

¿QUÉ ES LA LUZ? : HISTORIA DE LAS TEORÍAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

(Publicado por primera vez en “Revista Universitaria- UABC No. 50, abril-junio 2005)

Guadalupe Lydia Alvarez Camacho
Instituto de Ingeniería, UABC

Jesús M. Siqueiros Beltrones
Centro de Ciencias de la Materia Condensada, UNAM

Ilustraciones: Ernesto Israel Santillán Anguiano

Los griegos preguntan ¿cómo es que podemos ver?

¿Cómo es que podemos ver? Esta es una pregunta interesante para todos los seres humanos. Hoy en día, para contestarla, tenemos la fortuna de disponer de información acumulada a través de miles de años. Allá por 500 A.C., en tiempos del apogeo de la cultura griega, esto no era así. En aquel entonces, los primeros filósofos trataban de encontrar una respuesta para esa pregunta, buscándola por sí mismos. Aunque sus respuestas no resultan satisfactorias en nuestro tiempo, hay que reconocerles el gran mérito de haber sido quienes iniciaron la búsqueda.

El sentido de la vista tiene en común con el tacto que nos permite conocer la forma de los objetos, pero tiene la ventaja de que puede hacerlo aún habiendo distancia de por medio. Los filósofos griegos trataron de explicar cómo era que la vista conseguía salvar esta distancia. Empédocles pensaba que la vista no era más que tocar los objetos con una “mano” muy larga. Él creía que de los ojos salían emanaciones que hacían contacto con los objetos y recogían su forma. Esta teoría se llama *extramisión*. Leucipo, en cambio creía que el acercamiento ocurría en sentido contrario. Los objetos emitían “algo” que contenía su forma y color, y que incidía sobre los ojos, los cuales no hacían más que captarlo. Esta teoría se llama *intromisión*.

Ya que sin luz no podemos ver, se suponía que estas emanaciones no podían existir en la oscuridad pero ni Empédocles, ni Leucipo pudieron decir nada sobre su naturaleza. Sin embargo, había algo completamente claro: las emanaciones o “rayos” viajan en línea recta. Esto hace que su propagación pueda estudiarse usando las leyes de la geometría. No es de extrañarse que Euclides, el padre de la geometría tradicional o *euclidiana*, escribiera un libro sobre el tema, en el que establece las bases de la perspectiva, técnica que aún usan hoy en día dibujantes y pintores en todo el mundo.

Fue muchos años después cuando se resolvió el añejo debate de extramisión contra intromisión. El encargado de esto fue Alhazen, médico árabe nacido en lo que hoy es Irak. Tomando entre otras cosas el hecho de que mirar directamente al sol lastima los ojos, dedujo acertadamente que los ojos son receptores y no emisores. También acertó al explicar que un objeto recibe luz del ambiente y la esparce en todas direcciones. En ausencia de obstáculos, esta luz esparcida se propaga hacia el ojo y le permite percibir el objeto. Si no hay luz, los objetos no pueden esparcir nada y es por eso que no los podemos ver.

Newton presenta sus leyes

A finales del siglo XVII, Newton enunció tres leyes que revolucionarían la física. La primera ley de Newton o de la *inercia* establece que en ausencia de fuerzas aplicadas, un cuerpo en reposo permanecerá en reposo y uno en movimiento rectilíneo uniforme, seguirá así permanentemente. Esto contradice el concepto intuitivo, consagrado por Aristóteles de que los cuerpos tienen siempre tendencia al reposo y que es necesario aplicarles una fuerza para mantenerlos en movimiento.



Figura 1: La propagación rectilínea de la luz puede analizarse utilizando leyes geométricas simples. Es por esto que, aunque perfeccionada durante el Renacimiento, fue Euclides quien sentó las bases de la perspectiva.

La segunda ley nos dice cómo un cuerpo de una *masa* determinada cambia su estado de movimiento en respuesta a cierta fuerza aplicada. Ya que a mayor masa hay mayor tendencia del cuerpo a seguir en su estado original, se puede decir que la masa es la medida de su inercia. La tercera ley de Newton, o ley de acción y reacción, dice que las fuerzas siempre vienen en pares. Si A ejerce una fuerza en B, necesariamente habrá una fuerza de reacción de B sobre A.

Además de estas tres elegantes leyes, a Newton también le debemos la ley de la Gravitación Universal, el Cálculo y una amplia investigación experimental sobre la luz. Por todo esto, se considera merecidamente a Isaac Newton como el padre de la física. Sin embargo, sus teorías sobre la luz, nunca tuvieron el mismo nivel que el resto de su obra. A pesar de esto, en muchos centros de estudio, la lectura acrítica de los textos de Aristóteles fue reemplazada por la lectura acrítica de los textos de Newton. Este hecho desempeña un papel significativo en la historia que contaremos a continuación.

Newton dice: la luz está formada por partículas

Las leyes de Newton consiguieron explicar tantos fenómenos, que fue fácil exagerar y pensar que podían explicarlos todos. En este contexto, Isaac Newton explicó la naturaleza de la luz,

considerando que está formada de pequeñas pelotitas, en lo que se conoce como teoría *corpuscular* o de emisión. El movimiento de estas pelotitas podía explicarse por medio de las leyes de Newton. Es verdad que esta teoría da respuestas a muchas preguntas ¿Por qué la luz viaja en línea recta? Porque así es como toda partícula viaja de acuerdo a la ley de la inercia. ¿Porqué la luz se refleja en algunas superficies? Porque las pelotitas de que está formada, rebotan.

Explicar la refracción es un poco más complicado. Sin embargo, Newton supuso que la velocidad de las pelotitas de luz aumenta bruscamente al pasar de un medio menos denso a otro más denso. El ángulo de refracción calculado de este modo, coincide perfectamente con el encontrado experimentalmente, lo que es más que satisfactorio. En realidad, la suposición de que la velocidad de la luz es mayor en los materiales más densos es falsa. Es cierto que la velocidad de la luz cambia al pasar a un medio más denso, pero su cambio consiste en una reducción. No obstante, en aquel entonces nadie lo sabía, ya que aún no era posible medir la velocidad de la luz.

Para Newton, la intensidad de la luz correspondía con la cantidad de pelotitas que cruzan un punto determinado por unidad de tiempo. La luz demasiado intensa es dañina porque los ojos no pueden soportar la energía que la pelotitas liberan al golpearlos. Por otra parte, la luz de diferentes colores consiste en pelotitas de diferentes tamaños, las más pequeñas correspondientes al color violeta y las más grandes al color rojo. Tiempo después, los seguidores de Newton explicaron la polarización suponiendo que las pelotitas no son redondas sino que tienen cierta forma geométrica y que un filtro polarizador sólo permite pasar a las que tienen una orientación determinada.



Figura 2: Cuenta la leyenda que una manzana cayendo de un árbol fue la fuente de inspiración de Isaac Newton. Quizás también pensaba en manzanas cuando planteó que la luz está formada de partículas. Sin embargo, su idea de que la intensidad de la luz proyectada sobre una pantalla depende de cuantas partículas la golpean por unidad de tiempo, no consigue explicar las franjas que aparecen en el experimento de Young.

Sin embargo, la difracción seguía resistiendo las explicaciones basadas en la teoría corpuscular. Si la luz estuviera hecha de pelotitas que viajan en línea recta, un obstáculo debería solamente detener una parte de éstas y la proyección de la luz sobre una pantalla consistiría simplemente en una sombra geométrica, como ocurre efectivamente para obstáculos grandes. Sin embargo, no había forma de explicar porqué para obstáculos pequeños la luz se desvía tan notoriamente de su

trayectoria rectilínea, ni porqué la luz proyecta sobre una pantalla un complejo patrón de difracción.

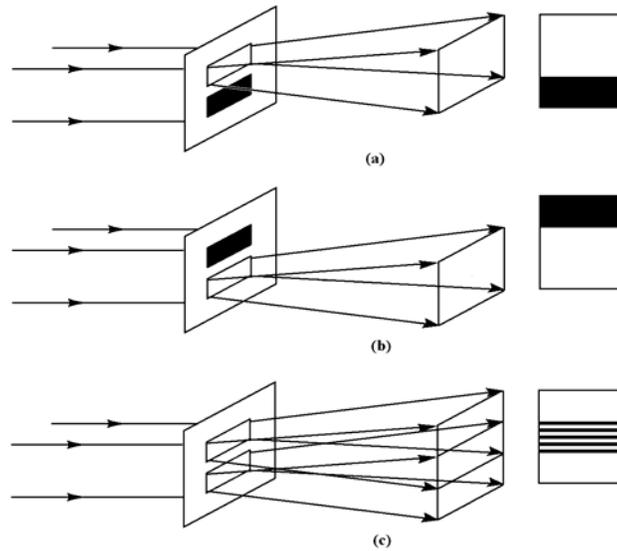


Figura 3: Experimento de Young. ¿Por qué en la región iluminada por los dos haces de luz, existen zonas completamente oscuras?

En particular, lo que resultaba especialmente incómodo era esa serie de manchas iluminadas y oscuras que aparecían en órdenes tan específicos. Un experimento realizado en 1803 por Thomas Young y que se esquematiza en la figura 3, servirá para explicar mejor el origen de esta incomodidad. En este experimento se hace pasar un haz de luz a través de dos rendijas para así crear dos haces que puedan proyectarse sobre una pantalla. Es importante que las rendijas sean muy delgadas porque se requiere que la luz se desvíe lo suficiente como para iluminar más allá de su sombra geométrica. En la figura 3a y 3b puede verse que si se tapa una de las rendijas, la otra puede iluminar por sí sola más de la mitad de la pantalla. Cuando las dos rendijas se destapan, los dos haces coinciden en la región central y hacen aparecer una serie de franjas iluminadas y oscuras alternantes, como se muestra en la figura 3c.

¿Cómo explicar la aparición de estas franjas? Si la luz estuviera formada de pelotitas, cuando dos haces se encontraran sobre una pantalla, la región de traslape estaría siendo golpeada por el doble de pelotitas y por tanto su iluminación presentaría el doble de la intensidad que la de las otras regiones. Sin embargo, aunque en esta región existen zonas muy bien iluminadas, también existen otras completamente oscuras. ¿Cómo puede ser posible que el encuentro entre dos haces de luz, pueda dar lugar a oscuridad?

Newton hizo varios intentos de contestar a esta pregunta utilizando la teoría corpuscular pero nunca consiguió hacerlo en forma sencilla y elegante. A pesar de esto, su prestigio como padre de la física era tanto, que hubo muchos dispuestos a considerar como verdades sagradas sus más torpes explicaciones. De hecho, el mismo Young podía explicar los resultados de su experimento en una forma mucho más sencilla. Sin embargo, la explicación requería abandonar completamente la idea de las pelotitas y considerar a la luz como una onda.

¿Qué es una onda?

Supongamos que estamos frente a un estanque en un día sin viento; el agua de la superficie, en calma, está perfectamente horizontal. El arrojar una piedra cambiará esta situación. En el punto

en donde la piedra cae, el agua se aparta de su posición de equilibrio. Después de un rato, el agua en este punto regresa a la normalidad, pero ahora es el agua a su alrededor la que está perturbada. A esta *perturbación* del agua que se propaga en todas direcciones le llamamos onda. Si consideramos que el eje de las abscisas es el nivel del agua en equilibrio, la figura 4 podría ser un esquema bastante realista de una de estas ondas. Un punto en donde el agua alcanza su altura máxima es una *cresta* y uno donde alcanza su altura mínima es un *valle*. La distancia máxima que la altura del agua puede alejarse de su posición de equilibrio se llama *amplitud*. La distancia entre cresta y cresta o entre valle y valle se llama *longitud de onda*. Es importante destacar que aunque la onda se propague en dirección horizontal, el agua no se mueve nunca en esta dirección. El agua se mueve hacia arriba o hacia abajo cuando sale de su posición de equilibrio, pero una vez pasada la perturbación regresa a su posición original. El agua es sólo el *medio* a través del cual viaja la onda.

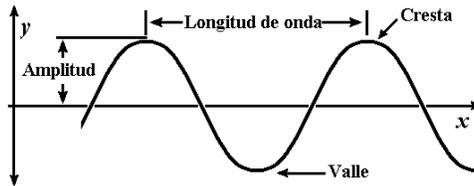


Figura 4: Esquema de una onda, mostrando sus principales parámetros. La amplitud es la desviación máxima del valor de equilibrio. La longitud de onda es la distancia entre dos puntos equivalentes.

Esto puede explicarse mejor por medio de la figura 5, en donde podemos ver como una perturbación se propaga de izquierda a derecha, a través de una cadena de partículas. La perturbación provoca que una partícula se separe de su posición de equilibrio, en dirección vertical en (a) y en dirección horizontal en (b). Las partículas no tienen movimiento neto, ya que son sólo el medio a través del cual se propaga la perturbación: después de que ésta pasa, regresan a su posición de equilibrio.

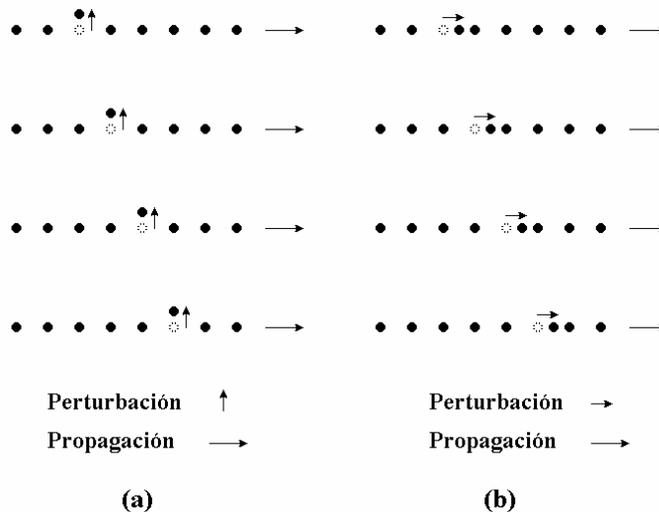


Figura 5: Dos diferentes formas en que se puede propagar una perturbación a través de una cadena de partículas (a) Transversal: la dirección de la perturbación y la dirección de la propagación hacen un ángulo de 90°. (b) Longitudinal: La perturbación y la propagación se mueven en la misma dirección.

Ya que el movimiento de la partícula y el de la perturbación son dos cosas diferentes, las ondas se pueden clasificar en dos tipos. Si la dirección del movimiento de la partícula y la dirección en que la perturbación se propaga son diferentes, como ocurre en (a) tenemos una *onda transversal*. Las ondas en un estanque son transversales, ya que la perturbación hace que el agua suba y baje, mientras la onda se propaga horizontalmente. Por otra parte, si la dirección del movimiento de la partícula y la dirección de la propagación son la misma, como ocurre en (b), tenemos una *onda longitudinal*. La figura 4 puede representar sin ningún cambio a cualquier onda transversal, y con un poco de imaginación puede usarse también para representar una onda longitudinal.

La suma de ondas presenta algunos fenómenos interesantes. Cuando dos ondas se encuentran, no necesariamente coinciden las crestas de una con las crestas de la otra. Si lo hacen, se dice que están *en fase*. Si dos ondas de la misma amplitud se encuentran en fase, el resultado es una onda con una amplitud dos veces mayor que la original. A esto se le llama *interferencia constructiva*. Si no existe esta coincidencia se dice que las ondas están fuera de fase. En particular, si la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, se dice que las ondas están *en contrafase*. Cuando dos ondas de la misma amplitud se encuentran en contrafase, se cancelan una con otra. A esto se le llama *interferencia destructiva*.

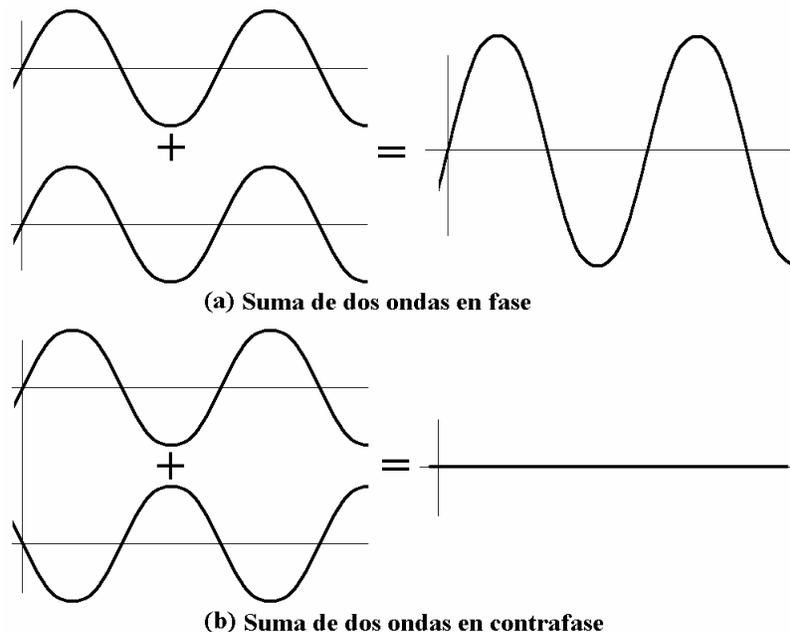


Figura 6: Interferencia entre dos ondas. (a) Interferencia constructiva de dos ondas en fase. (b) Interferencia destructiva de dos ondas en contrafase.

El sonido es una onda longitudinal de presión del aire. En un cuarto silencioso, la presión del aire sería constante y tendría un cierto valor de equilibrio. Si suena una campana, su efecto consiste en perturbar el aire próximo, haciendo que su presión tome valores mayores o menores que la presión en equilibrio. Esta perturbación se propaga a través del aire hasta nuestro oído, en donde finalmente los cambios de presión son detectados por nuestro tímpano y enviados al cerebro para ser procesados. Si no hay nada que perturbar, como ocurre en el espacio vacío, el sonido no se puede propagar.

Huygens dice: la luz está hecha de ondas

En la época de los griegos, las dos principales teorías estaban basadas en una analogía entre vista y tacto. Muchos siglos después, la analogía entre vista y oído motivó muchas reflexiones. La vista y el oído tienen en común que ambos funcionan a larga distancia. La naturaleza ondulatoria del sonido ya había sido bien establecida. Era inevitable preguntarse ¿no será la luz también una onda? Un holandés llamado Christian Huygens contestó afirmativamente a esta pregunta.

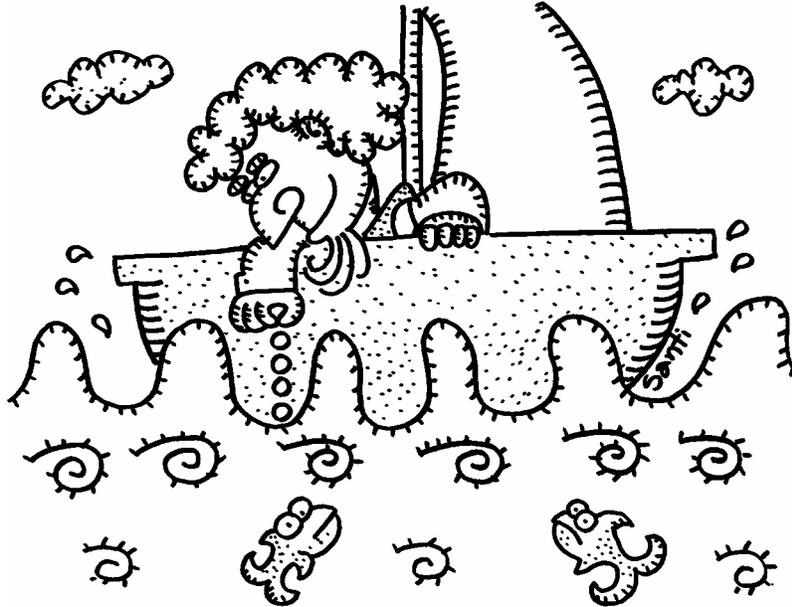


Figura 7: Las ondulaciones en el agua son el ejemplo más típico de una onda. Al considerar la luz como una onda, Christian Huygens pudo explicar las franjas en el experimento de Young como consecuencia de interferencia constructiva y destructiva entre luz que viaja por trayectorias diferentes.

En la *teoría ondulatoria* de Huygens, la intensidad de la luz se relaciona con la amplitud de la onda mientras que los diferentes colores corresponden a valores diferentes de las longitudes de onda: el color rojo tiene la longitud de onda más larga, mientras que el color violeta tiene la más corta. Según el *principio de Huygens*, cuando la luz se encuentra con un obstáculo, cada punto de éste se convierte en una nueva fuente de onditas que se propagan en todas direcciones, lo que explica sin problemas la difracción. Estas onditas interfieren entre sí, dando lugar a direcciones de propagación preferenciales, como las que ocurren en los fenómenos de reflexión y refracción. Las franjas que aparecen en el experimento de Young pueden explicarse directamente como consecuencia de interferencia constructiva y destructiva entre los dos haces de luz. Del mismo modo, las regiones iluminadas y oscuras en un patrón de difracción, se explican como consecuencia de interferencia entre rayos difractados en diferentes direcciones. Más importante, el principio de Huygens permite calcular, con extremada precisión, los patrones de difracción esperados para diferentes obstáculos.

En resumen, tenemos que la teoría ondulatoria puede explicar propiedades de la luz como la intensidad y el color y fenómenos como la reflexión, la refracción, al igual que lo hace la teoría corpuscular. Pero además, la teoría ondulatoria puede explicar más que satisfactoriamente la difracción, cosa que la teoría corpuscular no puede. A pesar la evidente ventaja, la teoría ondulatoria fue recibida con recelo. Por una parte estaba el gran prestigio de Isaac Newton, pero por otra, es verdad que la teoría tenía varios puntos flacos. La analogía entre sonido y luz, que

fue la principal impulsora de la teoría, es útil también para señalar sus problemas. Si la luz es una onda, ¿por qué no puede sacarle la vuelta a los obstáculos como lo hace el sonido? Además, si el sonido no presenta polarización ¿por qué la luz sí? Por último, si se coloca una campana dentro de un recipiente transparente al vacío, no podemos oír el sonido de la campana, pero sí podemos verla. ¿Por qué el sonido no puede propagarse en el vacío mientras que la luz sí puede?

El principio de Huygens puede explicar esto sin problemas, ya que predice que la difracción sólo será perceptible cuando las dimensiones del obstáculo sean similares a la longitud de onda. La longitud de onda de la luz es muy pequeña en comparación con los objetos cotidianos, por lo que en nuestra vida diaria es muy difícil que la percibamos y podemos considerar por tanto, que la luz viaja en línea recta. En cambio, la longitud de onda del sonido es mucho más grande, por lo que la difracción sí puede percibirse y estas porciones difractadas nos permiten escuchar a pesar de no estar frente a la fuente de sonido o de que se nos atravesase algún obstáculo.

El hecho de que el sonido no presente polarización y la luz sí, también tiene una explicación simple. El sonido es una onda longitudinal y si se propaga en cierta dirección, esa será exactamente la dirección de la perturbación. Por otra parte, para una onda transversal, la perturbación puede ocurrir en cualquier dirección perpendicular a la de propagación. Hay infinitas direcciones en que esto puede cumplirse. Es de esperarse que en un grupo de ondas transversales se encuentren perturbaciones orientadas aleatoriamente en todas las direcciones posibles. El paso por un filtro polarizador seleccionaría aquellas ondas cuyas perturbaciones se mueven en una dirección específica. Si consideramos que la luz está formada por ondas transversales, podemos explicar porqué presenta polarización, lo que para el sonido, que es una onda longitudinal, sería imposible.

La última de las preguntas es sin duda la más difícil. Ya mencionamos que el sonido es una perturbación de la presión del aire. Si la luz es una onda y puede viajar en el vacío, ¿qué es exactamente lo que perturba? Una perturbación no puede existir si no hay nada que perturbar, así que se supuso que el vacío absoluto no existe y que todo el universo se encuentra lleno de una sustancia infinitamente más ligera que el aire a la que se llamó *éter*. La idea de que una onda pudiera propagarse a través del espacio vacío se consideraba tan descabellada que, a pesar de que no haber ninguna prueba, la existencia del éter se consideraba incuestionable. Sin embargo, había más sorpresas esperando.

El concepto de campo

El descubrimiento de la electricidad fue un momento muy importante en la historia de la física, al igual que en la historia de la humanidad. La materia tiene una propiedad llamada *carga eléctrica*, que puede ser positiva o negativa. La fórmula es muy conocida hoy en día: cargas iguales se repelen, cargas opuestas se atraen. El descubrimiento de que el magnetismo es generado por cargas en movimiento, lo unificó con la electricidad en lo que ahora se conoce como *electromagnetismo*. A pesar del escepticismo inicial, el electromagnetismo logró tener un potencial tecnológico casi inagotable. La vida moderna no merecería tal nombre sin la energía eléctrica que todos tenemos al alcance del enchufe.

El conocimiento del mundo que nos rodea, también recibió un impulso gigantesco por parte del electromagnetismo. Un nuevo concepto que parecía cuestión de filosofía se reveló como una idea poderosísima. Para entender mejor esto, supongamos que en un punto A tenemos una carga positiva, mientras que en el punto B tenemos otra. Las leyes del electromagnetismo

dicen que habrá una fuerza de repulsión entre ellas. Ahora retiremos la segunda carga y mantengamos la que está en el punto A. ¿Qué hay en el punto B? Ya que no hay carga en B, no habrá fuerza entre dos cargas. Pero si *hubiera* una carga en B, entonces la fuerza de repulsión aparecería sin demora. Ese “si hubiera... entonces”, ¿existe sólo en nuestra mente o en verdad hay algo en B que se manifiesta solamente cuando aparece una carga? La diferencia entre “existe una fuerza” y “si hubiera una carga, existiría una fuerza” es radical. A la mera posibilidad de que en un punto determinado, una “carga de prueba” sufriera una fuerza, Michael Faraday la llamó *campo*.



Figura 8: Algunos creen que filosofar es sinónimo de perder el tiempo. Sin embargo, cuando de la cabeza de Michael Faraday salió el concepto de campo, nadie podía imaginar la forma en que iba a revolucionar la ciencia y nuestra forma de vivir.

A pesar de que el concepto de campo parece sólo una entelequia conveniente, Michael Faraday insistía en la realidad de su existencia. Para Faraday, el campo era una *perturbación* del espacio. Una carga produce un campo eléctrico y si se mueve produce también un campo magnético. Las “cargas de prueba” se mueven debido al efecto del campo en que están sumergidas y no debido a la acción a distancia de la otra carga. Para muchos, era difícil compartir las alucinaciones de Faraday. El campo no parecía ser algo tangible, sino una simple idea y suponer que las ideas forman parte de la realidad, parecía cuestión de antiguas filosofías superadas. La realidad estaba hecha cosas, de materia... no de conceptos. Por eso los filósofos que pretendían situar sus dos pies en la realidad se llamaban materialistas, como en la expresión materialismo-dialéctico, muy conocida por quienes han tenido contacto con la literatura socialista.

Ondas electromagnéticas

A pesar de su intangibilidad, la realidad de los campos resultó ser tan cierta como que el sol ilumina la Tierra. Cuando James Clerk Maxwell analizó las ecuaciones que describen las interacciones entre campos eléctricos y magnéticos se dio cuenta de que predecían que una perturbación en ellos se podría propagar. Una variación del campo eléctrico produciría un campo magnético variable. La variación en el campo magnético se reflejaría en una nueva variación del campo eléctrico, la cual a su vez volvería a causar una variación en el campo magnético. El

campo eléctrico y el magnético, ambas perturbaciones del espacio, se propagarían juntos en lo que sería una perturbación electromagnética. La velocidad con que esta perturbación del vacío se propagaría a través del espacio resultó extrañamente ser muy similar a la velocidad de la luz, que ya había sido medida en aquel entonces. La conclusión era pasmosa; la luz no era más que una *onda electromagnética*.

Ya mencionamos que la longitud de onda de la luz es pequeña con respecto al tamaño de los objetos cotidianos. La pregunta ahora era: ¿Existirán ondas electromagnéticas con longitudes de onda de otros tamaños? Hertz consiguió generar ondas electromagnéticas con longitudes de onda mucho más largas. Esas ondas *hertzianas* son las que se usan hoy en día para transmitir el radio y la televisión y, ya que su longitud de onda es bastante grande, pueden sacarle la vuelta a los obstáculos: podemos captar una señal de radio aún cuando no podamos ver la antena emisora de la estación.

Con longitudes de onda un poco más largas que las del color rojo se encuentran los rayos infrarrojos, mientras que los rayos ultravioleta tienen longitudes de onda un poco más cortas que el violeta. Tanto las ondas electromagnéticas infrarrojas como las ultravioletas tienen propiedades muy similares a las de la luz, y a veces se hace referencia a ellas como luz. Debido a esta ampliación del concepto, al intervalo entre rojo y violeta, que es el que nuestros ojos pueden percibir, se le llama *luz visible*.



Figura 9: Los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma no son más que ondas electromagnéticas con longitudes de onda más cortas que la luz visible.

Los *rayos X*, que han tenido una aplicación espectacular en medicina y los *rayos gamma* que producen los elementos radiactivos revelaron no ser más que ondas electromagnéticas de longitudes de onda más cortas que la luz. Es interesante notar que mientras menor sea la longitud de onda de una onda electromagnética más posibilidades hay de que sea dañina para los seres vivos. Es necesario usar bloqueador solar para proteger nuestra piel de los rayos ultravioleta, los rayos X no pueden usarse en mujeres embarazadas y accidentes como el de Chernobyl causan un daño terrible debido, entre otras cosas, a la emisión de rayos gamma.

Una consecuencia de considerar la luz como una onda electromagnética es que el éter dejó de ser necesario. El éter había cumplido una función importante como soporte de la teoría ondulatoria, pero ese papel lo tenía ahora el concepto de campo. Los campos son perturbaciones del vacío, y una vez aceptado esto no necesitamos concebir un material especial al que la onda

electromagnética pueda perturbar. Sin embargo, el éter, como todas las ideas anticuadas, se resistió a morir. No obstante, el fracasadamente exitoso experimento de Michelson y Morley, que pretendía detectar el éter, así como el posterior desarrollo de la *teoría de la relatividad* por parte de Albert Einstein, mataron, enterraron y le rezaron novenario a ese alguna vez útil concepto. Pero esa es otra historia que deberá contarse en otra ocasión.

Dualidad onda-partícula

Hasta aquí, el debate sobre la naturaleza de la luz podría contarse como si fuera una telenovela. El malvado Newton con su absurda teoría corpuscular, usaba tráfico de influencias para conseguir que sus ideas fueran consideradas correctas y condenar al ridículo a sus detractores. Los heroicos Young, Huygens y Maxwell, después de muchas vicisitudes sacaron la verdad a relucir poniendo a la teoría ondulatoria en el pedestal en que debe estar, como una teoría absolutamente correcta. Ahora que nuestros héroes hicieron su trabajo, ya sabemos lo que es la luz y podemos sentarnos a descansar.

Esta consoladora visión de la lucha entre la teoría corpuscular y la ondulatoria, no tuvo tiempo de arraigarse. Los científicos de principios del siglo XX no tuvieron un minuto de reposo ya que con el avance de la tecnología se habían logrado hacer mediciones más precisas de una gran variedad de fenómenos y muchos clamaban por una explicación que ni siquiera la teoría electromagnética de Maxwell podía dar. Uno de estos fenómenos era el efecto fotoeléctrico.

En el efecto fotoeléctrico, la energía que la luz puede transferir a un electrón depende de su color. La teoría electromagnética dice que la energía contenida en la luz se relaciona con la amplitud de la onda mientras que el color se relaciona con su longitud de onda. En ninguna parte plantea la teoría electromagnética una relación entre energía y color. Así, el efecto fotoeléctrico permanecía como un misterio insondable.

La solución al enigma fue ingeniosa, pero la física tuvo que dar un pequeño salto hacia atrás. Albert Einstein señaló que el efecto fotoeléctrico podía explicarse fácilmente si se suponía que la luz está formada por paquetes discretos a los que llamó *fotones*. La energía de un fotón dependería inversamente de la longitud de onda de la luz, de acuerdo a una relación empírica que Max Planck utilizó para explicar la radiación del cuerpo negro. Un fotón de luz azul tiene más energía que uno de luz roja, debido a su menor longitud de onda. Esto no implica que siempre la luz azul sea más intensa que la luz roja, ya que la intensidad depende también de la cantidad de fotones disponibles. Pero durante el efecto fotoeléctrico, un electrón choca con un sólo fotón. Por tanto, la cantidad de energía que la luz le transfiere a éste dependerá de la energía del fotón, y no de la energía que la luz transporta globalmente. En otras palabras, la energía transferida al electrón dependerá del color de la luz y no de su intensidad.

Todas las ondas electromagnéticas pueden entenderse como formadas de fotones. Para las ondas con longitudes muy largas, los fotones tienen muy poca energía, por lo que el concepto no resulta útil. En cambio, para los rayos X y los rayos gamma, los fotones resultan ser altamente energéticos y su estudio es indispensable para entender la cada vez más grande variedad de fenómenos que la teoría electromagnética no puede explicar.

A pesar de lo útil del nuevo concepto, el fotón parecía haber resucitado la vieja teoría corpuscular de Newton. La pregunta obligada era: ¿Es la luz una onda o una partícula? La evidencia en favor de la teoría electromagnética no desapareció, a la vez que se fue acumulando nueva evidencia en favor de la teoría del fotón. Nadie podía darse el lujo de descartar ninguna de

las dos teorías. Después de mucha confusión, se llegó a la conclusión de que ambas eran necesarias y se renunció a la idea de buscar una reconciliación entre ellas.

Luis de Broglie llevó esta ambigüedad un poco más lejos y planteó que si las ondas tenían propiedades de partícula, también las partículas debían tener propiedades de onda. Los experimentos que buscaban propiedades ondulatorias en los electrones y otras partículas fueron exitosos, por lo que se estableció la dualidad *onda-partícula*. Siempre se había supuesto que ondas y partículas eran dos realidades diferentes, pero no es así. En realidad todas son ondas-partículas, en donde a veces pueden predominar las propiedades de onda y en otras, las de partícula. Este concepto llevó al desarrollo de la *mecánica cuántica*.

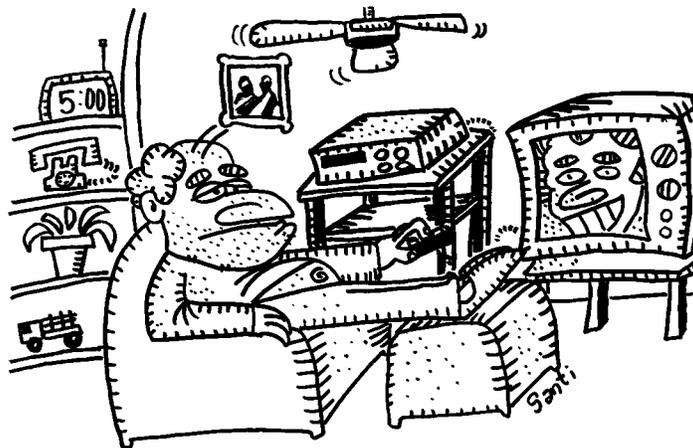


Figura 10: Dicen que el ocio es la madre de todas las filosofías. La verdad es que gracias a la labor iniciada por los filósofos griegos, hoy disponemos de una tecnología que nos libera de trabajos repetitivos y nos permite tener tiempo libre durante el cual podemos seguir filosofando.

La historia no ha terminado de escribirse

No todos se han resignado tan fácilmente. Constantemente se han diseñado experimentos con el propósito de determinar si la luz es más onda que partícula o viceversa. Uno de estos consistió en una repetición del experimento de Young, pero reduciendo la intensidad de la luz de tal modo que en un cierto instante sólo un fotón pudiera estar atravesando una u otra rendija. El resultado es que el patrón de difracción empieza a formarse paulatinamente a partir de las marcas que dejan los choques de los fotones en la pantalla. Esto es desconcertante ya que la teoría electromagnética dice que las franjas luminosas y oscuras son consecuencia de la interferencia constructiva y destructiva de luz que sigue dos trayectorias diferentes. Pero si en cada momento sólo se está transmitiendo luz por una sola de las rendijas ¿cómo puede haber interferencia?

Hasta hoy, nadie ha dado una respuesta que les guste a todos, a estas y otras interrogantes. Tanto el uso de la teoría electromagnética como el de la mecánica cuántica se revelaron como poderosas herramientas para el desarrollo tecnológico. Sin embargo, no deberíamos caer en el error tantas veces repetido de tomar a las últimas teorías conocidas como la verdad absoluta. La verdad debe ser algo mucho más complejo y seguramente en el futuro alguien se aventurará a encontrar una nueva forma de explicar todos estos fenómenos; una nueva forma, tan clara y elegante, que consiga descartar a las teorías actuales. ¿Ocurrirá esto pronto? ¿Tendremos oportunidad de verlo? ¿Quién será el valiente que se atreva? ¿No podría ser acaso... uno de nosotros?