

EL COLOR DE LOS METALES

Rubén G. Barrera
Instituto de Física. UNAM

RESUMEN

Se presenta la idea de color como una relación compleja entre cuatro conceptos fundamentales: La luz, el radiador o emisor, el reflector, donde se toma como caso particular el de las superficies metálicas, y el ojo humano como receptor lumínico. Se analiza, con fines pedagógicos, el desarrollo histórico de cada uno de estos conceptos apuntando diversos factores de carácter socio-económico que han intervenido en su elaboración e ilustrando el proceso con algunos ejemplos.

ABSTRACT

We present the idea of color as a complex relationship among four basic concepts: light, radiator or light emitter, reflector, where we take metallic surfaces as a particular case, and the human eye as light receptor. We analyze, with teaching purpose, the historical development of each of these concepts pointing out different factors of socio-economical character which have influenced its elaboration; we illustrate this process with some examples.

Si analizamos las siguientes frases: el oro es pesado, el oro es caro, el oro es amarillo, vemos que cada una de ellas envuelve distintas propiedades atribuidas al oro. En la primera se trata de comparar una

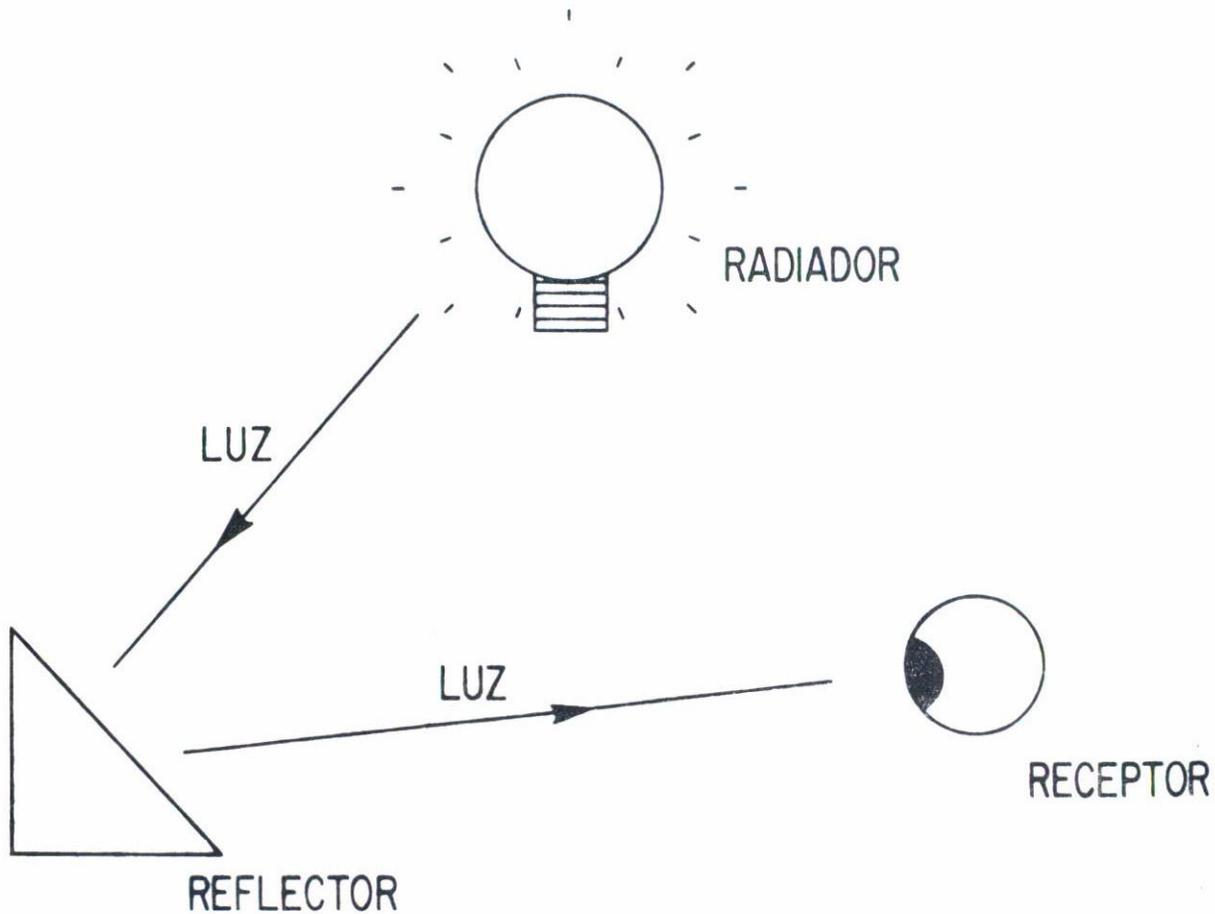


Fig.1 Conceptos involucrados en el actual modelo del color.

propiedad física del oro, su peso, con el de otras sustancias de uso común; en la segunda se trata de la relación que guarda el oro con otras sustancias pero sólo a través de toda una estructura socio-económica basada en la producción e intercambio de mercancías; por otra parte, la tercera es una propiedad psico-física característica de una complicada relación entre la luz, el oro, el ojo y el cerebro. El modelo que se tiene actualmente del color envuelve cuatro conceptos fundamentales: luz, radiador, reflector y receptor (ver Fig.1). Para que percibamos el color de un objeto es necesario que el objeto sea iluminado con luz producida necesariamente por algún sistema (radiador), la cual es captada, en este caso, por el ojo (receptor) después de haber sido reflejada por el objeto (reflector) en cuestión. Finalmente, la información recibida por el ojo es procesada por el cerebro e integrada en el concepto: color. Y así decimos "el oro es amarillo".

Si queremos ser realmente críticos, la primera pregunta sería ¿es éste el modelo correcto?, ¿no han existido acaso otras formas de entender el color?. A este respecto nos enfrentamos, a primeras de cambio, a un problema metodológico; o sea ¿cuál fue el método que nos llevó a determinar que el modelo que presentamos es el modelo correcto? y ¿en qué sentido tomamos la palabra "correcto"?. La respuesta a esta pregunta la hemos oído ya un sinnúmero de veces: dicho método es el método experimental y el modelo es "correcto" en el sentido que lo marca dicho método. Es más, todos los conocimientos obtenidos a través de este método constituyen lo que ahora llamamos ciencia. Al parecer podríamos, otra vez, conformarnos con dicha respuesta y simplemente seguir adelante. Sin embargo quisiera hacer algunas consideraciones sobre dicho método con el fin de dejar sentado con mayor claridad las bases metodológicas que utilizamos actualmente para entender conceptos como el del color.

Esquemáticamente el método experimental consta de cuatro pasos, a saber: observación, construcción de un modelo o teoría, experimentación y verificación. Lo que quiero apuntar ahora es que este método no es un

método cerrado en su propio discurso, impulsado por la curiosidad "innata" del investigador y con una dinámica condicionada esencialmente por contradicciones internas, sino que muy por el contrario es un método inmerso en una tradición cultural específica y concretizado en una formación social dada. Esto hace que la construcción de cualquier modelo utilice necesariamente conceptos provenientes de un entorno cultural y artístico dado y de experiencias interpretadas a la luz de teorías aceptadas socialmente y con instrumentos de observación caracterizados por el grado de desarrollo tecnológico y económico de todo un complejo social determinado. Además, los fenómenos a observar dependen, sí, de la curiosidad humana, pero dicha curiosidad se encuentra modulada por los intereses de la clase dirigente, la cual va a estimular sólo aquella actividad científica que sea coherente con su permanencia y reproducción. Baste recordar a Giordano Bruno, Galileo y Oppenheimer.

Esto nos lleva a considerar a la actividad científica como un fenómeno social cuyo producto, la teoría científica, no puede liberarse de su proceso mismo de gestación y, por tanto, no puede ser considerada como una verdad independiente de la estructura social que hizo posible su conformación. Es en este sentido que decimos que los modelos o las teorías científicas constituyen una "verdad histórica".

Para ilustrar este proceso de adquisición del conocimiento científico considerado como "verdad histórica" analizaremos los cuatro conceptos fundamentales que aparecen en la teoría moderna del color, comenzando con la luz; ¿qué es la luz?

La preocupación sobre el origen y naturaleza de la luz se remonta a épocas muy lejanas; baste recordar las palabras bíblicas: "y Dios hizo la luz". Sin embargo dentro del contexto del método experimental fue precisamente Newton, en el siglo XVII, el primero que establece una teoría corpuscular de la luz, coherente con la concepción mecanicista del mundo muy en boga en aquella época. Pero en esa misma época y dentro del mismo marco del método experimental aparece también la teoría ondulatoria de la luz trabajada por Huyghens, en analogía con la teoría del sonido. Ambas teorías explicaban un cierto número de fenómenos luminosos; sin embargo, el método experimental no fue capaz de discernir, por mucho tiempo, sobre la "validez" de alguna de estas dos concepciones contradic-

torias sobre la naturaleza de la luz.

Si la luz es una onda, ¿qué es aquello que ondula?; este tipo de preguntas representaban uno de los escollos más difíciles que tenía que salvar la teoría ondulatoria. Por otra parte, durante los siglos XVII y XVIII los hombres de ciencia formaban ya un grupo social estructurado alrededor de las llamadas "sociedades científicas", subvencionadas, en gran parte, por el estado. La ciencia comenzaba ya a ser parte de la ideología dominante.

Pero fue el siglo XIX el marco histórico dentro del cual, se conjugaron las teorías de la luz con la teoría electromagnética. Así, en 1808, la Academia de Ciencias Francesa anunciaba su premio anual para aquel que desarrollara una teoría matemática de la doble-refracción así como su confirmación por medio del experimento. Diez años más tarde, la misma Academia otorgaba su premio a Augustine Fresnel que, basándose en la teoría ondulatoria, había desarrollado una teoría de la difracción que impresionó vivamente a los miembros de la Academia, sobre todo por la exactitud de sus predicciones. Lo que "ondulaba" era el éter luminífero, un fluido de características muy especiales que inundaba todo el espacio y servía de soporte a la transmisión de señales luminosas. Cabe mencionar que en aquella época el concepto de fluido era un concepto fundamental para la explicación de multitud de fenómenos naturales. Desde la muy antigua teoría de los humores en medicina, la teoría del fluido vital, como ingrediente esencial de los seres vivos hasta las recién aparecidas teorías del calórico y el fluido eléctrico en la física. Por tanto, además de los éxitos cuantitativos, es indudable que el concepto de fluido como concepto unificador en la visión del mundo contribuye a la eventual aceptación social de la teoría ondulatoria. Aunque no por esto hay que olvidar el desarrollo paralelo de las teorías atomísticas surgidas esencialmente de la química y que representan el polo contrario en la dualidad continuo-discreto; dualidad que, por otra parte, ha caracterizado en mucho la evolución de las teorías físicas.

En la segunda mitad del siglo XIX aparece la teoría del éter electromagnético, otro fluido de características singulares, que se supone como el responsable de la transmisión de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Es claro, además, que las mentes más preclaras del siglo,

Cauchy, Poisson, Stokes, Green, Lamb, se dedican a desarrollar la teoría matemática de la dinámica de fluidos.

Por otra parte, la teoría matemática del electromagnetismo es desarrollada por Maxwell como una teoría hidrodinámica de un éter electromagnético tomado como un fluido en constante movimiento. Para Maxwell el éter invade todo el espacio penetrando en el seno mismo de los materiales, dentro de los cuales adquiere propiedades especiales identificadas por dos parámetros μ y ϵ que caracterizan sus propiedades de inducción magnética y eléctrica respectivamente. Se acepta la existencia de la fuerza eléctrica \vec{E} y la fuerza magnética \vec{H} que al actuar sobre el éter inmerso en los materiales provocan una inducción magnética $\vec{B} = \mu\vec{H}$ y una inducción eléctrica $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$, ambas proporcionales a las fuerzas que las producen. A μ se le denomina la permeabilidad magnética y a ϵ la permeabilidad eléctrica.

Por muchos años el trabajo de Maxwell se concentra en tratar de descubrir la estructura dinámica del éter. Y es precisamente en su segunda Memoria de 1862 donde Maxwell propone un modelo matemático del éter que explica un gran número de fenómenos electromagnéticos, que identifica a la luz como vibraciones de dicho éter, considerándola, por tanto, de naturaleza electromagnética y capaz de ser producida por la aceleración de cargas eléctricas (radiación).

No hay que olvidar que la época de Maxwell corresponde al deterioro de la libre competencia en la parte final de la primera fase del capitalismo europeo; época en la cual la investigación científica comienza a planificarse (especialmente en Alemania) con el fin de integrarla al sector productivo. Esto hace que la investigación de los fenómenos eléctricos adquiriera una importancia económica real. Por ejemplo, Siemens y Halske crean una compañía eléctrica en 1847 y se encargan de construir la red telegráfica indo-europea que en 1870 conecta Londres-Berlín-Odesa-Teherán y Calcuta. Siemens llega a ser asesor científico del gobierno Británico y su barco, El Faraday, tira 5 cables trasatlánticos entre 1875 y 1885. En 1887 el gobierno Alemán crea el Physikalische-Technische Reichsanstalt, un instituto de investigación en ciencias exactas y tecnología de precisión. Siemens dona 500,000 marcos para dicho proyecto y su amigo Hermann von Helmholtz de la universidad de Berlín y uno de los fí-

sicos mas brillantes de la época, es nombrado director del Instituto.

Para Maxwell el éter es un fluido en movimiento perpetuo estructurado en una infinidad de vórtices cuyos ejes están a lo largo de las líneas de fuerza magnética y donde cada vórtice aislado puede ser considerado como un tubo de fuerza magnética, siguiendo en ésto las ideas de Faraday. (ver Fig.2).

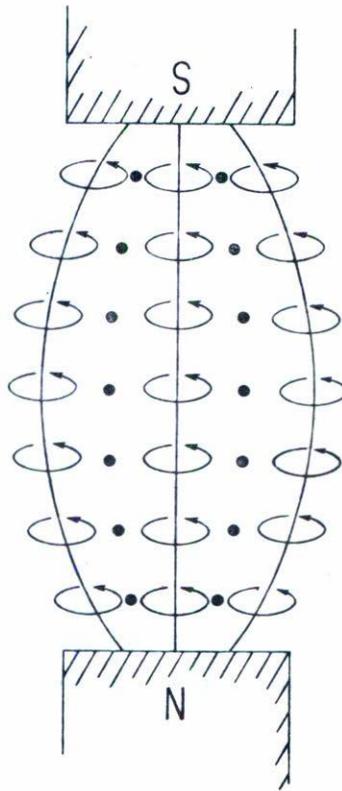


Fig.2 Eter Maxwelliano

La densidad de energía cinética de un fluido en rotación es proporcional a μv^2 donde μ es la densidad del fluido y \vec{v} su velocidad. Para entonces era ya conocido que la energía contenida en el campo magnético era igual a

$$\frac{1}{8\pi} \int \mu H^2 d^3r, \quad (1)$$

donde la integración se realiza sobre todo el espacio y μ denota la permeabilidad magnética. Era entonces natural identificar la densidad local del fluido con la permeabilidad magnética y la velocidad de rotación de los vórtices con la fuerza magnética.

Una objeción inmediata a dicha analogía reside en el hecho de que en dos vórtices vecinos rotando en la misma dirección, el fluido sobre la circunferencia de un vórtice debe moverse en una dirección si se le considera parte de un vórtice y en dirección contraria si se le considera parte del vórtice contiguo; lo cual implicaría que el movimiento del fluido debiera considerarse como discontinuo.

Maxwell le da la vuelta a dicha dificultad suponiendo que la electricidad se encuentra concentrada en pequeñas partículas que se encuentran ubicadas en capas que envuelven cada vórtice; así, entre dos vórtices contiguos que rotan en la misma dirección y con la misma velocidad, existe una capa de partículas que al ser movidas, de cada lado, en direcciones opuestas, se ponen simplemente a girar sobre si mismas. Se supone, además, que la velocidad del centro de cada partícula está dada por la velocidad periferal media de los vórtices entre los cuales se encuentra. Así, si en un vórtice la velocidad periferal de rotación es mayor que en el vórtice contiguo, es decir, la fuerza magnética cambia de alguna manera, de un lugar a otro vecino, entonces la velocidad del centro de las partículas es distinta de cero y las partículas se mueven generando una corriente eléctrica en dirección perpendicular al eje de los vórtices (ver Fig.3). Maxwell expresa esta condición por medio de la siguiente ecuación, que en unidades adecuadas se escribe como

$$\text{rot } \vec{H} = 4\pi \vec{j} \quad , \quad (2a)$$

donde \vec{j} es el flujo de partículas eléctricas por unidad de área por unidad de tiempo y rot es un operador diferencial, tal que

$$\text{rot } \vec{H} \equiv \left[\frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial y} , \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} , \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right] \quad . \quad (2b)$$

Dicho operador se denomina "rotacional" y está relacionado con la rotación local del campo de fuerzas sobre el cual se aplica.

Por otra parte, si en algún punto del espacio la fuerza magnética varía en el tiempo, la velocidad periférica de los vórtices cambia y el disturbio así provocado se propaga de una parte del modelo a otras partes, debido a la acción mutua de partículas y vórtices. Maxwell muestra que esta acción está determinada por la relación

$$\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = - \text{rot } \vec{E} \quad , \quad (3)$$

que conecta la fuerza \vec{E} , ejercida sobre una cantidad unitaria de partículas debida a la acción tangencial de los vórtices, con la densidad de masa veces el cambio en la velocidad $\partial \vec{H} / \partial t$ en los vórtices vecinos. Es, en otras palabras, la ecuación de movimiento de la mecánica de Newton aplicada al éter maxwelliano y corresponde a la ley de inducción de Faraday. Por tanto, \vec{E} debe ser interpretada electromagnéticamente como la fuerza electromotriz inducida, y el movimiento de las partículas como una corriente eléctrica.

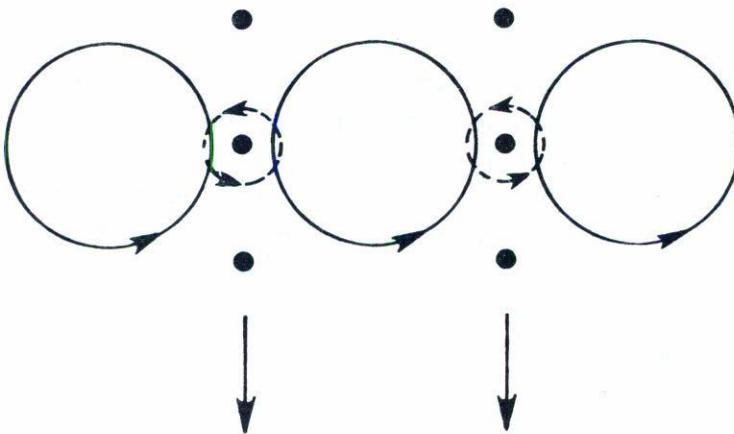


Fig.3 Éter maxwelliano. Sistema de vórtices y partículas.

El siguiente paso era extender el concepto del éter para incluir los fenómenos electrostáticos. Para este propósito Maxwell supone que las partículas eléctricas están "pegadas" al fluido por medio de fuerzas elásticas y que cuando son desplazadas fuera de su posición de equilibrio aparecen fuerzas de restitución que tratan de devolverlas a su posición inicial. El desplazamiento \vec{D} de las partículas representa el campo electrostático y es proporcional a la fuerza eléctrica que lo produce

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (4)$$

la constante de proporcionalidad representa la permeabilidad eléctrica y es distinta para el éter inmerso en distintos materiales.

El desplazamiento de las partículas no constituía en sí una corriente, dado que obtenido un valor éste permanecía constante. Sin embargo, variaciones temporales del desplazamiento deberían ser consideradas como corrientes y ésto es a lo que Maxwell llamó corrientes del desplazamiento; concepto que llegó a ser de capital importancia dentro de su teoría, ya que debía de ser tomado en consideración en la relación (2a) que conecta la corriente con la fuerza magnética. Por tanto la Ec. (2a) se escribirá ahora como

$$\text{rot } \vec{H} = 4 \pi \vec{J} \quad (5)$$

donde el vector \vec{J} , llamado corriente total, es la suma de la corriente de convección \vec{j} más la corriente de desplazamiento $(1/4\pi) \partial \vec{D} / \partial t$.

Habiendo obtenido las ecuaciones de movimiento de su sistema de vórtices y partículas, Maxwell se avocó a la tarea de determinar la velocidad de propagación de los disturbios producidos en el sistema.

En ausencia de materia (es decir, tomando la corriente de convección $\vec{j} = 0$) y utilizando el hecho de que las líneas de fuerza magnética son líneas cerradas, es posible combinar las ecs. (3), (4) y (5) para obtener

$$\nabla^2 \vec{H} - 4\pi\epsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0; \quad (6)$$

una ecuación de ondas, que establece que los disturbios en el éter viajan sin deformarse con una velocidad constante igual a $1/\sqrt{4\pi\epsilon_0\mu_0}$, donde ϵ_0 y μ_0 son la permeabilidad eléctrica y magnética del éter, respectivamente; ambas capaces de ser medidas en el laboratorio, por métodos electromagnéticos. El valor de la velocidad de propagación resultó ser muy parecido al medido por Fizeau en 1849 para la velocidad de la luz, por lo cual Maxwell identificó a la luz como vibraciones del éter.

Fue precisamente la existencia de una corriente de desplazamiento, aun en ausencia de materia, lo que hizo posible la deducción de la Ec. (6); pero también fue la existencia de dicha corriente lo que entonces parecía más cuestionable y lo que dificultó, en mucho, la aceptación de la teoría. Aunque las ecuaciones de Maxwell describían una gran variedad de fenómenos electromagnéticos, tenían dificultades graves para describir fenómenos como el de la reflexión; sin embargo predecían un nuevo fenómeno: la radiación de ondas electromagnéticas por cuerpos cargados.

Helmholtz encontraba el lenguaje de Maxwell oscuro y contradictorio, pero decide alrededor de 1871, poner ante la prueba del experimento a las distintas teorías electromagnéticas rivales y le sugiere a uno de sus mejores estudiantes, Heinrich Hertz, diseñar un experimento que detectara si la fuerza eléctrica se propagaba a la velocidad de la luz tal y como lo predecía la teoría Maxwelliana.

En 1886, después de ocho años de trabajo sobre la teoría de Maxwell, Hertz logra detectar las ondas electromagnéticas producidas por un oscilador. El laboratorio de Helmholtz se convierte entonces en el centro más importante de investigación sobre ondas electromagnéticas y propagación de la luz. Los resultados de las investigaciones de dicho laboratorio fueron ampliamente difundidas. Basado en dichos resultados, Guglielmo Marconi construye, en el laboratorio del profesor Augusto Righi de Boloña, aparatos capaces de transmitir información a través del espacio por medio de la radiación de ondas electromagnéticas. En 1896, el mismo Marconi trata de vender al Almirantazgo Británico el diseño de un torpedo teledirigido.

Por tanto, a la pregunta ¿qué es la luz? ya podemos responder diciendo, que de acuerdo al método experimental practicado por la comuni-

dad científica europea de fines de siglo pasado, estimulada por una sociedad en acelerado proceso de industrialización, la luz son vibraciones de un éter, respecto a cuya estructura no había todavía consenso, pero que estaban descritas por la Ec. (6) y que eran producidas por el movimiento de partículas cargadas.

Para entonces un gran número de físicos aceptaban ya que la materia estaba compuesta por pequeñas moléculas o átomos y que la electricidad residía, de alguna manera, en el seno de dichos átomos; evidencia que se había acumulado, en mucho, gracias al desarrollo de la electroquímica, cuya una de sus primeras aplicaciones sirvió para platear los cubiertos de las mesas de la nueva clase dirigente. Dadas las características de la vibraciones luminosas, éstas deberían ser producidas (radiadas) por oscilaciones muy rápidas de cargas. La frecuencia de dichas oscilaciones correspondía a las frecuencias de vibración atómicas, calculadas a partir de modelos atómicos estructurados en base de partículas cargadas.

Con esto podemos ya entrar al segundo concepto mencionado dentro del modelo del color: el radiador.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la radiación de la luz es debida a las vibraciones de cargas eléctricas en el seno de los átomos. Dicha hipótesis estaba basada en la aplicación sistemática del método experimental. Era un hecho conocido que cuando se echaba sal sobre una llama ésta adquiría un fuerte color amarillo. Este hecho llegó a asociarse con la presencia de un determinado elemento químico cuyos átomos vibraban a una frecuencia característica causando vibraciones del éter a cuya frecuencia se le asociaba un "color" también característico.

Así, a partir del análisis de la luz radiada, llamado técnicamente análisis espectroscópico, se comenzó a determinar la composición química de la atmósfera solar. Se desarrollaron también, en los laboratorios de la pujante industria química alemana, técnicas espectroscópicas complementarias al análisis químico tradicional. No hay que olvidar tampoco que los problemas a los que se enfrenta la industria química estimulan fuertemente el desarrollo de la termodinámica química; en especial, las condiciones de equilibrio termodinámico de las reacciones químicas.

El éter no se podía escapar a un tratamiento termodinámico. Era un hecho conocido que si un cuerpo radiaba se enfriaba y si por el contrario, absorbía radiación, entonces se calentaba. ¿No era entonces posible rodear a un radiador de otros radiadores de tal manera que éste pudiera absorber aquello que perdía y mantenerse así a la misma temperatura?; en otras palabras ¿era posible mantener el éter en equilibrio termodinámico con sus alrededores?. La respuesta fue afirmativa y se diseñaron experimentos específicos para determinar con precisión las propiedades termodinámicas del éter. Se encontró que en equilibrio termodinámico, el éter, a diferencia de los átomos, no vibra a una sola frecuencia determinada, sino que ejecuta un movimiento muy complejo; que sin embargo puede descomponerse como una superposición de movimientos ondulatorios ("modos") de distinta amplitud, pero cada uno caracterizado por una sola frecuencia y una sola longitud de onda. La distribución de amplitudes como función de la frecuencia resulta ser una distribución continua que sólo depende de la temperatura y no de la naturaleza del material que contiene al éter.

A la función que relaciona el cuadrado de la amplitud de la distribución con la frecuencia o longitud de onda, se le denomina "espectro de radiación". En la Fig. 4 mostramos los resultados de las mediciones del espectro de la radiación electromagnética en equilibrio a distintas temperaturas, realizadas por O. Lummer y E. Pringsheim alrededor de 1900.

En este punto quiero hacer énfasis en que las propiedades termodinámicas del éter no pueden ser deducidas de un tratamiento puramente mecánico del sistema de vórtices y partículas; ya que la mecánica, por sí sola, no es capaz de describir la dinámica de un sistema acoplado a un baño térmico. Dicha descripción requiere de hipótesis adicionales de carácter estadístico.

Cabe mencionar, que las hipótesis de carácter estadístico chocaban fuertemente contra toda una tradición filosófica y cultural basada en el determinismo absoluto. Tradición que dominó por más de dos siglos el desarrollo de la física.

Resumiendo, podemos entonces decir que para la producción de luz contamos esencialmente con dos tipos de "lámparas" (radiadores). Si logramos excitar un solo estado de vibración de los átomos en un cierto

material, por ejemplo átomos de un gas atrapados en un tubo de rayos catódicos, obtendremos un espectro de radiación discreto, es decir radiación de una sola frecuencia a la que llamaremos luz monocromática. Si en cambio producimos luz excitando un sólido por medio de calor, tenemos entonces una "lámpara incandescente" caracterizada por un espectro de radiación continuo. Por ejemplo, la luz solar, a la que hemos dado en llamar luz "blanca", posee un espectro de radiación continuo.

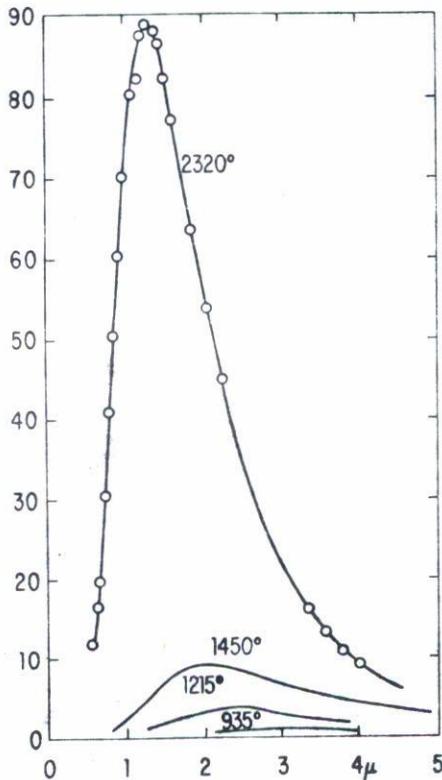


Fig.4 Espectro de radiación electromagnética en equilibrio termodinámico a diferentes temperaturas como función de la longitud de onda.

El espectro de radiación es un concepto esencial dentro del modelo del color, ya que el color de los objetos depende fuertemente del "tipo de luz" con que iluminemos a dichos objetos, o sea del espectro de radiación de las "lámparas".

Fijadas ya estas ideas, nos encontramos ya en posición de analizar el tercer concepto dentro del modelo del color: el reflector.

El problema de la reflexión de la luz ha sido, y sigue siendo, uno de los mas discutidos y controvertidos en el estudio de la interacción luz-materia. El problema reside esencialmente en determinar las condiciones de contorno que debe satisfacer el campo electromagnético al atravesar una interfase.

Este problema fue atacado exitosamente por Fresnel en 1823. Fresnel adopta las ideas de Young al suponer que la reflexión y refracción son debidas a la diferencia en la inercia del éter en los distintos materiales; supone además que dicha inercia es proporcional al inverso del cuadrado de la velocidad de propagación en el medio. Las condiciones que propone deben satisfacerse en la interfase entre dos medios son que los desplazamientos del éter paralelos a la interfase deben ser iguales en los dos medios y que la energía de las ondas reflejadas y refractadas debe ser igual a la energía de la onda incidente.

Bajo estas suposiciones Fresnel obtiene la amplitud de las ondas reflejadas y refractadas en términos de la amplitud de la onda incidente. Dichos resultados se resumen en sus ahora famosas fórmulas llamadas la "ley de los senos" y la "ley de las tangentes". Dichas leyes habían sido descubiertas experimentalmente por David Brewster algunos años antes.

Sin embargo la teoría de Fresnel no puede ser considerada, en el sentido estricto de la palabra, una teoría dinámica, ya que las propiedades mecánicas del éter no son definidas. Su método consiste, más bien, en determinar las condiciones que el éter debe satisfacer en la interfase para llegar a los resultados experimentales. El desplazamiento del éter, supuesto por Fresnel, no puede ser considerado el desplazamiento usual de un fluido o un sólido elástico (modelos entonces en boga, del éter luminífero). Ya que la componente normal de dicho desplazamiento es discontinua a través de la interfase.

Fue precisamente este hecho, la discontinuidad de la componente normal del desplazamiento del éter, la que puso "en jaque" a los distintos modelos mecánicos del éter que se desarrollaron a lo largo del siglo pasado. Por ejemplo, el gran matemático francés Cauchy, basado en el mo-

delo de sólido elástico para el éter luminífero, produce, en un espacio de diez años, tres teorías diferentes de la reflexión. En todas ellas obtiene correctamente o casi correctamente las fórmulas de Fresnel, sin embargo son teorías irreconciliables entre sí y establecen condiciones de contorno incorrectas para un sólido real y relaciones improbables entre sus constantes elásticas. En este sentido las teorías de Cauchy, como las de muchos otros (MacCullagh (1835), Neumann (1837), ...) se asemejan a la de Fresnel; dado que suponen la existencia de un sólido elástico cuyas propiedades dinámicas no pueden justificar.

El éter maxwelliano no escapó a esta dificultad, por lo que en las memorias originales de Maxwell no aparece referencia alguna a los fenómenos de reflexión y refracción. Sin embargo, antes de la aparición de su célebre "Treatise on Electricity and Magnetism" de 1873, Helmholtz apunta que dicha omisión se puede subsanar si se supone, que en la interfase, las componentes tangenciales de \vec{E} y de \vec{B} son continuas, así como las componentes normales de \vec{D} y de \vec{H} . Pero otra vez, estas condiciones son inconsistentes con el modelo de partículas y vórtices, ya que el vector \vec{D} representa un desplazamiento real de las partículas fuera de su posición de equilibrio, por lo que, tanto su componente normal como su componente tangencial deberían ser continuas.

En conclusión podemos decir, que aunque la formulación matemática de las leyes de reflexión se conocía desde 1823, no fue posible ir más allá, y dar, dentro de las teorías mecánicas del éter, una explicación satisfactoria y consistente de las condiciones de contorno que debía satisfacer el campo electromagnético en la interfase. Para que ésto fuera posible, el concepto mismo del éter mecánico tuvo eventualmente que desaparecer del marco teórico de los fenómenos electromagnéticos. En mucho debido a todos los intentos fallidos de medir la velocidad de la tierra (o de cualquier otro objeto) con respecto al éter y posteriormente con la aceptación del principio de que todos los intentos de este tipo siempre fallarían, la palabra éter comenzó a entrar en desuso y se le substituyó por la palabra "vacío". Entendiendo al "vacío" como la ausencia completa de materia con la única propiedad física de ser capaz de transmitir ondas electromagnéticas.

Sin embargo con el advenimiento de la electrodinámica cuántica

se consideró que el vacío era el estadio donde residían también las oscilaciones del "punto cero" del campo electromagnético así como las fluctuaciones del "punto cero" de la carga y la corriente y de su correspondiente polarización (polarización del "vacío"). Por tanto, seguir llamando "vacío" a un ente tan rico en propiedades físicas parece ya ridículo, por lo que seguiré manteniendo el uso de la palabra éter; pero ahora no referida a un modelo mecánico sino a un ente cuya estructura y naturaleza siguen demandando una explicación.

Con respecto a la estructura de la materia, la teoría atomística, que suponía a la materia constituida por una multitud de pequeños átomos o moléculas, había adquirido un consenso casi total en el seno de la comunidad científica. La contribución de H.A.Lorentz al desarrollo del modelo atomístico fue precisamente la electrificación de dicho modelo; es decir, la suposición de que todas las fuerzas de interacción entre dichos átomos eran de origen electromagnético. A partir de dicha suposición Lorentz elabora una "Teoría de Electrones" que aparece publicada bajo este título a fines del siglo pasado.

La diferencia esencial entre la "teoría de electrones" de Lorentz y las de sus predecesores (Weber, Riemann, Clausius) era que en vez de suponer que la interacción entre los electrones era una interacción a distancia, Lorentz suponía que ésta se propagaba a través del éter obedeciendo las ecuaciones de Maxwell.

En este punto quiero también apuntar el fenómeno paralelo de electrificación de la sociedad burguesa. A fines de siglo, los fenómenos eléctricos ya eran del dominio popular en las sociedades industriales y podía uno encontrar desde peines eléctricos para "enchinar" el pelo hasta tratamientos con toques eléctricos en los hospitales para enfermos mentales. La energía eléctrica comienza primero por iluminar las calles, los puertos y las estaciones de ferrocarril. En los Estados Unidos, Edison organiza en 1882 la construcción de la primera gran central generadora de energía eléctrica, la Edison Electric Illuminating Co. Por otra parte, el proceso de monopolización en la Industria Eléctrica hace que para 1912 existan sólo dos grandes compañías, la General Electric, Co., en los Estados Unidos y la Siemens-Halske-Schuckert en Alemania, trabajando en estrecha colaboración desde 1908, a unos cuantos años del desenlace de

la primera Gran Guerra.

Veamos ahora la estructura de la Teoría de Electrones de Lorentz y su impacto conceptual en el fenómeno de reflexión y refracción de la luz.

De acuerdo a Lorentz el campo electromagnético está descrito únicamente por los vectores de fuerza eléctrica y magnética \vec{E} y \vec{H} y los materiales no son otra cosa más que densidades de cargas y corrientes eléctricas. Por tanto, la aparición de la inducción eléctrica y magnética es debida a la acción de estas fuerzas sobre dichas cargas y corrientes; como vemos una visión muy diferente al concepto Maxwelliano de lo que es un material.

En ausencia de fuerzas externas el material se encuentra eléctricamente neutro; sin embargo la presencia de una fuerza externa separa las cargas de sus posiciones de equilibrio y decimos entonces que el material se "polariza". Si, por otra parte, la fuerza externa es debida a vibraciones del éter, como en el caso de una onda luminosa, entonces las cargas van a oscilar acercándose y separándose unas de otras y por tanto radiando ondas electromagnéticas en todas direcciones. La evidencia experimental nos fuerza entonces a pensar que la radiación emitida por todas las partículas, conjuntamente con el campo electromagnético externo, se combinan ahora para componer sólo dos ondas que viajan en distintas direcciones, la onda reflejada y la onda refractada.

La descripción matemática de este fenómeno se realiza mediante la introducción de un nuevo concepto, el campo de polarización \vec{P} . La magnitud y dirección de dicho campo en cada punto del material es proporcional a la separación entre sus cargas positivas y negativas. Se demuestra entonces que, en ausencia de corrientes de convección, la Ec.(5) maxwelliana

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7)$$

toma ahora la forma

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + 4\pi \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad , \quad (8)$$

donde $\partial \vec{P} / \partial t$ es la corriente debida a la variación temporal de la polarización (corriente de polarización) o en el caso de un conductor es la corriente debida a sus cargas libres. Obviamente en ausencia del material, la ecuación para el éter libre es ahora

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} . \quad (9)$$

Aunque de las Ecs. (7) y (8) se puede extraer una relación formal

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P} , \quad (10)$$

entre el vector de polarización y el llamado vector de desplazamiento \vec{D} de Maxwell; este último carece ya, dentro de la nueva teoría, de una interpretación física verdadera.

Por tanto, todas las dificultades relacionadas con el problema de reflexión, debidas a una falta de interpretación de la discontinuidad de la componente normal de \vec{D} a través de la interfase, se resuelven de manera coherente dentro del modelo de electrones inmersos en el éter. Ahora lo que el modelo requiere es la continuidad del vector de polarización \vec{P} ; por lo que, la discontinuidad de la componente normal de \vec{D} implica ahora (ver Ec.10) la discontinuidad de la componente normal E_n de la fuerza eléctrica \vec{E} . Pero la discontinuidad de E_n se puede interpretar, a su vez, como debida a una acumulación de electrones sobre la interfase, todo lo cual es coherente con el modelo.

Lo único que se requiere ahora para poder resolver las ecuaciones de movimiento de éter y electrones, es una relación funcional entre \vec{P} y \vec{E} .

Suponiendo que en cada punto del material (considerado como continuo), la fuerza eléctrica \vec{E} separa las cargas positivas de las negativas y que éstas regresan a su posición de equilibrio debido a una fuerza, tipo resorte, proporcional a su desplazamiento \vec{P} , la ecuación de movimiento del material es simplemente

$$\frac{d^2 \vec{P}}{dt^2} = f \vec{E} - \omega_0^2 \vec{P} , \quad (11)$$

donde f y ω_0^2 son constantes de proporcionalidad características de cada material.

Si ahora consideramos que la fuerza eléctrica oscila a una frecuencia ω y que, por tanto, en el estado estacionario el desplazamiento \vec{P} de las cargas oscilará también a la misma frecuencia; de la Ec. 11 obtenemos la relación

$$\vec{P} = x(\omega) \vec{E} \quad (12a)$$

donde

$$x(\omega) = \frac{f}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (12b)$$

es la llamada susceptibilidad eléctrica.

Para este modelo simple de material $x(\omega_0) \rightarrow \infty$, lo cual implicaría un desplazamiento infinito de cargas; esto no sucede en realidad ya que existen mecanismos de disipación energética no incluidos en el modelo. Por otra parte, para oscilaciones muy rápidas ($\omega \rightarrow \infty$) $x \rightarrow 0$; es decir, las cargas, debido a su inercia, no tienen tiempo de responder a una fuerza que varía tan rápidamente y simplemente no se desplazan. Aunque este modelo es poco realista, nos será suficiente para propósitos de ilustración.

La relación entre la susceptibilidad $x(\omega)$ y la permeabilidad $\epsilon(\omega)$ de la teoría maxwelliana, se obtiene cambiando las Ecs. (4) y (10), y queda dada por

$$\epsilon(\omega) = 1 + 4\pi x(\omega) \quad (13a)$$

$$= 1 - \frac{4\pi f}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (13b)$$

En el caso de un conductor perfecto no existe fuerza de restitución debida a la separación de cargas, ya que en su seno las cargas están libres. En este caso, en la Ec. (11), $\omega_0 = 0$ y la permeabilidad eléctrica queda dada por

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{4\pi f}{\omega^2} \quad (14)$$

(Ver Fig.5)

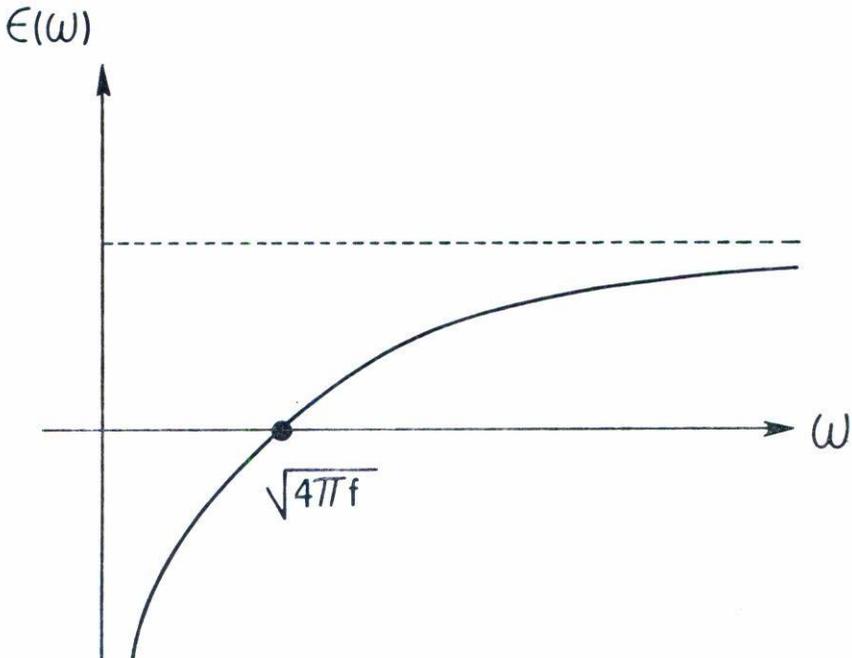


Fig.5 Función dieléctrica de un conductor perfecto como función de la frecuencia.

Introduciendo la Ec. (14) en las fórmulas de Fresnel obtenemos que la reflectancia $R(\omega)$, definida como el cociente de la energía luminosa reflejada sobre la energía luminosa incidente, queda dada, para el caso de incidencia normal sobre una interfase plana conductor-aire, como

$$R(\omega) = \begin{cases} 1; & \omega \leq \sqrt{4\pi f} & (15a) \\ \left[\frac{2\pi f}{\omega^2 - 2\pi f} \right]^2; & \omega \geq \sqrt{4\pi f} & (15b) \end{cases}$$

(ver Fig.6). A la frecuencia $\sqrt{4\pi f}$ que delimita la región de reflexión total ($R = 1$) con la de reflexión parcial ($R < 1$) se le conoce como la "frecuencia de plasma" ω_p . Como vemos, nuestro modelo de conductor (Ec. 14) nos predice que para frecuencias menores que $\omega_p = \sqrt{4\pi f}$, éste es un reflector perfecto (un espejo).

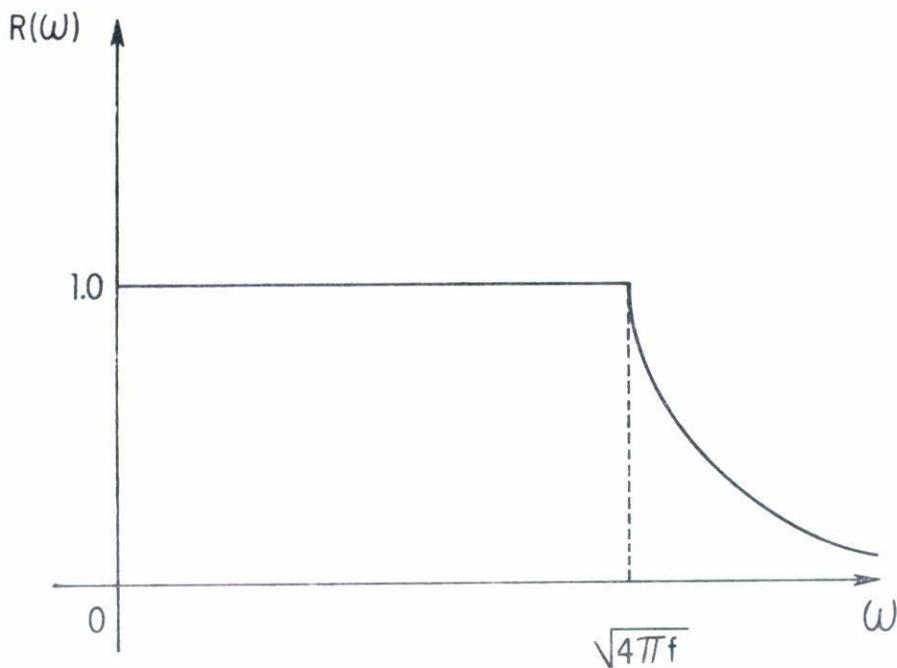


Fig.6 Reflectancia de un conductor perfecto como función de la frecuencia.

En este punto podemos ya introducirnos al cuarto concepto de la teoría del color: el receptor.

Como sabemos el receptor de la energía lumínica, en nuestro caso, es el ojo, y lo que nos preguntamos primero es ¿qué tipo de luz le llega al ojo?.

Hasta ahora nuestro proceso es el siguiente: una lámpara produce vibraciones del éter (o sea luz), caracterizadas por un espectro de radiación $I(\omega)$, que iluminan un cierto objeto. Este objeto refleja ahora dichas vibraciones. La intensidad de la luz reflejada relativa a la

intensidad incidente, a la que se le denomina reflectancia $R(\omega, \theta_i)$, depende de la frecuencia de la luz incidente ω a través de la permeabilidad eléctrica del objeto $\epsilon(\omega)$ y del ángulo de incidencia θ_i . Por tanto, el espectro de la luz que finalmente llega al ojo está dado por el producto

$$O(\omega, \theta_i) = I(\omega) \times R(\omega, \theta_i). \quad (16)$$

Ver Fig.7 donde, por simplicidad, estamos suponiendo reflexión especular sobre una interfase plana; es decir, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

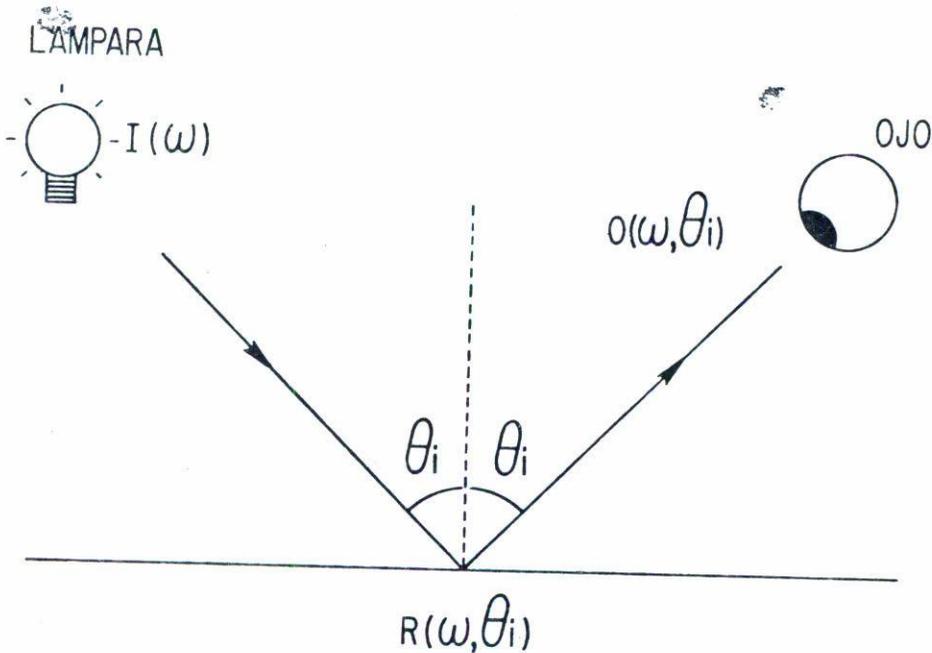


Fig.7 Proceso de reflexión especular. $I(\omega)$ representa el espectro de la luz incidente $R(\omega, \theta_i)$ la reflectancia a un ángulo de incidencia θ_i y $O(\omega, \theta_i)$ el producto $I(\omega) \times R(\omega, \theta_i)$

Tomemos como ejemplo el caso de incidencia normal sobre un conductor perfecto, el cual ilustramos en la Fig. 8 para dos espectros diferentes de radiación incidente utilizando la reflectancia $R(\omega)$ dada por la Ec. (15). En el primer caso (Fig.8a) el espectro de radiación incidente se refleja íntegramente mientras que en el segundo (Fig.8b) la "cola" de alta frecuencia ($\omega > \omega_p$) se ve fuertemente disminuida.

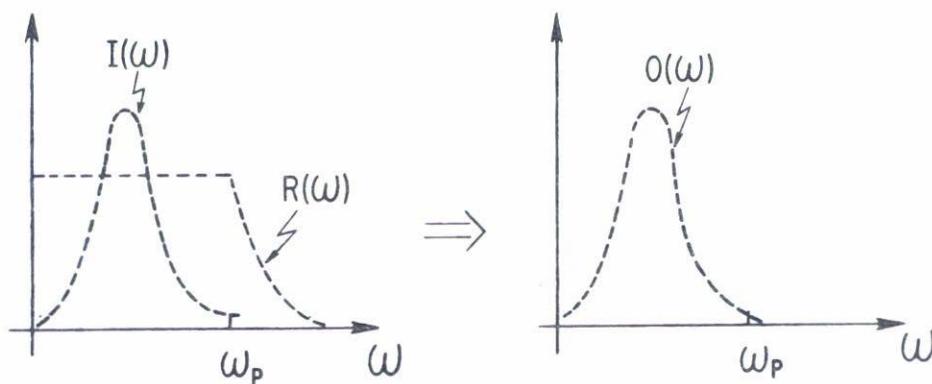


Fig.8a. El producto $O(\omega) = I(\omega) R(\omega)$.

Pero el ojo responde a la luz sólo en una estrecha banda de frecuencias denominada "luz visible", que se encuentra entre longitudes de onda de 4000 \AA (azul) - 7000 \AA (rojo) o equivalente a frecuencias correspondientes entre 1.8 eV (rojo) y 3.0 eV (azul). Por tanto, del espectro $O(\omega)$ que llega al receptor, las únicas frecuencias significativas son las del "visible". Por ejemplo, en el caso de los metales la frecuencia del plasma se encuentra, en general, en el ultravioleta. Este hecho nos conduce a la conclusión de que todo conductor perfecto descrito

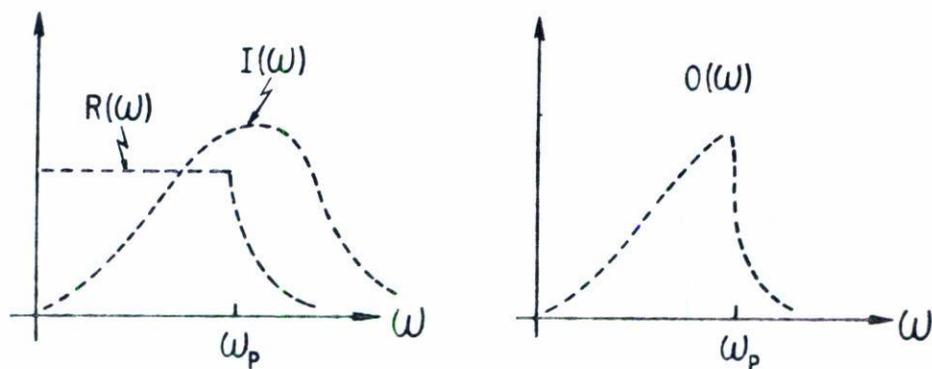


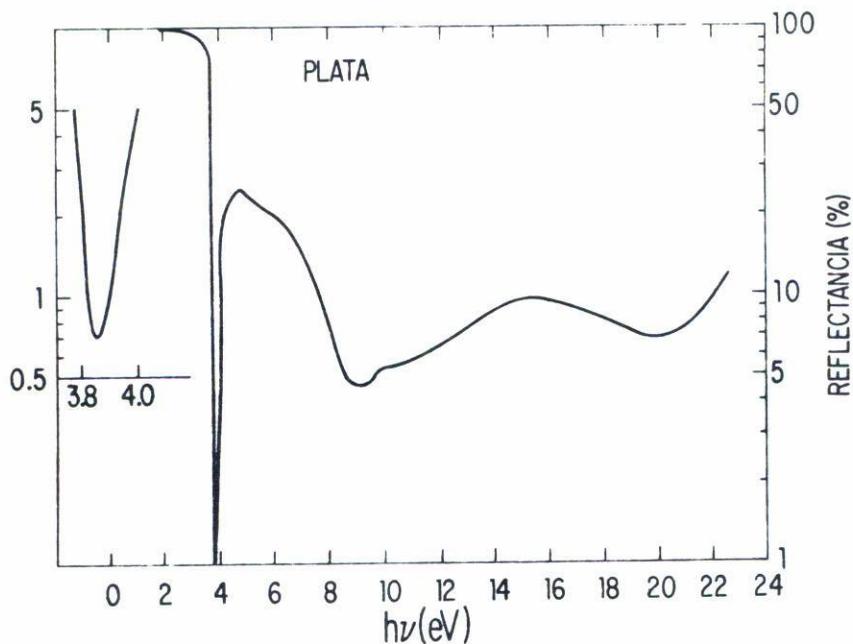
Fig.8b El producto $O(\omega) = I(\omega)R(\omega)$.

por la Ec.(14) se comportará siempre como un espejo, reflejando íntegramente cualquier espectro de radiación en el visible.

Sin embargo no todos los metales son espejos, el oro es amarillo, el cobre es rojizo ¿por qué?. Lo que sucede simplemente es que estos metales no son conductores perfectos y su comportamiento óptico no está bien descrito por la Ec. (15). En otras palabras, el modelo teórico propuesto (Ec.14) para el metal no es el correcto.

Por tanto, debemos cambiar nuestro modelo teórico por otro que se ajuste mejor a la experiencia. La experiencia estaría representada, en este caso, por las mediciones de la reflectancia $R(\omega)$ como función de la frecuencia con el fin de compararla con la Ec.(15). En la Fig.9 presentamos los resultados de Ehrenreich y Philipp (1962) para la reflectancia $R(\omega)$ del cobre y de la plata, a incidencia normal y en un intervalo

de frecuencias que cubre desde 1 hasta 25 ev.



(a)

Fig.9a. Reflectancia de la plata como función de la frecuencia (en eV) .

Como vemos las curvas de reflectancia son sumamente ricas en estructura y difieren, en mucho, de sus correspondientes al conductor perfecto (Fig.6). Si considerásemos a la plata y al cobre como conductores perfectos sus frecuencias del plasma serían 9.2 y 9.3 eV respectivamente, ambas en el ultravioleta lejano. Por tanto, el mínimo tan agudo de la reflectancia de la plata en 3.9 eV y la caída abrupta en el cobre en 2.1 eV no son fenómenos relacionados en forma alguna con el umbral que aparece en el modelo de conductor perfecto a la frecuencia del plasma.

La interpretación actual de las curvas mostradas en la Fig.9 requirió no sólo de un modelo más del metal, sino de un cambio muy profundo tanto sobre las leyes que gobiernan la dinámica de los electrones así como sobre el comportamiento del mismo éter electromagnético. Las

leyes que se utilizan ahora para "explicar" la dinámica electrónica son leyes de carácter estadístico y conforman una nueva mecánica, la mecánica cuántica. Por otra parte, los nuevos aspectos del éter electromagnético giran alrededor del concepto de "fotón", del que se dice representa ciertos aspectos corpusculares del éter.

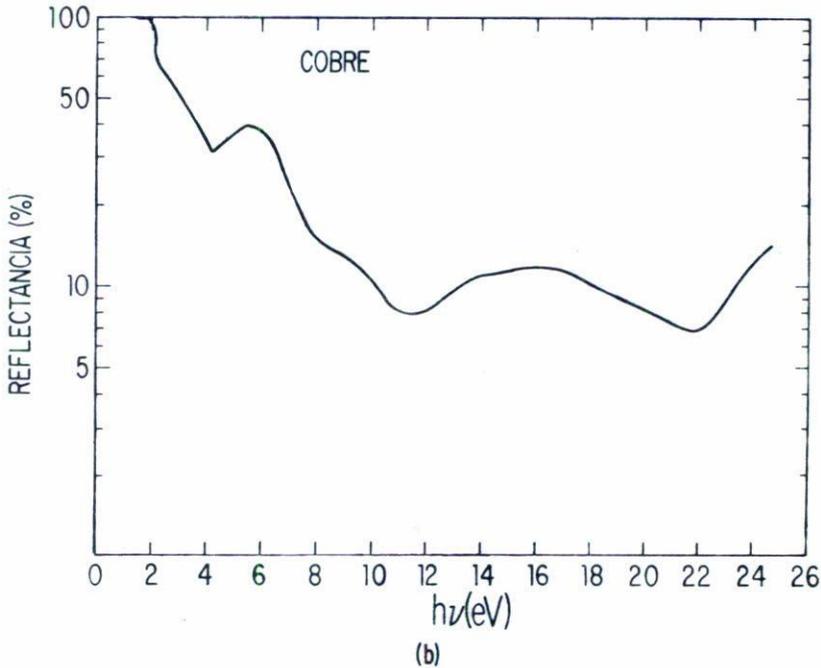


Fig.9b. Reflectancia del cobre como función de la frecuencia (en eV).

Pero antes de abordar estos aspectos del problema quisiera decir algo más sobre las curvas de la Fig.9. Veamos simplemente el eje de las abscisas. Las mediciones corren desde 1 eV hasta 23 eV, o sea, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta lejano. Detrás de este simple hecho se encuentra el desarrollo tecnológico avanzado de una sociedad a la que le reditua el producir y monocromatizar luz, de manera comercial y en una banda tan amplia de frecuencias para fines científicos. Esto sin mencionar todo el instrumental y bagaje teórico requeridos para detectar e interpretar las mediciones señaladas sobre el eje de las ordenadas.

De acuerdo a la mecánica cuántica y a la nueva teoría electromagnética, los electrones son capaces de absorber "fotones", siempre y cuando éstos tengan una energía tal, que corresponda a la diferencia de energías de sus estados dinámicos, caracterizados por un espectro discreto o "bandas de energía" como se les conoce en la teoría de sólidos. A este tipo de absorción se le denomina "transiciones de interbanda".

El cálculo de dichos espectros se realiza ahora por especialistas en "teoría de bandas", educados esmeradamente para este fin y que, con ayuda de las grandes computadoras electrónicas, trabajan bajo salario en institutos o universidades dedicadas a la investigación científica.

Como ejemplo de estos esfuerzos, mostramos en la Fig. 10, la "estructura de bandas" del cobre calculada en 1962 por B. Segall, trabajador científico de los General Electric Research Laboratories de los Estados Unidos, y publicada en el Physical Review, volumen 125, página 109.

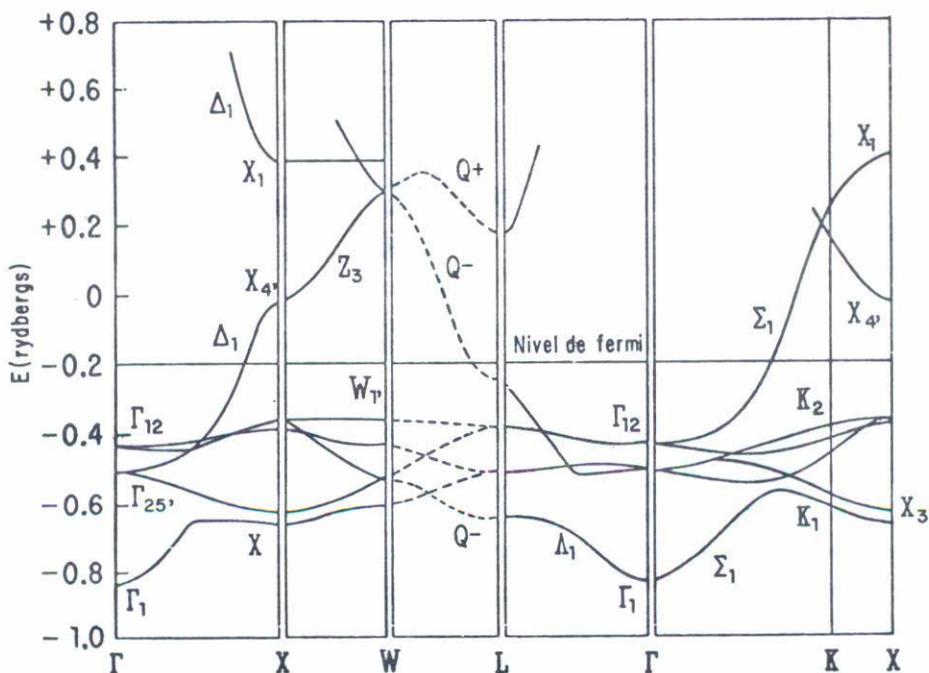


Fig. 10 Estructura de bandas del cobre calculada por B. Segall (Phys. Rev. 125, 109 (1962)).

En base a la estructura de bandas del cobre es posible "explicar" que la caída abrupta de su reflectancia a los 2.1 eV a la transición de interbandas de mínima energía. El mínimo agudo en la reflectancia de la plata a 3.9 eV recibe una interpretación análoga.

Cabe mencionar que la aplicación intensiva del método experimental en el estudio de las propiedades ópticas de metales como el cobre, la plata, el oro, está enclavada dentro de programas nacionales de impulso al desarrollo científico en los países industriales.

Cuando en estos países la ciencia se convierte, primero, en un factor decisivo del desarrollo tecnológico y después de la segunda Gran Guerra en un factor determinante en su "seguridad nacional", el Estado propicia y organiza una producción científica masiva, de corte industrial, coherente con su infra-estructura económica y cultural. Aparece entonces una división del trabajo científico cada vez más especializada que, conjuntamente con la construcción de las grandes máquinas y la creación de comités para la aprobación de proyectos, hacen que el trabajador científico pierda el control del curso de sus propias investigaciones y se mantenga al margen de los objetivos extra-científicos de su proyecto, alimentándose ideológicamente con tesis como las de "la ciencia por la ciencia"

La física del estado sólido es una nueva rama de la física que nace y se desarrolla como tal a partir del establecimiento de la mecánica cuántica a fines de la década de los veinte (~ 1927). Su desarrollo "va de la mano" con el desarrollo de la también nueva, industria electrónica y uno de sus éxitos mas connotados es la invención del transistor, por un grupo de físicos teóricos trabajando para un consorcio industrial; con lo cual el consorcio adquiere el "derecho" de explotar una nueva tecnología "de punta" y los teóricos los honores del "soñado" Premio Nóbel.

Un capítulo importante dentro de la física del estado sólido es el estudio de sus propiedades ópticas. Dicho estudio se subdivide, a su vez, en metales, aislantes y semiconductores. Como parte del estudio de las propiedades ópticas de los metales se encuentra la determinación experimental de su permeabilidad eléctrica $\epsilon(\omega)$, como función de la frecuencia, y su correspondiente interpretación teórica.

Estos estudios fueron realizados para el cobre y la plata por

H. Ehrenreich y H.K Phillip, trabajadores del General Research Laboratory de Schenectady, Nueva York y publicados en el *Physical Review*, volumen 128, páginas 1622-1629, en 1962. Estos trabajadores, partiendo de las mediciones de la reflectancia mostradas en la Fig.9, determinaron la parte real $\epsilon_1(\omega)$ y la parte imaginaria $\epsilon_2(\omega)$ de la permeabilidad eléctrica (ver Fig.11) y en el caso del cobre, las interpretaron utilizando el cálculo de "estructura de bandas" mostrado en la Fig. 10. La aparición de una parte imaginaria ϵ_2 en la permeabilidad eléctrica está relacionada con los procesos de disipación no radiativa de energía. La energía disipada por estos canales no radiativos es proporcional a $\epsilon_2/(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)$, a la que se le conoce como "función de disipación", y se muestra en la Fig. 12.

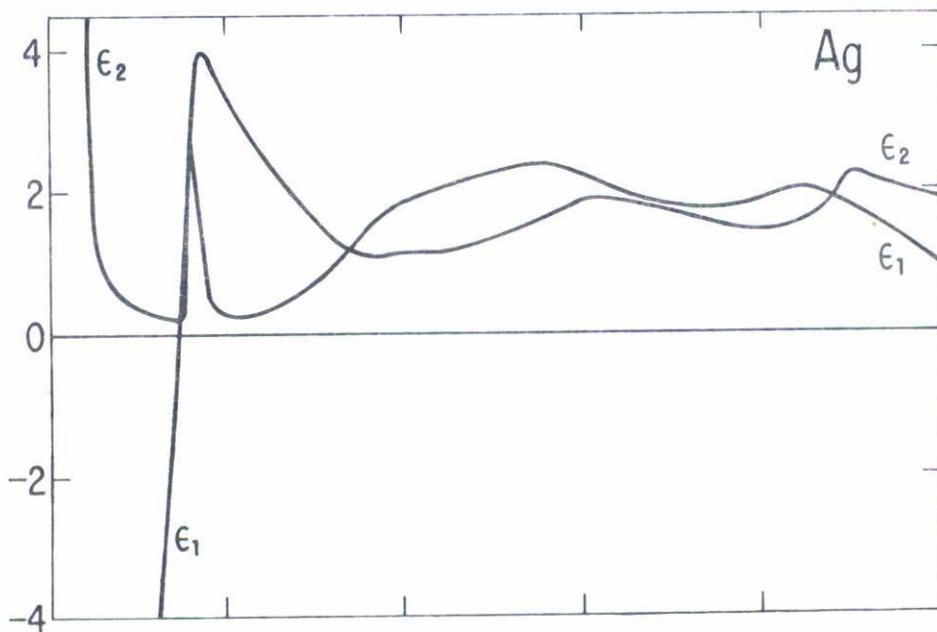


Fig.11a. Parte real ϵ_1 y parte imaginaria ϵ_2 de la permeabilidad eléctrica de la plata como función de la frecuencia.

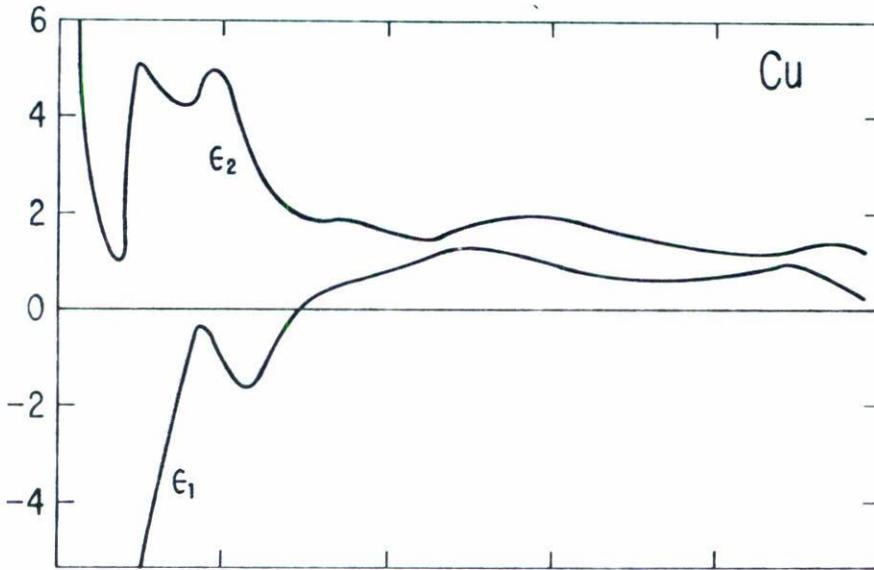


Fig. 11b. Parte real ϵ_1 y parte imaginaria ϵ_2 de la permeabilidad eléctrica del cobre como función de la frecuencia.

Como muestra la Fig. 11, la parte real (parte reactiva) de la permeabilidad eléctrica es muy distinta a la de un conductor perfecto (ver Fig. 5) ya que contiene una riqueza mucho mayor en su estructura, proveniente del comportamiento "cuántico" de los electrones dentro de un cristal metálico.

Este comportamiento de la parte real $\epsilon_1(\omega)$ así como los efectos de disipación de energía $\epsilon_2/(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)$ hacen que en el "visible" la reflectancia $R(\omega)$, tanto del cobre como de la plata, no sea perfecta ($R = 1$) y que por tanto estos metales no se comporten como espejos perfectos; es decir que reflejen exactamente el mismo espectro luminoso con el que son iluminados.

De la Fig. 12a se puede ver claramente que para la plata el pri-

mer gran "pico" de absorción se encuentra fuera del visible (~ 3.8 eV), por lo que la reflectancia en el "visible" va a ser poco afectada y el espectro reflejado va a ser muy similar al espectro incidente con una ligera disminución en la composición de su intensidad en el azul. Como veremos mas adelante, ésto significa que si se ilumina plata con un espectro $I(\omega)$ de luz "blanca" ésta "se va a ver" un poco mas gris. Por otra parte, de la Fig. 12b se ve que el cobre comienza a absorber en el visible (alrededor del amarillo) y la absorción aumenta conforme la frecuencia crece, lo que implica una disminución correspondiente de la reflectancia (Fig.9b). Por tanto, si se ilumina cobre con un espectro de luz "blanca", en el espectro de la luz reflejada la composición de intensidades en la zona de absorción es disminuída, lo cual hace que éste "se vea" rojizo.

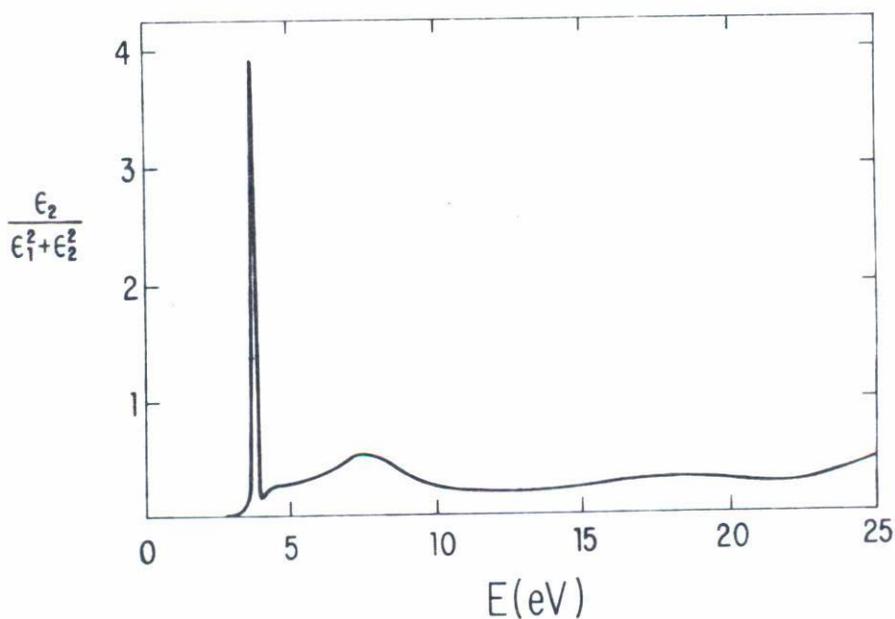


Fig.12a. Función de disipación de la plata como función de la frecuencia.

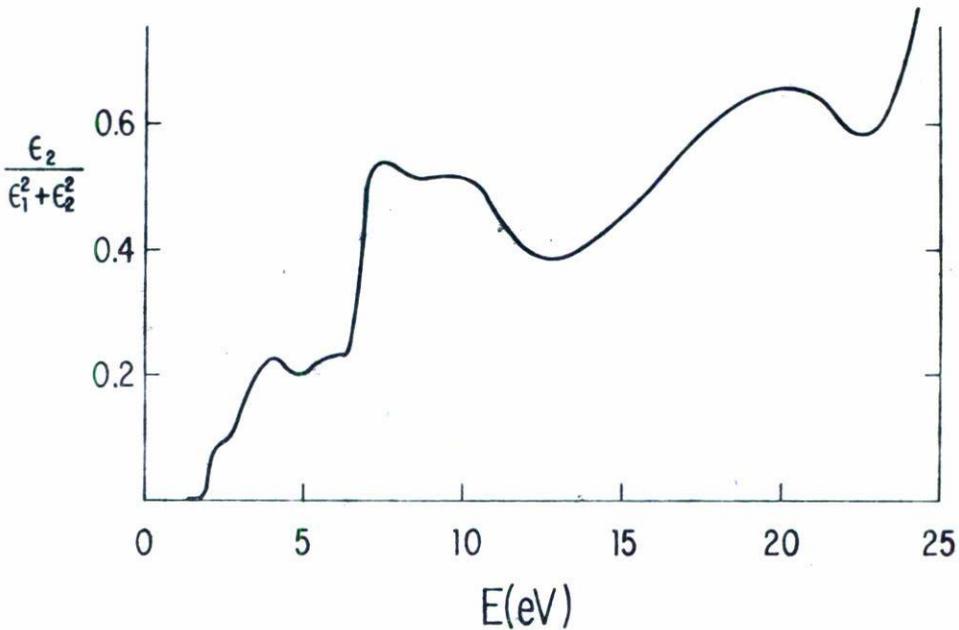


Fig.12b. Función de disipación del cobre como función de la frecuencia.

Es muy claro que en el párrafo anterior aparece un nuevo elemento de análisis descrito por las frases "se va a ver" y "se vea", es decir, hemos llegado al punto de preguntarnos ¿qué queremos decir por "ver"?

Hasta ahora hemos visto que el espectro de la luz que llega al ojo está dado por

$$O(\omega) = I(\omega) R(\omega) , \quad (17)$$

donde $I(\omega)$ es el espectro de la radiación incidente, propiedad de la "lámpara" que ilumina y $R(\omega)$ es la reflectancia, propiedad del objeto iluminado. Pero ¿cómo responde el ojo a esa luz con espectro $O(\omega)$? Este es ya un problema fisiológico y psicológico, dado que la respuesta a esta pregunta estaría basada, de acuerdo a la metodología y a los conceptos dominantes en la actualidad, en las características foto-químicas de los te-

jididos foto-sensibles del ojo y en su proceso de transmisión, integración e interpretación en el cerebro.

Actualmente se acepta que las sensaciones producidas por luz monocromática de distinta frecuencia son interpretadas en el cerebro como "colores" distintos; a éstos se les llama "colores espectrales puros".

Por otra parte las sensaciones producidas por luz compuesta por un espectro continuo de frecuencias $O(\omega)$ se interpretan también como "colores"; éstos característicos también de cada espectro. Así la luz que viene del sol y que conocemos como "luz blanca" tiene un espectro muy parecido al de la luz radiada en equilibrio termodinámico a una temperatura de 5700°C ; temperatura que corresponde a la superficie solar. Espectros parecidos al de la luz solar pero con una mayor composición en el rojo o en el amarillo se interpretan como blancos mas "rojizos" o más "amarillentos" respectivamente.

Sin embargo dos espectros muy diferentes entre sí pueden dar lugar a la misma sensación de "color". Así, un espectro con "picos" en el amarillo y en el azul da lugar a la misma sensación de "color verde" que un espectro centrado en el verde. Esto quiere decir que las sensaciones causadas por luz amarilla y por luz azul, por separado, producen una sensación diferente cuando el ojo las recibe simultáneamente y dan lugar a la misma sensación que se produciría si el ojo recibiera luz verde. (Fig.13)

La forma en que el ojo "combina" distintas sensaciones ha dado lugar a una diversidad de modelos teóricos. Por ejemplo, el modelo de Grassmann (1853) se basa en la existencia de 3 sensaciones primarias o fundamentales que producen lo que él llama "colores primarios". Su modelo es empírico y se basa en el principio de que la sensación de cualquier "color" se puede obtener como una superposición de las tres sensaciones fundamentales. Por otra parte los colores primarios no se pueden obtener como combinación de los otros dos. Según Grassmann los colores primarios son el rojo, el verde, el azul; por tanto si $[C]$ es la sensación del color y $[R]$, $[V]$ y $[A]$ son las sensaciones producidas por cada una de las primarias, podemos escribir la siguiente ecuación:

$$c [C] = r [R] + v [V] + a [A] \quad (18)$$

donde c , r , v y a son proporcionales a la intensidad (flujo de energía

luminica) de cada componente. Además la equivalencia (18) subsiste si se multiplica ambos miembros de la ecuación por el mismo factor; es decir que la igualdad de color depende sólo de la proporción de los primarios y no de su intensidad absoluta.

En 1931 la Commission International de Eclairage (CIE) adopta otro modelo tri-estímulo basado en la selección de 3 sensaciones fundamentales correspondientes a luminosidad, tonalidad y saturación; todos ellos conceptos definidos operacionalmente de acuerdo a análisis estadísticos de la respuesta de un conjunto de observadores. A partir de entonces existen investigaciones encaminadas a modificar este modelo en base a transformaciones matemáticas que simplifiquen el problema de la correlación entre la percepción de los observadores y lo que miden las fórmulas.

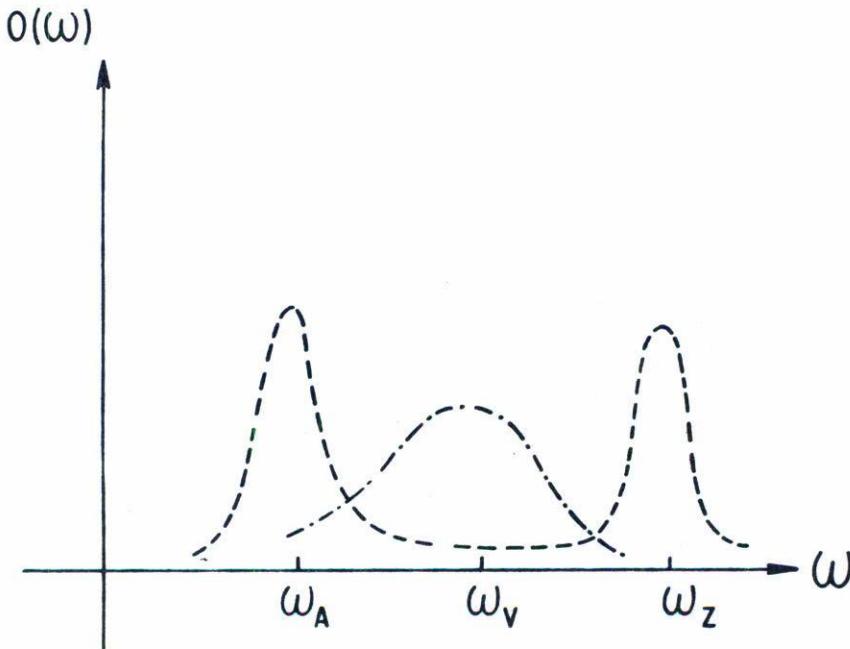


Fig.13 Espectro con "picos" en el amarillo ω_A y en el azul ω_Z (línea continua).
Espectro con "pico en el verde (línea quebrada) .

Actualmente la "ciencia del color" es ya una parte de la óptica moderna y los investigadores "de Instituto" dedicados a ella colaboran en las revistas y participan en los congresos de las sociedades de óptica. Además, industrias que, como la textil, requieren de una uniformidad de color en las mercancías que producen, han estimulado el desarrollo de la colorimetría, ciencia dedicada a estudiar y medir la percepción de diferencias de color.

Por ahora no quiero ahondar más en los aspectos psico-físicos de la "ciencia del color", lo cual nos llevaría a extendernos demasiado, sino mas bien quisiera resumir las tesis de este ensayo partiendo de la frase inicial "el oro es amarillo" y dada la pregunta ¿por qué el oro es amarillo? podemos entonces decir:

De acuerdo a una ciencia basada en el método experimental, en un tiempo revolucionaria y actualmente estimulada por el Estado como factor importante en su reproducción, el color es un fenómeno psico-físico complejo cuya comprensión requiere de cuatro conceptos fundamentales: luz, radiador, reflector y receptor (el ojo). Cada uno de estos conceptos requiere de modelos teóricos, que surgen del desarrollo de la ciencia experimental enclavada en un entorno socio-cultural dado. Por ejemplo, la luz es considerada como vibraciones de naturaleza desconocida, que en un tiempo se llamó éter y hoy se llaman ondas electromagnéticas, producidas (radiadas) por las "vibraciones" de partículas cargadas que radían luz con un "espectro de radiación" característico de la forma en que son excitadas y que al incidir sobre el metal, al que se supone también compuesto íntegramente de partículas cargadas, ponen a "vibrar" a dichas partículas, las cuales a su vez re-radían ondas electromagnéticas de acuerdo a leyes de carácter probabilístico (mecánica cuántica), cuyos fundamentos no se encuentran todavía bien establecidos, y cuya re-radiación se compone en lo que se llama la onda reflejada. Dicha onda, cuya composición espectral está determinada por las características del radiador y del reflector, produce, al llegar al ojo, una sensación que es interpretada en el cerebro como "color". Además, con los modelos actuales es posible precisar qué tipo de fenómenos a nivel microscópico son los que causan la absorción característica de un metal dado y del espectro

reflejado predecir el color asociado a la sensación que producirán en el ojo.

Obviamente, el desarrollo y la profundización de estos conceptos está actualmente modulada por las necesidades de sociedades altamente industrializadas que han organizado la producción científica dentro de un marco institucional que coadyuve a su estabilidad y reproducción.