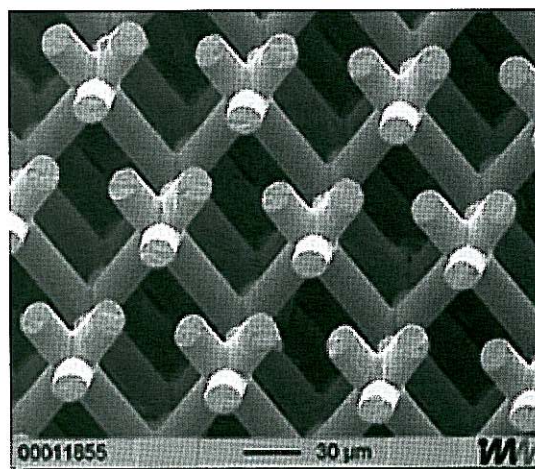


Figura. 19. . Arreglo periódico de un cristal fotónico. Nótese las dimensiones de la celda unitaria, que implican que en este cristal fotónico la difracción será posible sólo para ondas electromagnéticas con longitudes de onda del orden de 30 micras.



formas del silicato u otro tipo de materiales, como pequeños: elipsoides, pirámides, esferas huecas, varillas, etcétera. Pero dependiendo de la forma que tienen los materiales de la celda unitaria, la luz tendrá distintas propiedades de propagación... lo que nos lleva inmediatamente a la pregunta... sí... pero... ¿cómo se propaga la luz dentro de los cristales fotónicos?... ¿porqué ha resultado tan interesante estudiarlos?... ¿porqué han llamado tanto la atención?

Pues bien, la propagación de la luz en el interior de los cristales fotónicos tiene características muy especiales, como por ejemplo, si se envía un haz de luz en una dirección, este haz de luz viajará en su interior no una dirección, no en dos... no en tres... sino que viajará simultáneamente en muchas direcciones, todas ellas bien discernibles unas de otras. Utilizando un término un poco más técnico se dice que la luz: se difracta... y es más, es posible que en cada dirección tenga una velocidad de propagación distinta. Pero eso no es todo, otra característica muy interesante de la propagación de la luz en los cristales fotónicos, es la existencia de una brecha prohibida de frecuencias, es decir, la imposibilidad de que ondas electromagnéticas dentro de un intervalo dado de frecuencias, puedan propagarse... puedan transmitirse... puedan existir en el seno del cristal. En la jerga de los físicos, a la brecha prohibida se le llama: el "gap", palabra proveniente del idioma inglés con el mismo significado. Sin embargo con el fin de propagar adecuadamente los tecnicismos en nuestro idioma, aquí la llamaremos: "brecha". Es posible que para una frecuencia de oscilación dada del campo electromagnético, esta brecha exista sólo en algunas direcciones de propagación y que en otras direcciones no exista brecha.... pero cuando para una misma frecuencia exista brecha en todas las direccio-

nes de propagación posibles, se dice entonces que existe: una brecha absoluta. La existencia de una brecha absoluta en un intervalo dado de frecuencias es importante porque indica, que para frecuencias de oscilación dentro de ese intervalo, no es posible la propagación del campo electromagnético en ninguna dirección. Entonces ¿qué sucede si enviamos un haz de luz con esa frecuencia de oscilación?... pues sucede que... como no puede propagarse en el interior del cristal fotónico, pues... no le queda otra y tiene que... reflejarse... y tiene que reflejarse completamente, pues no es posible transmitir energía al interior... en otras palabras, para estas frecuencias tenemos un espejo perfecto... y para ciertas aplicaciones resulta sumamente útil poder contar con espejos en los cuales las ondas electromagnéticas no pierden energía al reflejarse... son espejos perfectos.

Cabe señalar que para que estas características en la propagación del campo electromagnético se manifiesten, o hablando más técnicamente... para que la difracción se manifieste, es necesario que las dimensiones de la celda unitaria sean comparables a las de la longitud de onda del propio campo electromagnético. En el caso de la luz visible estas dimensiones son de décimas de micra, pero en la región de microondas pueden llegar a ser hasta del orden de milímetros. Por consiguiente, lo que causó entusiasmo en el caso de la región de microondas, fue el hecho de que ahora podría ser posible poder "diseñar" sistemas que pudieran transmitir ondas electromagnéticas con características determinadas en ciertas bandas de frecuencias y tener brechas en otras bandas de frecuencias. Es decir, que al menos en la región de microondas, donde el tamaño de la celda unitaria todavía está todavía al alcance de las técnicas actuales de fabricación de elementos de tamaño sub-milimétrico (ver Fig. 19), podía ya pensarse en una "ingeniería de materiales", es decir comenzar a diseñar materiales, en nuestro caso diseñar cristales fotónicos, con propiedades de transmisión electromagnética, bajo diseño. Esto se realizaría diseñando adecuadamente, con el apoyo de las ecuaciones de Maxwell, el tamaño de la celda unitaria, la forma de los materiales en su interior y el adecuado contraste de sus índices de refracción.

Por otro lado, este fenómeno de difracción, y la misma aparición de las brechas prohibidas en la propagación de la luz en cristales fotónicos, son manifestaciones de la periodicidad del cristal, que no son completamente

nuevas, ya que suceden siempre que el tamaño de la celda unitaria sea comparable a la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, para la luz en el visible se requiere una celda unitaria de décimas de micra, mientras que para los cristales comunes, que tienen una celda unitaria miles de veces más pequeña... de décimas de nanómetro... se requeriría tener ondas electromagnéticas con una longitud de onda de décimas de nanómetro. Pero estas ondas electromagnéticas con longitudes de onda tan pequeñas... existen... sí... existen... y se llaman Rayos X... si los mismos Rayos X con los que se hacen las radiografías para detectar las fracturas de los huesos. Por lo tanto, se esperaba que al hacer incidir Rayos X en un cristal común se manifestara también la difracción y las brechas. Pues bien, esto sucede y fue realizado por primera vez hace muchos años, por William y Lawrence Bragg, padre e hijo, a principios del siglo XX... en 1912... recién iniciada la Revolución Mexicana. Este hecho los llevó a la conclusión de que los Rayos X no consistían de pequeñas partículas muy veloces, como entonces se sospechaba, sino que eran en realidad ondas electromagnéticas con longitudes de ondas muy... muy pequeñas. Esta técnica, conocida actualmente bajo el nombre de: difracción de Rayos X, ha servido para estudiar la simetría, el tamaño y la composición de las celdas unitarias en los cristales comunes, y dio inicio e impulso a una nueva rama de la física, conocida ahora como: cristalografía.

Pero no sólo sucedió con los Rayos X, de acuerdo a la interpretación "ortodoxa" de la mecánica cuántica, los electrones "sufren" de una dualidad onda-corpúsculo, y se les asocia también una longitud de onda, que es de un tamaño parecido al de los Rayos X... por lo que ellos también deberían difractarse en el interior de los cristales, es más, ellos ya están ahí... son parte de los cristales mismos. Sin entrar en detalle sobre la llamada "naturaleza ondulatoria" de los electrones, que nos desviaría de nuestro objetivo principal en este escrito, cabe afirmar que la evidencia que existe sobre la propagación de los electrones en cristales permite interpretar esta propagación en base a ondas difractadas. Por otro lado, la evidencia sobre la existencia de brechas prohibidas es abrumadora y estas brechas constituyen la parte medular de la teoría actual sobre la conductividad eléctrica en sólidos.

Viéndolo bien, las características de la propagación de la luz en cristales fotónicos no fueron realmente una sorpresa. Lo sorpren-

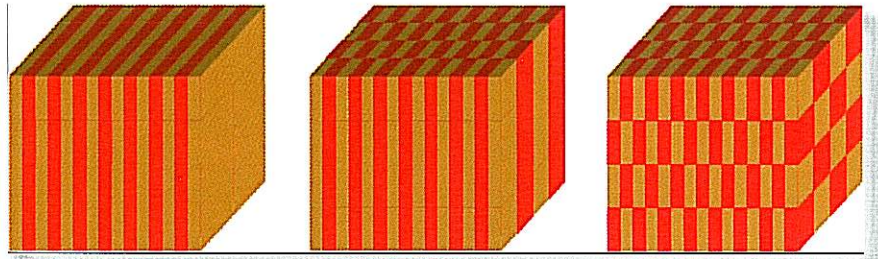
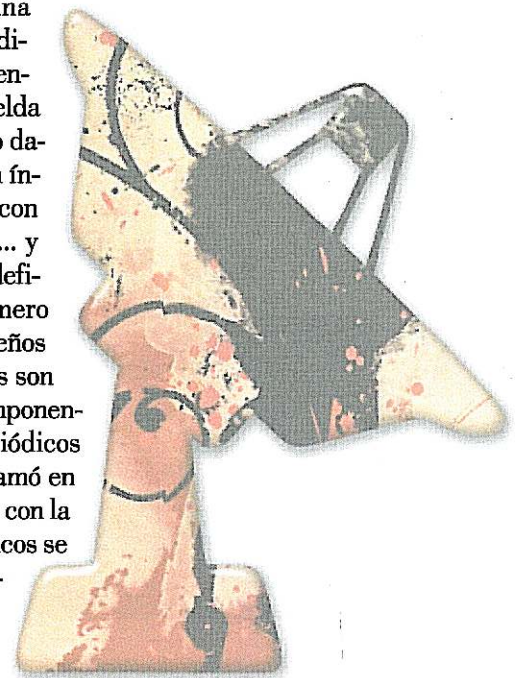


Figura 20. Representación esquemática de la estructura periódica de cristales fotónicos en una dimensión (1D), dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D).

dente... lo interesante... fue darnos cuenta que se podían tener sistemas, en donde estos fenómenos relacionados con propagación de ondas en cristales comunes, podían también existir también en sistemas con tamaños de celda unitaria, miles de veces más grandes, en el caso de la luz... o millones de veces más grandes, si nos vamos a la región de microondas.

Finalmente cabe mencionar que los expertos en cristales fotónicos los clasifican por su dimensionalidad. Así tenemos cristales fotónicos una, dos o tres dimensiones (ver Fig. 20). Se llama cristal fotónico en una dimensión a un apilamiento de placas con distintos índices de refracción y con dimensiones laterales mucho... mucho mayores que la separación entre ellas. Se les llama cristales 1D o cristales unidimensionales porque las variaciones del campo electromagnético varía sólo en la dirección perpendicular a las placas, en las otras dos dimensiones no hay variación apreciable... tal vez sólo en las orillas de las placas... y estas variaciones no afectan apreciablemente su comportamiento en la dirección perpendicular. No hay que confundir aquí la palabra unidimensional, con la geometría unidimensional que correspondería a un hilo o un alambre, aquí la palabra unidimensional se refiere a que las varia-

ciones del campo sólo son en una dirección... la dirección perpendicular a las placas... en una dimensión. Ahora, en este caso la celda unitaria consiste en un número dado de placas, digamos dos, con índices de refracción distintos y con anchuras iguales o diferentes... y esta configuración se repite indefinidamente... bueno... un número muy grande de veces. Los diseños de estos apilamientos de capas son comunes en la industria de componentes ópticas. A los arreglos periódicos de estos apilamientos se les llamó en un inicio "superredes", y luego, con la aparición de los cristales fotónicos se les cambió el nombre... para estar a la moda... y ahora se les



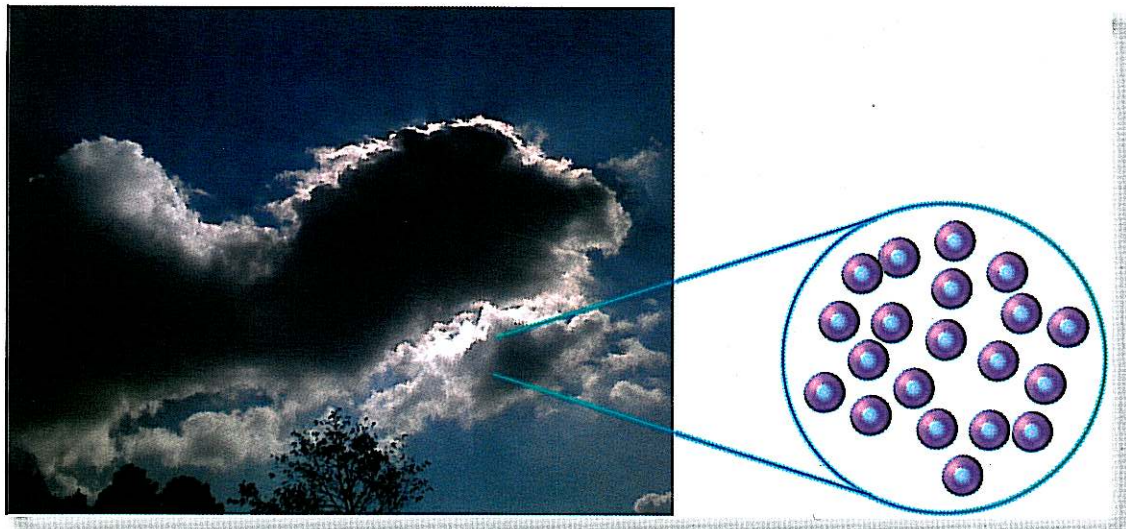


Figura 21. nubes coloides

llama: cristales fotónicos unidimensionales. La idea detrás de estos diseños es la misma que discutimos anteriormente, el poder controlar, entre otras cosas, las frecuencias en donde se quiere que existan o no existan las brechas.

Con este concepto de dimensionalidad, los cristales fotónicos en dos dimensiones son apilamientos periódicos de varillas, o cilindros, o fibras muy... muy largas... que en principio deberían ser infinitamente largas... para que el campo electromagnético no varíe... apreciablemente, a lo largo del eje de los cilindros... y varíe solo en dos dimensiones. El tratar de plantear las diferencias esenciales debidas a la dimensionalidad, se sale ya del objetivo de este escrito... por lo que quiero terminar diciendo que las propiedades de propagación de la luz en cristales fotónicos sigue siendo un tema actual de investigación en física.

Los coloides

Hasta ahora hemos hablado de la propagación de la luz en cristales, ya sea en cristales reales o en cristales fotónicos, y habíamos también comentado que los cálculos del índice de refracción se simplificaban enormemente debido a la condición de periodicidad. Sin embargo uno puede preguntarse que le sucede a la propagación de la luz si la periodicidad desaparece, independientemente si podemos o no des-

Nubes



cribir su comportamiento matemáticamente. Pensemos en un cristal fotónico, como el ópalo, compuesto por un apilamiento periódico de pequeñas esferitas de sílica... e imaginemos ahora que esas esferitas en vez de estar en aire están en agua, y que en vez de estar periódicamente ordenadas se encuentran desordenadas... dispersas... colocadas al azar. Esto es a lo que se llama un coloide, y se define, en general, como un conjunto de "partículas" dispersas en un medio homogéneo. Este medio homogéneo puede ser un líquido, un sólido o un gas y las "partículas", llamadas más propiamente: inclusiones coloidales, pueden estar también en estado líquido, sólido o gaseoso. Con esta definición tan amplia, podemos estar seguros de poder encontrar, en nuestra experiencia cotidiana, una gran cantidad de sistemas a los que podemos llamar: coloides. Algunos ejemplos de coloides son: la leche, la sangre, las pinturas, las nubes, las espumas, etcétera. Así, la leche son micelas y bolitas de grasa saturada dispersas en agua, las pinturas (secas) son partículas pigmentadas dispersas en un polímero sólido, las nubes son gotitas de agua dispersas en aire y las espumas son burbujas de aire dispersas en un líquido... realmente, para donde quiera que miremos, es casi seguro que nos encontremos con un coloide (ver Fig. 21). Ahora bien, la leche se ve blanca y opaca, las pinturas pueden verse blancas o coloreadas y opacas, las nubes se ven también blancas y opacas.

Como vemos, si queremos hablar de las propiedades ópticas de los coloides, una de las cosas que tenemos que entender y poder explicar es... ¿porqué algunos coloides se ven blancos?... ¿qué es el blanco?... porqué viéndolo bien, realmente no hay nada que se pueda decir que es blanco en sí. Tomemos como ejemplo la sal o la azúcar granulada. Ambas



Sal y azúcar

se ven blancas, pero si tomamos una lupa y vemos los granitos separados de sal o de azúcar, veremos que estos no son blancos... son cristallitos transparentes... sin color. Y esto que vemos en la sal o el azúcar sucede en cualquier pigmento blanco... todos los pigmentos blancos están compuestos por fibras o partículas transparentes inmersos en aire o en alguna matriz también transparente o casi... transparente. Esta sería un ejemplo de las cosas que tendríamos que entender.

Coloides con inclusiones chicas

Pero empezemos por el principio. Para el estudio de sus propiedades ópticas, los expertos dividen a los coloides en dos grandes grupos: coloides con inclusiones chicas y coloides con inclusiones grandes, donde lo chico y lo grande es en comparación, obviamente, con la longitud de onda de la luz. Y así tenemos, que los coloides con inclusiones chicas, es decir inclusiones con tamaños mucho...mucho menores que la longitud de onda de la luz... son muy parecidos a los líquidos, como el agua, en donde las moléculas no han perdido su identidad. Como en los coloides las inclusiones tampoco pierden su identidad, la luz se propaga de forma muy parecida a como se propaga en un líquido. Es decir, cada inclusión esparce la luz en forma análoga a como lo hacen las moléculas de agua en presencia de un campo electromagnético, esto es, reemitiendo ondas electromagnéticas en todas direcciones y dando por resultado un campo electromagnético con estructura complicada tanto en el espacio como en relación a las distintas direcciones de propagación. Sin embargo, utilizando los métodos estadísticos descritos anteriormente en el establecimiento de la Electrodinámica Continua, el campo electromagnético en el interior del

colloide se puede concebir como la suma de dos campos: un campo "promedio" que viaja en una dirección, más el resto, al que hemos llamado el campo fluctuante, viajando en todas direcciones (ver Fig. 11). Resulta, que si las inclusiones son chicas, la energía transportada por el campo fluctuante es mucho... mucho menor que la transportada por el campo promedio, por lo que a un buen grado de aproximación, el campo fluctuante se puede ignorar. Es decir, se considera únicamente la presencia del campo promedio, al igual que en lo que llamamos la Electrodinámica Continua o Electrodinámica Macroscópica. En este caso, como en la Electrodinámica Continua., la propaga-

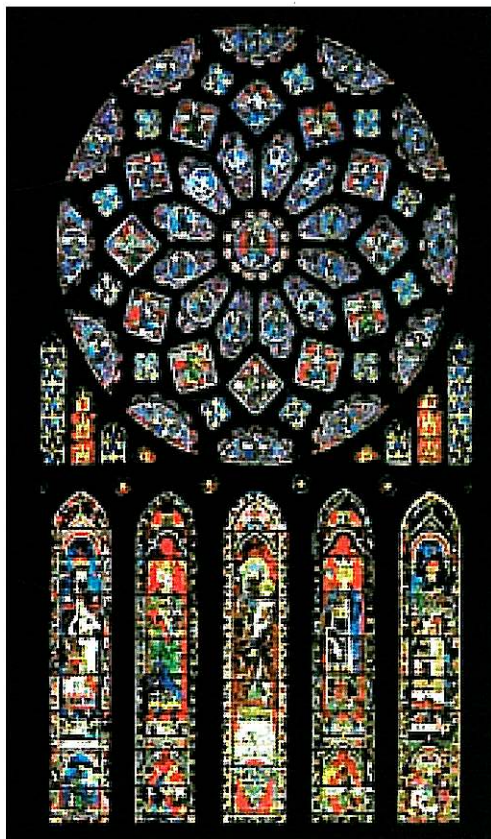


Figura 22. Vitrales medievales en que algunos de los colores se lograban con coloides constituidos por vidrio que al fundirse se mezclaba polvo fino de oro.



Figura 23. Coloide turbio.
El brillo proviene de la reflexión especular del campo electromagnético promedio.

ción de las ondas electromagnéticas se puede describir en términos de un índice de refracción, que se llama: índice de refracción “efectivo”. Todo este proceso entra dentro de lo que se llaman: Las Teorías del Medio Efectivo, que tienen precisamente como objetivo el determinar, en términos de las características mesoscópicas del sistema, entre otras cosas: el índice de refracción “efectivo”. En otras palabras, se está reemplazando, conceptualmente... claro, al sistema coloidal... altamente inhomogéneo... por un sistema ficticio, homogéneo y caracterizado por un índice de refracción “efectivo”. El problema ahora es: ¿cómo podemos determinar el valor de ese índice de refracción “efectivo”, en términos del tamaño de las inclusiones, de su forma, de los índices de refracción tanto de la matriz como de las inclusiones... etcétera? Este problema es un problema muy bien definido y es el problema que dio lugar al desarrollo de toda una nueva línea de investigación, cuyo objetivo es precisamente el de determinar todas las propiedades “efectivas” de este medio ficticio... de este medio efectivo. El gran atractivo que presenta este enfoque al problema de la propagación de luz en coloides con inclusiones chicas, es que habiendo determinado el índice de refracción “efectivo”, entonces éste se puede usar todo el poder de la Electrodinám-

ica Continua y tratar al coloide como si fuera un material cualesquiera con un índice de refracción común y corriente.

Los inicios de las teorías del medio efectivo pueden encontrarse ya en “El Tratado sobre Electricidad y Magnetismo” del propio JC Maxwell cuando se plantea el problema de determinar el índice de refracción “efectivo” de un sistema constituido por pequeñas esferas metálicas. Sin embargo, el gran impulso a este enfoque del medio “efectivo” fue dado por JC Maxwell Garnett, cuando trabajaba en la industria del vidrio en la Inglaterra de principios del siglo XX. Resulta, que era un hecho bien conocido, que en los vitrales de las catedrales medievales se lograba obtener un color púrpura muy poco común, cuando se dispersaban pequeñísimas partículas del oro en el vidrio al tiempo de fundirlo. La presencia de estas partículas en el vidrio...en este coloide... tenía como consecuencia que el vidrio adquiriera ese extraño color púrpura (ver Fig.22). Es más, se podían matizar distintos tonos variando la cantidad de polvo de oro en el vidrio. Este problema de... ¿porqué esto sucedía? fue resuelto por JC Maxwell Garnett quien fue capaz de deducir una “formula de mezclado”. Es decir, una fórmula en donde dado el volumen ocupado por las partículas metálicas, el índice de refracción del vidrio y el índice de refracción del metal del cual estaban hechas las partículas, esta fórmula daba la frecuencia de oscilación a la cual el campo electromagnético era preferentemente absorbido. Y es esta absorción preferencial la que precisamente determina el color del coloide. Imaginemos por ejemplo, que la luz solar, que es un campo electromagnético oscilando con todas las frecuencias correspondientes a todos los “colores de arco iris”, pasa a través de un coloide, que tiene una absorción preferencial en frecuencias de oscilación correspondientes a los colores del arco iris que van del rojo al amarillo. Entonces las únicas frecuencias de oscilación del campo electromagnético que no son absorbidas por el coloide... o sea... que sí lo pueden atravesar... son las correspondientes a los colores azul e índigo... por lo que el color de la luz que lo atraviesa será una mezcla de azul e índigo. Bueno, pues con la fórmula de JC Maxwell Garnett no sólo se puede predecir el color que tendrá la luz que atraviesa un sistema coloidal determinado, sino que se puede resolver también, lo que se llama el “problema inverso”. Es decir, si yo quiero obtener una luz de determinado color, la fórmula de JC Maxwell Garnett me puede ayudar di-



señalar un sistema coloidal que cumpla con mi propósito... me puede guiar para escoger los materiales con los que fabricar el coloide, el tamaño y la cantidad de las inclusiones... en fin... esta fórmula abre muchas posibilidades para el entendimiento... entre otras cosas... del origen del color en coloides con matrices de vidrio o cerámica.

Antes de terminar este tema, quisiera decir quien fue JC Maxwell Garnett, ya que teniendo un nombre tan parecido al del gran JC Maxwell, cuando se hacía referencia a su fórmula en muchos artículos de la literatura especializada, su nombre aparecía con un guión: JC Maxwell-Garnett, implicando que esa fórmula era debida a dos personas: al gran JC Maxwell y a otra persona con apellido Garnett. Pero no es así, lo que sabemos es que el gran JC tenía un asistente de laboratorio: el señor Garnett. Ahora el señor Garnett tenía una admiración muy grande por el gran JC, y su admiración era tal, que cuando el señor Garnett tuvo un hijo, le puso por nombre: JC Maxwell, que ya junto con su apellido, quedaba: JC Maxwell Garnett, Y fue este personaje el que dedujo la ya famosa "fórmula de mezclado" que lleva su nombre, cuando trabajaba para la industria del vidrio en Inglaterra, en la época en que en México se gestaba el movimiento revolucionario de 1910.

Finalmente quiero agregar, que en el Instituto de Física de la UNAM, nuestro grupo de investigación ha hecho aportaciones interesantes a las teorías del medio efectivo. Por ejemplo, hemos calculando el índice de refracción "efectivo", con un alto grado de

aproximación, para un sistema coloidal constituido por un conjunto de esferas idénticas con índice de refracción arbitrario.

Coloides turbios

La otra clase de coloides son aquellos con inclusiones "grandes", a los que se llama también coloides turbios. El estudio de la propagación de la luz en estos sistemas sigue la misma metodología que en el caso de coloides con inclusiones chicas. Es decir, el campo electromagnético en el interior de estos sistemas se concibe como la suma de un campo promedio, que viaja en una sola dirección, más un campo fluctuante, también llamado campo difuso, que viaja en todas direcciones. Pero cuando las inclusiones son grandes, éstas esparcen la luz con tal intensidad, que la energía transportada por el campo difuso ya no es pequeña en comparación a la transportada por el campo promedio y... por lo tanto... ya no nos es posible ignorar su presencia, como lo fue en el caso de los coloides con inclusiones chicas. Es más... el campo difuso es ahora el que juega un papel preponderante, ya que en su paso a través del coloide, el campo electromagnético promedio va disminuyendo en intensidad, y esta pérdida de energía es transferida al campo difuso.... haciendo posible que después de una cierta distancia, el campo promedio se haya extinguido totalmente, y lo único que prevalezca es el campo difuso. Y es la presencia dominante de este campo difuso, que viaja en todas direcciones, lo que le da al coloide una apariencia de turbidez (ver Fig. 23). Por otro lado, si el coloide es iluminado por luz solar, o sea, por un campo electromagnético oscilando a todas las diferentes frecuencias correspondientes a los colores del arco iris, y este coloide contiene inclusiones grandes que no absorben preferentemente en ninguna región de frecuencias, es decir, son transparentes e incoloras... como los granitos de sal... entonces este campo difuso preserva la misma proporción de frecuencias que el arco iris y al llegar a nuestro ojo, nuestro cerebro lo percibe como: color blanco. Si por el contrario, las inclusiones absorben o esparcen luz preferentemente en alguna región de frecuencias del espectro visible, entonces el coloide se verá turbio también, pero coloreado.

Por cierto, para que la turbidez aparezca, las inclusiones coloidales no tienen que ser tan grandes, pues resulta que para inclusiones en agua con un índice de refracción igual al del vidrio, es suficiente con que éstas tengan el tamaño de unas décimas de micra, que es menor que la longitud de onda de la luz.

GLOSARIO

Muón

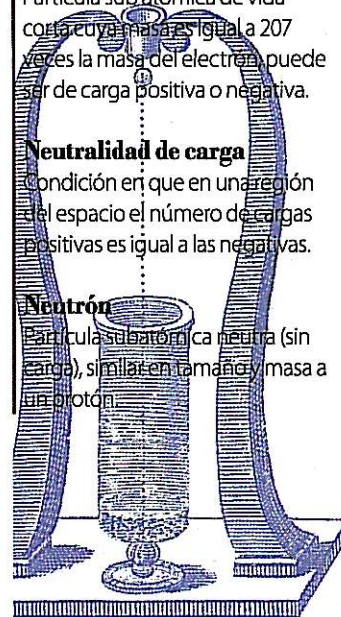
Partícula subatómica de vida corta cuya masa es igual a 207 veces la masa del electrón, puede ser de carga positiva o negativa.

Neutralidad de carga

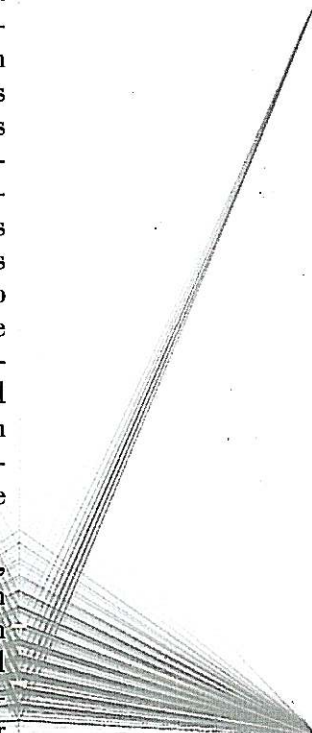
Condición en que en una región del espacio el número de cargas positivas es igual a las negativas.

Neutrón

Partícula subatómica neutra (sin carga), similar en tamaño y masa a un protón.



Polvo cósmico



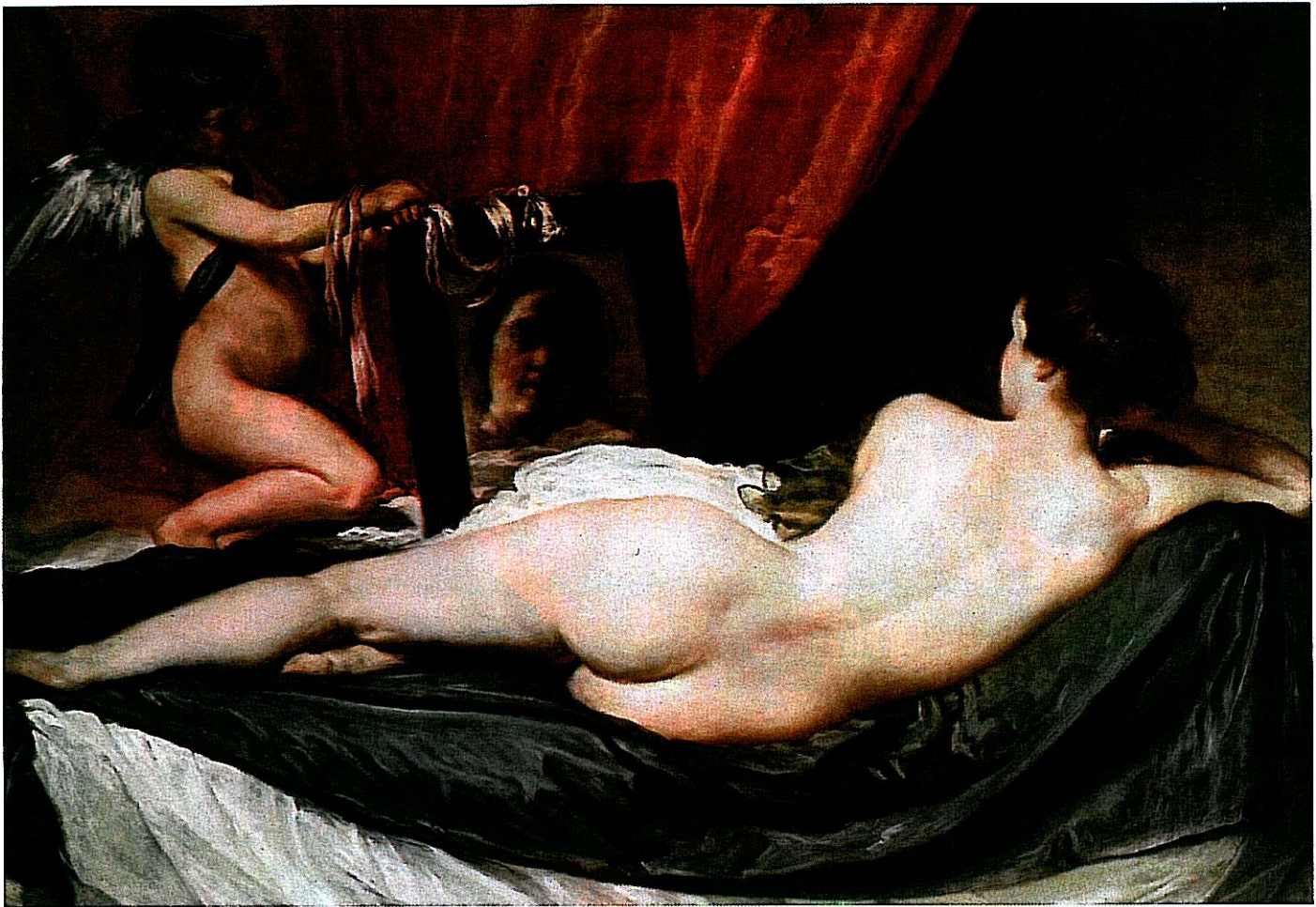


Figura 24.

El estudio del campo difuso a través de coloides turbios, se inicia a principios del siglo XX en el campo de la astronomía, cuando Chandrasekhar, un físico de origen hindú, se interesa en calcular el campo dispersado por el “polvo cósmico”, para corregir las observaciones relacionadas con la cantidad de luz que realmente nos llega de las estrellas. El “polvo cósmico” no es otra cosa que un coloide constituido por pequeñas partículas “cósmicas” dispersas en el vacío “cósmico”. Con este objetivo Chandrasekhar desarrolla su teoría, conocida ahora como: teoría de la transferencia radiativa, consistente en un conjunto de ecuaciones que sirven para determinar, tanto la intensidad como las diferentes direcciones de propagación del campo difuso, todo en términos sólo de los tamaños y formas de las inclusiones, de sus índices de refracción y del índice de refracción de la matriz en que están inmersos. Esta teoría está basada en la conservación del flujo de energía y ha sido de gran utilidad, no sólo en el campo de la astronomía, sino también ha aplicada una gran variedad de situaciones en la industria de pinturas, de tintas, de pigmentos, etcétera... y actualmente en el campo de la biofísica y física médica para el estudio de coloides biológicos.

A nivel experimental es muy impresionante ver el campo difuso, cuando se hace incidir luz láser a través de un coloide y se proyecta la luz transmitida sobre una pantalla. El campo promedio se ve como un punto brillante en la misma dirección que la dirección del haz del láser incidente, mientras que el campo difuso se ve como una gran cantidad de pequeños puntitos luminosos muy pequeños, alrededor del punto brillante, y distribuidos aparentemente en forma azarosa. A este conjunto de puntitos luminosos se le llama técnicamente: moteado. Una de las aplicaciones más directas de los estudios sobre la propagación del campo difuso, es la llamada “espectroscopía de ondas difusas” y que es conocida en la literatura especializada, por sus siglas en inglés, como: DWS (Diffuse Wave Spectroscopy). La idea detrás de esta técnica es la de medir la luz difusa transmitida por un coloide, con luz incidente a diferentes longitudes de onda, y con esa información tratar de determinar las características geométricas y ópticas del coloide, es decir, el tamaño y forma de las inclusiones, así como sus índices de refracción. Como guía para lograr determinar estas características es necesaria una teoría,

como la de transferencia radiativa, que conecte las propiedades de propagación de la luz con las características del coloide. Aunque esta teoría no es la única que existe "en el mercado". Como puede verse, esta técnica puede llegar a ser muy poderosa porque permitiría, "desde fuera" poder, no sólo caracterizar a una gran variedad de coloides, sino que también poder detectar, en tiempo real, cambios en su constitución, como por ejemplo, la agregación de las inclusiones coloidales, que es lo que sucede cuando decimos que el coloide: leche, se "corta".

El estudio de estos sistemas coloidales ha dado lugar también al planteamiento de problemas más "básicos" y, en cierto sentido, más sutiles. Uno de ellos es el de la "localización" de la luz. Este problema nace cuando se cree, que en determinadas circunstancias, en el interior de sistemas coloidales sería posible localizar la luz... tener la luz "parada"... tener la luz "en reposo". Pero ¿qué quiero decir con esto?... debe quedarnos claro que la luz reemitida por las inclusiones coloidales siempre viajará a la velocidad de la luz... pero se cree... que lo que sí sería posible... es que la suma de todos los campos electromagnéticos reemitidos por las inclusiones... al sumarse... pudieran dar lugar a un campo electromagnético total, que ya no tuviera la propiedad de viajar... que se quedara "en reposo"... luz "quieta".

Pero ¿de dónde sale esto?... ¿de donde sale que esa posibilidad pudiera existir en los sistemas coloidales? Pues esto sale de la evidencia encontrada en la "localización de electrones" en sólidos no-cristalinos... sólidos sin periodicidad... sólidos desordenados. Ahí se encontró evidencia, que debido al carácter ondulatorio de los electrones, éstos podían "localizarse" en el seno de estos materiales desordenados. Y se pensó, que dada la naturaleza ondulatoria del campo electromagnético, se podrían encontrar condiciones adecuadas para la "localización" de la luz en el seno de sistemas desordenados, o sea, en sistemas como los coloides. Sin embargo, aunque se ha buscado con pasión, hasta ahora no se ha encontrado evidencia sobre esta "localización" de la luz. A lo más, lo que se encontró es que la luz retro-dispersada por un coloide tiene una amplitud anómala... no contempladas por las teorías aceptadas... y que esto es el signo de una "localización débil". Sin entrar en el detalle sobre lo que se entiende por "localización débil", el hecho contundente es que hasta hora no hay evidencias sobre la "localización" de la luz.

Antes de terminar con este tema quisiera apuntar que el índice de refracción "efectivo" para un coloide turbio, como la leche, no está claramente definido, debido a la presencia del campo difuso. Sin embargo nuestro grupo de investigación, en el Instituto de Física de la UNAM, ha encontrado, finalmente, la forma de definir y calcular de manera precisa, el índice de refracción "efectivo" correspondiente a la propagación, únicamente, del campo electromagnético promedio en coloides turbios. Este índice de refracción "efectivo" tiene una estructura más compleja y más interesante que la encontrada para coloides con inclusiones chicas. Actualmente queremos utilizar este índice de refracción "efectivo" para calcular otras propiedades ópticas en este tipo de sistemas.

Los espejos

Otro tipo de materiales realmente fascinantes son los espejos. Los espejos tienen la propiedad de cambiar la dirección de la luz y con esta sola propiedad producir imágenes tan reales que nos provocan la "ilusión" de percibir un mundo que en realidad no existe... que no está ahí... mas sin embargo es un mundo muy parecido al nuestro... es ... el mundo "reflejado". Por ejemplo, si me coloco a una cierta distancia frente a un espejo, veo una imagen

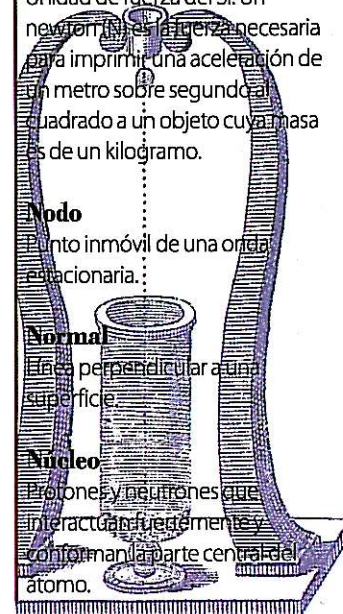
GLOSARIO

Newton
Unidad de fuerza del SI. Un newton (N) es la fuerza necesaria para imprimir una aceleración de un metro sobre segundo al cuadrado a un objeto cuya masa es de un kilogramo.

Nodo
Punto inmóvil de una onda estacionaria.

Normal
Línea perpendicular a una superficie.

Núcleo
Protones y neutrones que interactúan fuertemente y conforman la parte central del átomo.



Espejo



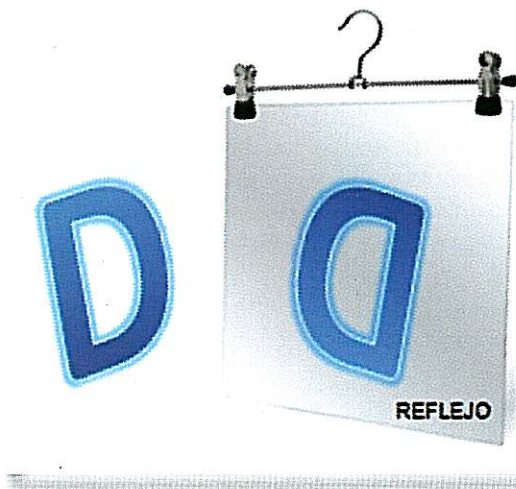


Figura 25 imagen de mi rostro y mi propio rostro hay una gran diferencia, que muchas veces pasamos por alto. En la imagen, la derecha y la izquierda están intercambiadas... mi ojo izquierdo aparece como ojo derecho, y mi ojo derecho aparece como ojo izquierdo... sin embargo, la simetría del rostro hace que eso no se note... que ese cambio de quiralidad, como se llama técnicamente, no sea evidente (ver Fig. 24).

Por otro lado, si pongo frente aun espejo la letra A o el número 8 no voy a notar cambio en la imagen reflejada, pero si pongo otras letras o números que no tengan la simetría de la letra A o del número 8, como por ejemplo la letra D o el número 5, entonces sí voy a percibir inmediatamente en la imagen ese cambio de quiralidad. La imagen de la letra D y el número 5 se verán diferentes... se verán "reflejados" (ver Fig. 25). Es por eso que la ambulancias tienen pintado en el frente del cofre la palabra: ambulancia, pero escrita con las letras "reflejadas", para que cuando el automovilista las vea a través de su espejo retrovisor, las pueda leer correctamente. También se cuenta que el gran Leonardo da Vinci tenía la habilidad de poder escribir con letras "reflejadas", de tal manera que sus textos así escritos parecían estar escritos con símbolos extraños... no reconocibles, mas sin embargo si ese texto se ponía frente a un espejo, el texto era entonces fácilmente reconocible y podía ser leído sin dificultad.

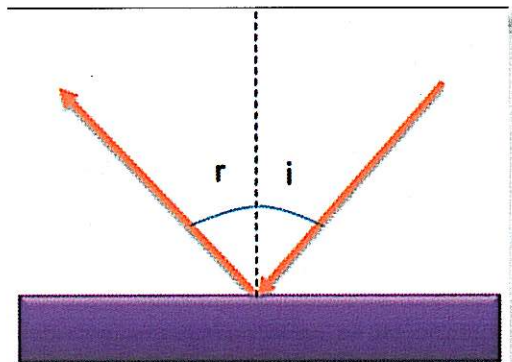
Pero ¿qué es un espejo?... bueno... pues un espejo tiene primeramente una superficie plana, muy lisa y esta hecho de un material que no deja pasar la luz sino que hace que la luz se regrese. Ahora, los materiales opacos tampoco dejan pasar la luz y no son espejos. Lo que sucede en los materiales opacos, es que estos materiales absorben la luz y al absorberla y convertirla en calor, ya no la pueden regresar.

Figura 26

que me da la ilusión de estar viendo a alguien muy parecido a mí que se encuentra detrás del espejo... sin embargo detrás del espejo no hay nadie... es una imagen... es una "ilusión". Es más, he visto tantas veces mi rostro frente a un espejo, que puedo llegar a identificar ese rostro con el mío propio y pensar que yo soy así... que yo soy como esa imagen que veo frente a ese espejo. Pero entre esa

Entonces para construir un espejo se necesita un material que no absorba la luz. Pero los materiales que no absorben la luz, en vez de regresarla la dejan pasar, son los materiales que llamamos transparentes. Por lo tanto, lo que se necesita es un material que no absorba la luz, pero que al mismo tiempo la luz no pueda propagarse en su interior, en este caso a la luz no le queda otra que...regresarse. Estos materiales existen y los ejemplos más representativos son los metales nobles, y entre ellos: el aluminio y la plata. Muchos de los mejores espejos utilizados en los grandes telescopios se construyen evaporando aluminio sobre un sustrato de vidrio. El oro y el cobre también se pueden utilizar, sin embargo, en estos metales existe absorción preferencial en una cierta banda de frecuencias del espectro visible, y esto es lo que les da su color característico... el oro amarillo y el cobre rojizo. En cambio esto no sucede en la plata y el aluminio... que no absorben preferentemente en ninguna de las frecuencias con las que oscila la luz visible, por lo que no tienen color.

Pero ¿qué se requiere para que en una cierta banda de frecuencias la luz no pueda propagarse en un material donde no existen procesos de absorción? Desde un punto de vista técnico, y con base naturalmente en las ecuaciones de Maxwell, lo que se requiere es que el material tenga la propiedad de que para esas frecuencias la polarización esté fuera de fase con el campo eléctrico que la provoca. Es decir, que durante la oscilación del campo, cuando el campo eléctrico vaya en una dirección, la polarización vaya siempre en la dirección opuesta, y que la polarización sea lo suficientemente grande para hacer que la permitividad eléctrica ϵ del material sea negativa. Si nos ponemos todavía más técnicos, y vamos a la única ecuación que aparece en este escrito... la ecuación más importante de la física: $n = \sqrt{\epsilon \mu}$, vemos que si ϵ es negativa, el índice de refracción estaría dado por la raíz cuadrada de un número negativo, ya que, co-

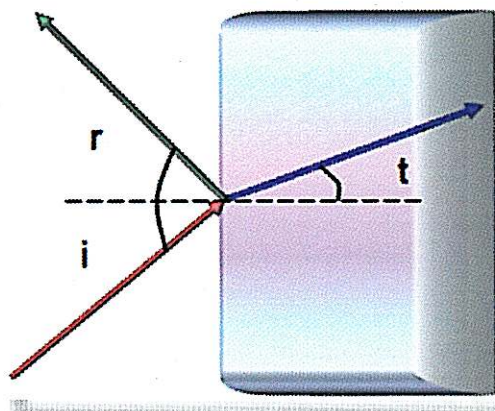


mo habíamos comentado antes, para frecuencias en el visible la μ es siempre positiva y muy cercana a μ_0 , Entonces, el índice de refracción para estas frecuencias estaría dado por la raíz cuadrada de un número negativo, y como no hay ningún número real cuyo cuadrado sea negativo, esto se interpreta diciendo, que para estas frecuencias de oscilación, la propagación de la onda en el material es imposible... y como la luz no puede entrar... y tampoco se absorbe... la luz... se regresa.

Ahora, ¿cómo se regresa la luz?, si el espejo es plano, la ley de reflexión es muy simple y fue descubierta por los griegos mucho antes de nuestra era. Si la luz viaja en una cierta dirección y esta dirección forma un ángulo con la perpendicular al espejo, llamado ángulo de incidencia, la luz se regresa... se refleja... viajando hacia atrás con el mismo ángulo con el que entró. La ley de reflexión se enuncia diciendo que: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (ver Fig. 26).

Refreacción y Reflexión

En los materiales que no son espejos la luz sí puede propagarse en su interior, por lo tanto, cuando la luz encuentra una interfaz plana que separa dos materiales con índices de refracción diferentes, lo que sucede es que parte de la energía de la onda electromagnética se transmite y otra parte se refleja. A la luz transmitida se le llama luz refractada. En general, si la luz incide con un cierto ángulo con respecto a la perpendicular a la interfaz, se va a reflejar con el mismo ángulo, siguiendo la ley de reflexión mencionada anteriormente, pero se va a transmitir... a refractar... con un ángulo distinto al de incidencia (ver Fig. 27). La ley que relaciona a los ángulos de incidencia y de refracción depende del contraste entre los índices de refracción de los materiales a los distintos lados de la interfaz, a mayor contraste mayor es el ángulo de refracción. Esta ley... la ley de refracción,



se puede deducir matemáticamente de las ecuaciones de Maxwell, sin embargo fue descubierta en el siglo XVII empíricamente, es decir, por observación directa... midiendo directamente los ángulos y viendo como se podían relacionar entre ellos dependiendo del contraste de los índices de refracción de los distintos materiales. A esta ley se le conoce como la ley de Snell-Descartes, en honor a los personajes que la descubrieron. El hecho de que el ángulo de incidencia difiera del ángulo de refracción es lo que nos hace ver "doblado" a un palo recto cuando sumergimos parte de él en un estanque con agua quieta y transparente.

Si en la interfaz el índice de refracción no cambia, es decir, el material de un lado de la interfaz tiene el mismo índice de refracción que el material del otro lado de la interfaz, entonces no existirá ni reflexión, ni refracción... simplemente no pasará nada, la luz seguirá su viaje sin ninguna alteración. Recordando que el índice de refracción del aire es prácticamente uno, se entiende ahora la expresión que se usa entre los físicos, cuando un físico no saluda a otro... ignorando su presencia... el ignorado dice: "Pasó y me vio como si tuviera índice de refracción uno..."

Hasta ahora solo hemos hablado del cambio de dirección en la propagación de la luz al cruzar una interfaz, pero también podíamos preguntarnos sobre la amplitud de los campos reflejado y transmitido. Este problema fue planteado y resuelto a principios del siglo XIX por un brillante físico francés: Augustin Fresnel, quien dedujo unas fórmulas para calcular la amplitud de los campos reflejado y transmitido en términos de las amplitudes del campo incidente, el ángulo de incidencia y los índices de refracción de los materiales que forman la interfaz. A estas fórmulas se les conoce ahora como las fórmulas de Fresnel y son la base para el desarrollo de lo que ahora conocemos como: espectroscopía óptica de reflexión. La idea detrás de esta técnica, es que en base a la medición de la intensidad de la luz reflejada por una interfaz plana entre el aire y un cierto material, utilizando luz de distintas frecuencias de oscilación, podamos determinar con precisión el índice de refracción de dicho material como función de la frecuencia, lo que se llama: la dependencia espectral del índice de refracción. Mucho de lo que se conoce acerca de la dependencia espectral de muchos materiales se ha realizado utilizando esta técnica o variantes de ella.

Si la interfaz no es estrictamente plana, o si existe una región superficial cuyas características difieren de las del interior del mate-



Augustin Fresnel

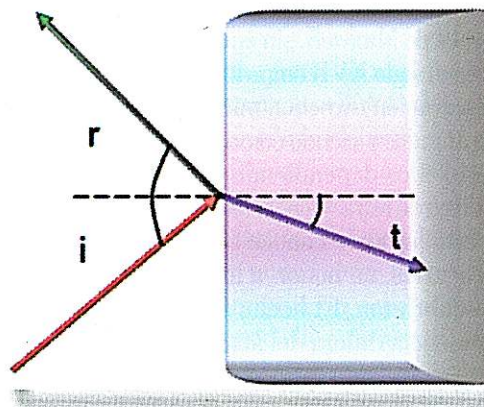


Figura 28. Refracción negativa

rial, o si se adsorben moléculas sobre la superficie de algún material, las fórmulas de Fresnel tendrían que ser revisadas y adecuadas a cada situación específica. En nuestro grupo de investigación en el Instituto de Física de la UNAM, en colaboración con un grupo experimental de la Universidad de París VI, hemos utilizado diversas variantes de la espectroscopía óptica de reflexión para hacer contribuciones interesantes sobre las características de la región superficial en materiales semiconductores, sobre las propiedades de moléculas adsorbidas sobre la superficie de distintos materiales y sobre la forma en que se polarizan partículas metálicas pequeñas cuando se encuentran muy cerca de la superficie de otro material.

Materiales zurdos y Metamateriales

En 1968 Víctor Veselago, físico ruso, escribió un artículo en donde se preguntaba que sucedería si se tuviera un material que en una cierta región de frecuencias fuera transparente, es decir, que no hubiera absorción, pero que en la misma región de frecuencias, ambas, la permitividad eléctrica ϵ y la susceptibilidad magnética μ fueran negativas. Recordando lo que llamamos, la ecuación más importante de la física, y la única que aparece en este escrito:

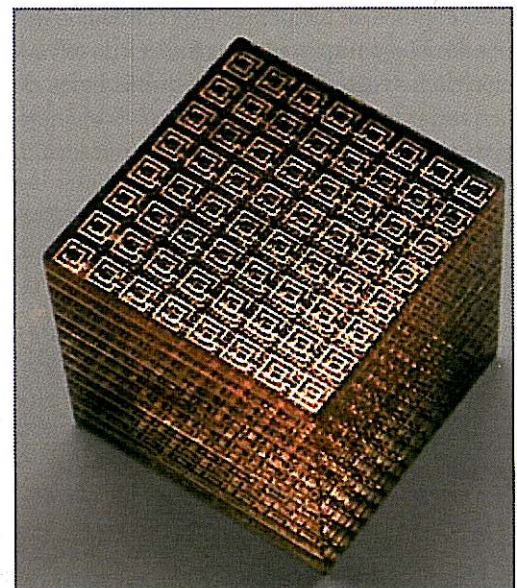
$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

habíamos visto ya, que si ϵ era negativa y μ positiva y por tanto el producto $\epsilon \mu$ era negativo, entonces el índice de refracción n estaba dado como la raíz cuadrada de un número negativo, y como no existe ningún número real cuyo cuadrado sea negativo, entonces concluíamos que la propagación de ondas electromagnéticas en este material era imposible, y que el material se comportaba como un espejo. Pero ahora, lo que Veselago se preguntaba es ¿qué sucedería si ambas, ϵ y μ son negativas? En este caso el producto sería positivo y, al

parecer, el índice de refracción sí existiría, ya que de acuerdo a la ecuación más importante de la física, éste estaría dado por la raíz cuadrada de un número positivo. Víctor Veselago concluye, en su artículo, que la propagación de la luz en este material imaginado, sí sería posible, pero concluye también, que si una onda electromagnética incidiera a este medio de, digamos, el vacío, se refractaría con un ángulo de refracción negativo, es decir, se refractaría en la dirección opuesta a la que tendría cuando ϵ y μ son positivos (ver Figs. 27 y 28). Utilizando la ley de refracción, que relaciona el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción... y a la que llamamos: la ley de Snell-Descartes, se puede obtener un ángulo de refracción negativo, siempre y cuando el índice de refracción se tomara también como negativo. Por consiguiente, Veselago llamó a estos materiales: materiales negativos, materiales izquierdos o materiales zurdos.

La esencia de la demostración de Veselago para obtener refracción negativa, se basa en un hecho extremadamente curioso, de que en materiales con ϵ y μ ambos negativos, la dirección de propagación de la onda electromagnética y la dirección de propagación de la energía, apuntan en direcciones opuestas... sí... en direcciones opuestas... pero ¿cómo es esto posible?... ¿cómo puede ir la onda para un lado y la energía para el otro?... pues sí... sí es posible... en el mundo de las ondas suceden cosas muy extrañas... muy extrañas... y ésta es una de ellas. Pero regresando a nuestra historia cabe decir que el artículo de Veselago se tomó como una simple curiosidad, ya que en la naturaleza no existen ese tipo de materiales.

Figura 29. Metamaterial diseñado por J. Pendry, constituido por anillos abiertos y filamentos de cobre de tamaño sub-milimétrico.



Sin embargo, más de treinta años después, en 1999, John Pendry, distinguido físico del Imperial College, en el Reino Unido, propuso la construcción de un material periódico compuesto por una celda unitaria que contenía pequeños alambres y anillitos abiertos de cobre de tamaño sub-milimétrico, acomodados periódicamente en una resina inerte, diseñados de tal modo, que para frecuencias de oscilación en la región de microondas, tuvieran una ϵ y μ "efectivas" ambas negativas (ver Fig. 29). A este tipo de materiales Pendry los llamó: metamateriales, por ser materiales artificiales contruidos a partir de otros materiales. Aquí la palabra "efectivo" tiene exactamente el mismo sentido que le dimos en la sección dedicada a los coloides, ya que el metamaterial puede ser considerado como un coloide ordenado, en donde las inclusiones son los elementos de la celda unitaria en una matriz de aire.

Pero lo realmente interesante fue que estos metamateriales fueron contruidos en el taller y se mostró con experimentos de transmisión, que estos experimentos podían explicarse sólo si el metamaterial poseía las propiedades "efectivas" requeridas por Veselago. Esto abrió un nuevo campo de investigación y una pléyade de investigadores se entusiasmaron a estudiar este nuevo tipo de fenómenos electromagnéticos. Se discutió, por ejemplo, la posibilidad de construir una lente "perfecta" consistente en una lámina plana, gruesa, de un metamaterial con índice de refracción igual a menos uno... sí... menos uno.

Por otro lado, las voces críticas no tardaron en aparecer y mostraron que los resultados experimentales no eran tan claros y contundentes como se había creído y que éstos podían interpretarse de manera diferente. Hubo también quien planteara que bajo condiciones realistas la refracción negativa, simplemente, no era posible. Sin embargo, se siguieron realizando esfuerzos por extender los experimentos a la región de la luz visible y se reportaron mediciones "directas" del ángulo de refracción negativa. En fin, este campo de la refracción negativa y los metamateriales está en plena efervescencia, estamos en el 2009, y en nuestro grupo de investigación del Instituto de Física de la UNAM hemos comenzado a trabajar sobre este tema, con el fin de entender las aparentes incompatibilidades que se han presentado entre la teoría y los experimentos, y sobre la correcta interpretación de los mismos experimentos.

La invisibilidad

El tema de la invisibilidad es un tema más cercano a la ciencia ficción que a una ciencia como la física. Ha sido un tema recurrente en novelas y películas, en donde aparece, ya un hombre invisible o una capa como la de Harry Potter, que al cubrirlo lo hace invisible a los demás. Sin embargo este tema de la invisibilidad se ha vuelto un tema serio y un tema muy activo de investigación en el área de las propiedades ópticas de materiales. Primeramente tendríamos que definir lo que entendemos por invisibilidad... pero tal vez... sería mejor empezar planteando lo opuesto, que es lo que hace que los objetos sean visibles... que es lo que hace que podamos verlos. Pues bien, empecemos con los objetos opacos. Cuando iluminamos un objeto opaco, parte de la luz se absorbe y otra parte se refleja... es esta luz reflejada por el objeto, la que hace que lo podamos ver... es luz que proviene de su superficie y nos hace ver sus contornos. Además, si hay una absorción preferencial de ciertas frecuencias y la luz que se refleja no tiene la misma proporción de frecuencias que la luz con la que lo iluminamos... entonces vemos el objeto coloreado...en unas partes de su superficie refleja sólo luz verde...la luz con otras frecuencias es absorbida, en otras partes refleja sólo luz roja... y así... por lo que esa luz reflejada es la que nos hace ver el objeto, ver su forma, sus contornos, la textura de su superficie y su color. Además, no nos deja ver lo que esta "atrás" del objeto, por que la luz que viene de "atrás" es absorbida por el objeto. Decimos entonces que el objeto nos "tapa" lo que está atrás. Por lo tanto para que un objeto nos parezca "invisible"

GLOSARIO

Número atómico

Número de protones que contiene el núcleo de un átomo.

Ocular

Lente de un telescopio que está más cercana al ojo.

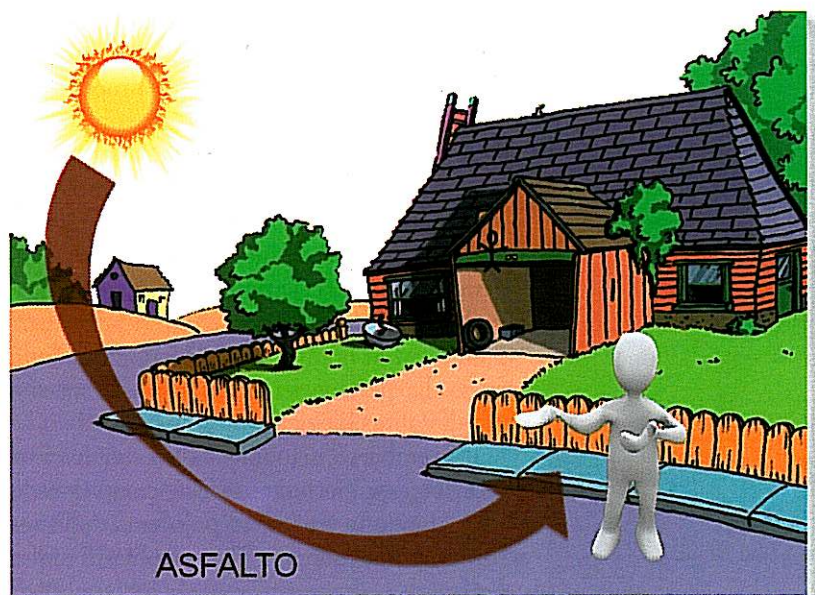
Ohm

Unidad de resistencia eléctrica del SI. Es la resistencia de un aparato que consume una corriente de un amperio cuando se le aplica un voltaje de un voltio.

Onda

Perturbación que se repite regularmente en el espacio y en el tiempo y que se transmite progresivamente de una partícula a otra o de una región a otra en un medio sin transporte de materia.

Figura 30. Efecto mirage



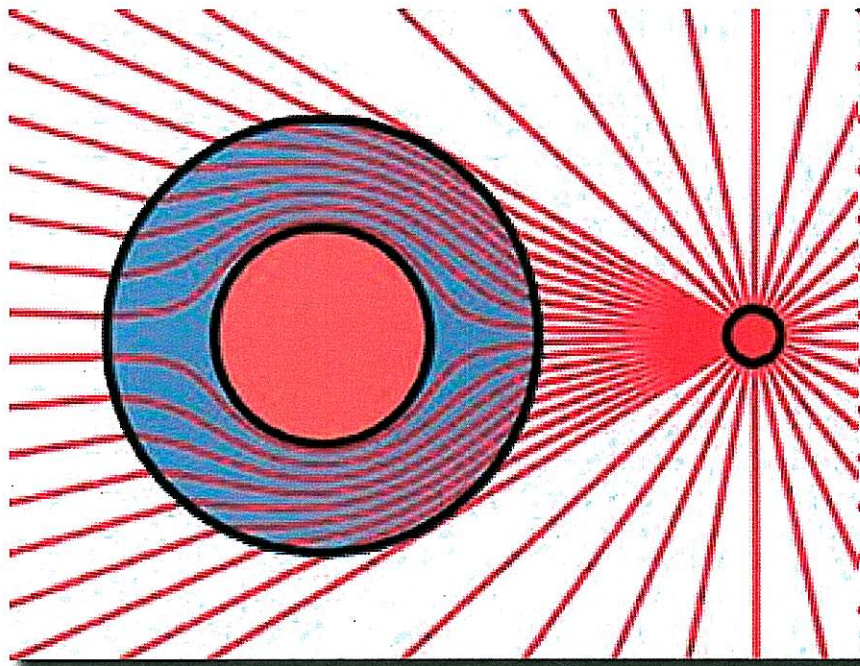


Figura 31

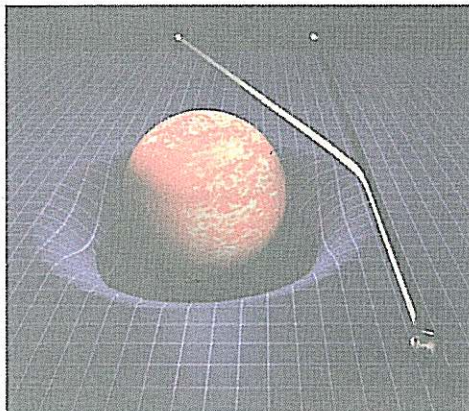
debería ser capaz, primero, de no absorber luz y, segundo, de no reflejar luz. Pero eliminar la reflexión simplemente no es posible, porque aún los objetos muy... muy transparentes, aquellos en que la luz puede transmitirse a través de ellos... sin casi ser absorbida... y nos dejan ver los que está "atrás"... aún estos objetos, reflejan algo de luz... y muchas veces nos percatamos de su presencia, precisamente por la aparición de esa luz reflejada. Por consiguiente, si queremos que algo sea invisible, tal vez los únicos candidatos posibles sean los objetos muy transparentes e incoloros, siempre y cuando seamos capaces de eliminar, de alguna manera, la reflexión. Aquí ha habido algunos avances y tenemos ya los llamados vidrios anti-reflejantes, que para algunos ángulos de observación, no reflejan la luz. Estos vidrios, aunque más caros que los vidrios comunes, son utilizados para cubrir pinturas o fotografías, eliminando la luz reflejada que proporciona brillos molestos que dificultan la apreciación de la obra. Podríamos decir que esos vidrios son "invisibles", no nos percatamos de su presencia cuando están frente al cuadro o frente a la fotografía. Pero fuera de ellos, todos los demás objetos necesariamente, y de acuerdo a las leyes de la física, absorben y reflejan la luz... por tal razón la invisibilidad había quedado como algo perteneciente a la "fantasía"... como las alfombras mágicas.

Sin embargo, actualmente se están haciendo avances importantes en este campo y se le está "dando la vuelta" al problema de la reflexión y la absorción. Para explicar la idea central de como vemos ahora la invisibilidad,

me voy a permitir referirme, primeramente, a un efecto óptico bastante común, conocido bajo el nombre de efecto "mirage", palabra francesa que quiere decir "espejismo". Es una experiencia familiar que cuando vamos viajando en automóvil por la carretera, en un día muy caliente y seco, vemos de repente, sobre la cinta asfáltica, un reflejo brillante que parece proveniente de un charco de agua... sin embargo, cuando nos acercamos... el reflejo desaparece y nos percatamos que no había tal charco de agua... que era un "espejismo". Este es el efecto "mirage" y su nombre, espejismo, proviene de que este efecto se reportó por primera vez por gente sedienta en el desierto, que veía a lo lejos el reflejo de estanques de agua y que al acercarse, se percataban de que había sido sólo un... espejismo.

Pero de acuerdo a la física el efecto "mirage" no es un espejismo, es un efecto de la ley de refracción. En un día caluroso, el asfalto se calienta mucho y este calor se transfiere al aire sobre la superficie. Por lo tanto la temperatura será mayor cerca del asfalto e irá disminuyendo conforme no alejamos hacia arriba. Debido a que el aire se expande cuando es calentado, la densidad del aire en la superficie será menor que el que está en las capas superiores. El decremento de densidad del aire resulta en un decremento en el índice de refracción. Esto quiere decir, que el índice de refracción del aire va a depender de la distancia a la superficie asfáltica, e irá aumentando conforme esa distancia crece. Por otro lado, la luz viaja más rápido en un medio con índice de refracción más bajo, y de acuerdo a la ley de refracción, la luz que incide a un cierto ángulo será refractada hacia arriba. Es decir, que la dependencia espacial del índice de refracción conforme la distancia al asfalto cambia, hace que un rayo de luz que incide a un cierto ángulo se vaya doblando hacia arriba, viaje después paralelo al asfalto y posteriormente salga hacia arriba, como si se hubiera "reflejado" sobre el asfalto. Y es precisamente ese "reflejo" el causante del espejismo (ver Fig. 30).

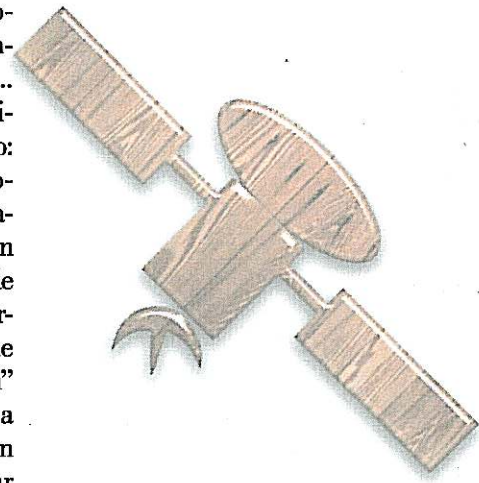
Lo que quería yo hacer notar con este efecto... el efecto "mirage"... es que variaciones espaciales graduales del índice de refracción hacen posible que la luz se "doble"... y cambie gradualmente su dirección de propagación... para un lado si el índice de refracción va aumentando... y para el otro lado si el índice de refracción va disminuyendo. Imaginemos entonces una esfera opaca la cual cubrimos con una cáscara esférica de un cierto espesor y construida con un material tal, que tenga un



índice de refracción que varía gradualmente en el espacio y que haga posible que cuando mande un rayo de luz, su variación en el índice de refracción es tal, que el rayo se desvía hacia un lado... dándole la vuelta a la esfera... pero en la otra la mitad de la cáscara esférica, el índice de refracción varía de manera opuesta para que el rayo se de vuelta hacia el otro lado y rodee la esfera... y después salga "derecho" en la misma dirección con la que llegó (ver Fig. 31). O sea, que si somos capaces de cubrir la esfera con un "manto"... un cascarón esférico... hecho de un material tal, que tenga un índice de refracción diseñado con variaciones espaciales tales, que hagan que un rayo de luz que llega en una dirección dada, entre al cascarón, viaje dentro de él rodeando la esfera y después salga del otro lado en la misma dirección en la que llegó. Entonces, un observador que estuviera del otro lado vería de donde vino el rayo luminoso, a pesar de la presencia de la esfera. La esfera opaca no "taparía" al rayo. La esfera sería invisible para rayos llegando en esa dirección. Ahora si podemos hacer ese diseño de material para rayos que lleguen en cualquier otra dirección y con cualquier otra frecuencia de oscilación, entonces habríamos construido un "manto" esférico que al cubrir la esfera con él... la haría invisible. En otras palabras el secreto de la invisibilidad, es poder cubrir a un objeto con un material tal, que haga que la luz le de "la vuelta"... la rodee... viaje alrededor de ella y después continúe su viaje en la misma dirección con la que llegó. De esta manera, con nuestros ojos percibiríamos a la luz que ilumina al objeto y a su manto, como si la esfera no existiera... porque cuando la luz llega a la esfera... simplemente "le da la vuelta"... habríamos construido: ¡un manto de invisibilidad!

Bueno, esto es ahora posible... ¿qué es posible?... ¿es posible construir un manto de invisibilidad? no... eso todavía no es posible... pero lo que al parecer sí es ya posible es... diseñarlos. Existe ahora un enfoque, llamado: teoría de las transformaciones, en que se toman las ecuaciones que describen la propagación de la luz en presencia de un objeto con una geometría simple... como una esfera... se le pone un manto esférico y se hace una transformación matemática de la ecuación, para que en la ecuación transformada los rayos "rodeen" a la esfera. Esta transformación matemática cambia la ecuación... la transforma... pero en la ecuación transformada se puede identificar cual sería el índice de refracción transformado. Este índice de refracción transformado nos da la información necesaria saber cual debe ser la variación espacial del índice de refracción del manto esférico para que el rayo rodee a la esfera. El problema es ahora encontrar ese material... es posible que un material con esos requerimientos de índice de refracción simplemente no exista... y entonces todo se vuelva a quedar en la fantasía... en la ficción... pero a lo mejor sería posible construir un metamaterial con esas características... a lo mejor sí... a lo mejor no... no está fácil... además, hay muchos interesados... algunos muy poderosos... que quieren hacer un manto invisible al radar... para cubrir, por ejemplo, un avión.

Con estos ejemplos quiero terminar recordando que el tema de la invisibilidad es un tema actual de investigación en el área de propiedades ópticas de materiales, y que el enfoque que aquí se presentó, basado en la teoría de las transformaciones, no es el único, y que nuestro grupo de investigación en el Instituto de Física de la UNAM está iniciando estudios en este tema.



Bibliografía

- Bohren, C. F. and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, J. Wiley & Sons, 1983.
- Kao, K. C. *Dielectric Phenomena in Solids*, Elsevier, 2004.
- Milonni, P. W. *Fast Light, Slow Light and Left-Handed Light*, Institute of Physics, 2005.
- Pankove, J. L. *Optical Processes in Semiconductors*, Dover, 1971.
- Prasad. P. R. *Nanophotonics*, Wiley-Interscience, 2004.
- Sapoval, B. and C. Hermann, *Physics of Semiconductors*, Springer-Verlag, 1995.
- Schäfer, W. and M. Wegener. *Semiconductor Optics and Transport Phenomena*, Springer, 2002.
- Simmons, J. H. and K. S. Potter, *Optical Materials*, Academic Press, 2000.
- Stenzel, O. *The Physics of Thin Film Spectra*, Springer, 2005.
- Verdeyen, J. T. *Laser Electronics*, Prentice may, 1989.