

Misteriosa luz, simple y bella.

Regina Gouveia

Unos ojos que me habían mirado con demora,
no sé si por amor o por caridad,
me habían hecho pensar en la muerte, y en la nostalgia
que yo sentiría si me muriese ahora.
Y pensé que de la vida no tendría
ni nostalgia ni pena por perderla,
sino que en mis ojos muertos guardaría
ciertas imágenes de lo que pude ver.
Me gustó mucho la luz. Me gustó verla en todas las maneras,
Desde la luz de la luciérnaga a la fría luz de la estrella,
del fuego de los incendios a la llama de las hogueras.
Me gustó mucho ver como centellea en la cara de un cristal,
cuando traspasa, en una lámina tranquila,
la polvorienta niebla de un pinar,
cuando salta, en las aguas, con contorsiones de culebra,
desecha en piedras preciosas de un lapidado cetro,
cuando incide en un prisma y se desdobra
en los siete colores del espectro (...)

Gedeão, A. in Saudades da terra.

La fascinación por la luz se remonta a las sociedades más primitivas que habían divinizado al Sol y a la Luna. La Serra de Sinta fue conocida antiguamente como sierra de la Luna pues ahí se practicó su culto.

En la antigua Grecia los hombres habían empezado a intentar explicar el mundo físico a su alrededor, de una forma más racional y menos mitológica. Pero el estudio de la luz estaba fuertemente ligado a la percepción visual. Pitágoras y en general los seguidores del platonismo admitían que los ojos emitían luz. Epicuro fue el primer filósofo en defender que la luz se emite por fuente y al entrar en los ojos produce la sensación visual.

Con el nacimiento de la era cristiana las explicaciones de base naturalista establecidas por la ciencia griega y grecorromana dejan paso a las explicaciones fundamentadas en causas sobrenaturales teniendo como base a las Sagradas Escrituras. Más tarde se intentan conciliar los textos de la Biblia con las teorías aristotélicas pero manteniendo la línea ideológica. Según el Génesis, Dios creó el Cielo y la Tierra y después creó la Luz separándola de las Tinieblas. Las interpretaciones de la Biblia tampoco coincidían siempre. Para unos Dios había creado el Sol y las estrellas a partir de la luz primera, para otros la creación del Sol y de las estrellas había precedido a la de la luz. Hasta el fin del primer milenio habían ido coexistiendo esta idea de naturaleza más o menos divina y las ideas platónicas.

Las ideas de Aristóteles y sus seguidores, interpretadas por los teólogos cristianos, dominaban aún la cultura europea en el inicio del siglo XVII cuando empezaban a prevalecer explicaciones de los fenómenos con bases intelectuales y cognitivas más sólidas. Galileo habría referido que, en relación con la luz, había estado siempre en la oscuridad. Sin embargo, consideraba que la luz era tan solo el cuerpo más pequeño que existía y que provenía del "corazón" de los átomos. Dado que ya se conocían razonablemente fenómenos como la reflexión, la refracción, la formación de imágenes en lentes y espejos, el mecanismo de la visión y algunos efectos de la luz se volvió importante para conocer la naturaleza de la luz física.

De entre varios pensadores que se asomaron a este problema se encuentran Descartes, Hooke y Huygens que admitían que la luz se propagaba como una onda. Pero todas las ondas conocidas, principalmente las ondas en la superficie del agua, contorneaban a los obstáculos (fenómeno que se designa por difracción). Ya que la observación mostraba que la luz, al encontrar un obstáculo con aperturas, continuaba su propagación en línea recta.

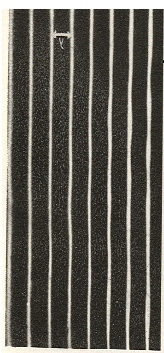


Fig. 1

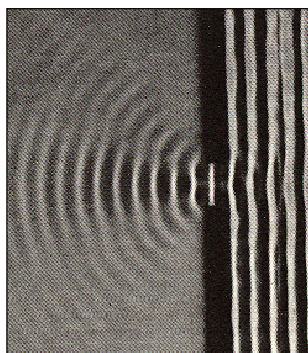


Fig. 2

Difracción en la superficie del agua.

La onda plana (fig. 1) es interceptada por el obstáculo negro (fig. 2) con un apertura central. La onda rodea al obstáculo.

A partir del siglo XVIII las explicaciones especulativas empiezan a dar lugar a explicaciones que asienten en una concordancia entre las teorías y los resultados experimentales.

En 1642 nace Newton, precisamente en el mismo año en que murió Galileo. Newton era muy cauteloso en el avance de explicaciones. En relación con los fenómenos luminosos y el color diría “no voy a mezclar conjeturas con certezas”. Las certezas resultaban de sus conocidas experiencias sobre dispersión de la luz solar por prismas.



Fig. 3. Espectro de la luz solar dispersada por un prisma

Es precisamente la dispersión de la luz solar lo que explica el fenómeno del arco iris. Aristóteles consideraba que su apareamiento implicaba la existencia del Sol, de una nube y de un observador en una determinada posición geométrica. Esta interpretación no era compatible con la Biblia pues, según la misma, Dios habría creado el arco iris tras el Diluvio. Aun admitiendo su inexistencia antes del diluvio, los filósofos de la Edad Media aceptaban en general las ideas de Aristóteles sobre el arco iris aunque sobre las mismas hubiesen surgido algunas variantes a lo largo de los siglos.

Explicaciones del arco iris a partir de fenómenos como la reflexión, la refracción de la luz son propuestas por Bacon y otros filósofos medievales.

Ante el resultado de sus experiencias sobre la luz, Newton admitió que la misma era de naturaleza corpuscular, formada por corpúsculos con diferentes propiedades, principalmente la masa y las dimensiones. La reflexión se explicaría por la colisión y el desvío de los corpúsculos de luz tal como una bola a chocar con una pared se desvía. En relación con los colores constitutivos de la luz solar (luz blanca) consideraba que estarían relacionadas con las diferentes propiedades de los corpúsculos.

Para explicar la refracción, responsable por ejemplo, de la deformación aparente de una vara sumergida en un vaso con agua, admitía que los corpúsculos se desplazaban a mayor velocidad cuando atravesaban el agua que cuando atravesaban el aire. Como en la época no había condiciones para medir la velocidad de la luz en el agua, sólo en el siglo XIX se pudo comprobar que esta concepción de Newton estaba equivocada.

Con relación a la velocidad de la luz en el aire, durante mucho tiempo se pensó que la luz se propagaba instantáneamente. La primera determinación de la velocidad de la luz en el aire fue hecha en 1676 por Roemer, partiendo de observaciones de los eclipses de satélites de Júpiter.

En lo que respecta a la velocidad de la luz en otros medios, el científico francés Foucault, en 1850 verificó experimentalmente que la velocidad de la luz era mayor en el aire que en el agua, contrariamente a lo que defendía Newton.

También ya en los primeros años del siglo XIX, Young demostró experimentalmente que la luz sufre difracción e interferencia. Uno de los experimentos consistió en hacer pasar un haz de luz a través de dos rendijas estrechas en una tela. Young mostró que dos ondas de luz habían emergido de las aperturas produciendo interferencias en un objetivo. En aquel momento no se le dio gran importancia a estos resultados que solo se volvieron relevantes debido al empeño de otro físico, Fresnel.

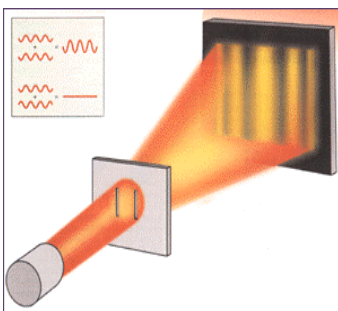


Fig. 4. Representación esquemática de los fenómenos de difracción e interferencia de la luz usando dos rendijas.

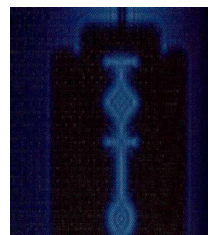


Fig. 5. Fenómenos de difracción e interferencia en una cuchilla de afeitador usando luz incidente monocromática.

Para comprender en qué consiste el fenómeno de interferencia volvamos a las ondas en la superficie del agua.

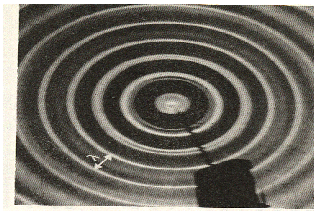


Fig. 6

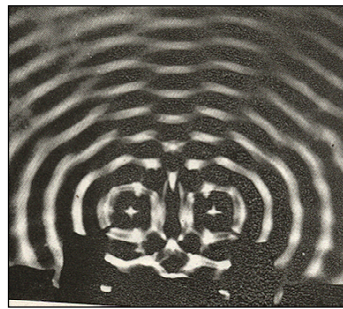


Fig. 7

En la Fig. 6, la vibración de un estilete en la superficie del agua origina una onda circular. En la Fig. 7, usando dos estiletes simultáneamente, vemos figuras de interferencia.

En el experimento de la doble rendija de Young, la luz se difractó en cada una de las rendijas, dando origen a dos nuevos frentes de luz que interfieren.

La razón por la que los fenómenos de interferencia y difracción de la luz no habían sido detectados antes se relaciona con la relación entre la dimensión de la apertura en el obstáculo y la longitud de onda de la onda en la superficie del agua. En la Fig. 2 podemos constatar que la apertura del obstáculo tiene una dimensión similar. La longitud de onda de la luz es muy pequeña (del orden de la décima milésima parte del milímetro) y por eso habitualmente no se observan los fenómenos de difracción e interferencia de la luz.

La detección de los fenómenos de interferencia y difracción de la luz, así como las ideas equivocadas de Newton sobre la velocidad de la luz en medios distintos del aire, habían conducido progresivamente al abandono de la teoría corpuscular en favor de la teoría ondulatoria, que se impondría a partir de mediados del siglo XIX.

Las investigaciones sobre la luz se habían ido desarrollando a la vez que estudios sobre el calor, la electricidad y el magnetismo. Para algunos físicos la luz y el calor eran fluidos, otros admitían que la electricidad y el magnetismo podían tener una naturaleza mecánica y propagarse de forma ondulatoria tal como la luz. Experimentos hechos por Faraday y Oersted vendrían a comprobar un vínculo entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Surgió entonces uno de los conceptos más importantes del siglo XIX - la existencia de ondas electromagnéticas.

En 1873, teniendo en cuenta los acontecimientos acumulados, ya traducidos en algunas ecuaciones matemáticas, Maxwell mejoró esas ecuaciones y concluyó, por vía teórica, que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas coincidía con la velocidad de propagación de la luz, determinada algunos años antes principalmente por Foucault y por Fizeau con una precisión superior a la que había conseguido Roemer 200 años atrás. Así admitió que la luz se debía a ondas electromagnéticas.

Uno de los problemas que el concepto de onda electromagnética trajo fue la necesidad de un medio donde tales ondas se propagasen. Esto porque todas las ondas conocidas necesitaban un soporte material para propagarse (el sonido, por ejemplo no se propaga en el vacío). Se imaginó entonces un medio con propiedades muy especiales al que se llamó éter.

Algunos años tras la muerte de Maxwell, el físico alemán Heinrich Hertz realizó un conjunto de experimentos que llevaron al descubrimiento de las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, las ondas hertzianas, con propiedades idénticas a las de la luz, validando así la teoría electromagnética de Maxwell. El problema del éter en cambio se mantenía. Se habían hecho muchos intentos experimentales para probar la existencia del éter, pero todos sin resultado y la idea del éter acabó por ser abandonada. Las ondas electromagnéticas, contrariamente a las ondas mecánicas, se propagan en el vacío.

En 1887, cuando Hertz se dedicaba a comprobar experimentalmente la teoría de Maxwell, descubrió, un poco por azar, un fenómeno que vendría a llamarse efecto fotoeléctrico. En la secuencia del descubrimiento de Hertz, Hallwachs mostró que algunos metales irradiados con luz ultravioleta emitían electrones. También Lenard se asomó al problema y en 1902 verificó que, para un metal dado, la emisión de electrones dependía de la frecuencia¹ de la luz incidente habiendo una frecuencia mínima bajo la cual el fenómeno no ocurría.

¹ Considerando el arco iris, la frecuencia aumenta progresivamente desde el rojo hasta el violeta.

Frente a la dificultad para explicar el fenómeno a la luz de la teoría ondulatoria, Einstein propuso en 1905 una explicación admitiendo que la luz se constituiría por corpúsculos de energía, que hoy designamos fotones, y que, al incidir en el metal transferían energía hacia los electrones. Si la energía fuese suficiente el electrón podría abandonar el átomo. Einstein admitió que la energía del fotón es tanto mayor cuanto mayor fuese la frecuencia de la luz incidente. Como la transferencia de energía resulta de la interacción del fotón con el electrón, es fácil entender que, dependiendo del metal en cuestión, haya una frecuencia mínima de la luz incidente, necesaria para que el efecto fotoeléctrico pueda ocurrir.

Por la interpretación del efecto fotoeléctrico, Einstein recibió el premio Nobel en 1905 y abrió camino hacia uno de las dos grandes ramas de la Física Moderna -la Física Cuántica². Se constata entonces que la luz tiene un comportamiento dual. Se propaga como una onda pero al interactuar con la materia se comporta como corpúsculo (fotón).

Vimos que el efecto fotoeléctrico está relacionado con la frecuencia de la luz incidente y esta varía a lo largo del espectro electromagnético. Hablar del espectro electromagnético implica retroceder a los tiempos de Newton a quien se debe el estudio de la descomposición de la luz blanca en los siete colores visibles, presentes en el arco iris. Newton usó un prisma para descomponer la luz solar (luz blanca) que hacía pasar por una rendija antes de incidir en el prisma (Fig. 3). Posteriormente asoció dos prismas para reconstituir la luz blanca.

Hoy se sabe que la luz visible es apenas una pequeñísima franja en el espectro electromagnético.

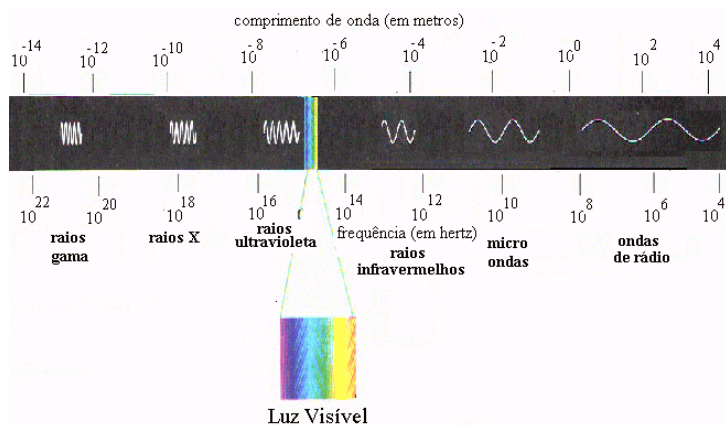


Fig. 8. Espectro electromagnético. La zona correspondiente a la región visible es muy estrecha.

A comienzos del siglo XIX Fraunhofer y posteriormente Kirchoff y Bunsen, habían perfeccionado el sistema para dispersar la luz usando una lente colimadora antes del prisma, y una lente para observar el espectro. Fue así que surgieron los espectroscopios.

Kirchoff e Bunsen, a partir de los resultados de varios experimentos habían constatado que cada elemento químico emite, en determinadas condiciones, un espectro característico de ese elemento.



Fig. 9. Espectros de emisión del sodio (superior) y del hidrógeno (inferior).

Fue así descubierto un proceso de análisis muy prometedor, la espectroscopia. Prácticamente, todo lo que se sabe hoy sobre la composición química de los astros se debe a la espectroscopia. Fue a través del análisis espectral como se descubrió, en la cromosfera solar, la presencia de hidrógeno y metales varios que entran igualmente en la constitución de la Tierra. Es también a través del análisis de los espectros que podemos saber si una estrella se aproxima o se acerca a nosotros.

La espectroscopia tiene un campo de aplicaciones inmensamente amplio. Es, por ejemplo, uno de los procesos de análisis que ha permitido identificar en pinturas el soporte, la preparación, la capa, el barniz y

² El otro es la relatividad que surgió con Einstein.

los pigmentos usados a lo largo de los tiempos en la obtención de colores, muchos de los cuales se continúan utilizando como, por ejemplo, ciertas sales de hierro y cadmio (en la obtención de rojos, naranjas y amarillos), sales de cromo (en la obtención de verdes), sales de cobre y cobalto en la obtención del azul, etc. Varios colores pueden, sin embargo, obtenerse a partir de tres: cian, magenta y amarillo (iniciales en inglés de CMY) que son muchas veces designados como primarios sustractivos.

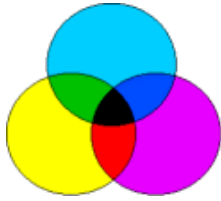


Fig. 10. Mezcla de colores primarios sustractivos.



Fig. 11. Mezcla de colores primarios, vemos que de la adición de colores primarios de dos en dos, resultan los colores primarios sustractivos.

Pasa una mariposa delante de mí
 Y por primera vez en el Universo me fijo
 En que las mariposas no tienen color ni movimiento,
 Así como las flores no tienen perfume ni color.
 Es el color quien tiene color en las alas de la mariposa,
 En el movimiento de la mariposa es el movimiento el que se mueve,
 El perfume es el que tiene perfume en el perfume de la flor
 La mariposa apenas es mariposa. Y la flor es apenas flor.

Caeiro, A. Passa uma Borboleta.

A la vez que las ideas sobre la luz, habían ido surgiendo diversas explicaciones para el color, entre ellas la de los atomistas griegos que consideraban que los colores eran la propia luz modificada por la textura de los cuerpos. Sócrates admitía que el color no residía ni en nuestra vista ni en los objetos y para Platón el color estaba relacionado con el observador dado que la sensación de color puede variar de individuo a individuo. Independientemente de las diferentes explicaciones, existía la preocupación común por identificar colores de pigmentos a partir de los cuales se pudiese obtener todos los demás. Los atomistas hablaban de cuatro colores simples o primarios que para Demócrito eran blanco, rojo, negro y verde pálido. Curiosamente también más tarde Leonardo da Vinci consideraba el verde como primario (sustractivo) lo que, como vimos anteriormente, es incorrecto. Basta mezclar pigmento azul con pigmento amarillo para obtener verde.

Aristóteles, teniendo en cuenta los colores del arco iris, consideró colores primarios rojo, verde y púrpura. Pero aquí ya no estamos hablando de pigmentos, sino de luz. Y los colores primarios en la luz son rojo, verde y azul (iniciales en inglés RGB), que se designan por primarios aditivos. Por adición de estos colores se obtiene los que anteriormente referimos, a propósito de los pigmentos, como primarios sustractivos.

La mariposas no tienen color, dijo Alberto Caeiro en su poema. Posiblemente todos hemos comprobado ya que el color de un objeto puede variar según la luz que incida en él. El color no es así propiedad de un cuerpo. Por otro lado, nada nos garantiza que nuestra percepción de determinado color sea el mismo que el de otra persona. El caso del daltonismo es, en el límite, la confirmación de lo que se ha afirmado. Ya consideraba Galileo que los colores serían fenómenos luminosos secundarios dependientes de la percepción del observador.

Hay efectivamente en el concepto de color tres componentes: uno que es de naturaleza física, la luz; otro que es de naturaleza psicológica, la percepción individual; y un tercero que tiene que ver con el objeto en cuestión.

Misteriosa luz...

En 1992 fue descubierta por el satélite COBE una radiación de fondo en el espectro de las microondas, que se cree que se produjo durante la evolución del Universo e incluso antes de la materia organizada. La luz viaja en el vacío a 300.000 km/s. Esta velocidad es una velocidad límite y constituye una de las constantes de la Física de mayor importancia, pues es uno de los pilares de la teoría de la relatividad. La distancia de la Tierra al Sol es de cerca de 150 millones de kilómetros, por lo que a la luz del Sol le lleva 8

minutos llegar a la Tierra. La edad del universo es de entre 10 y 15 mil millones de años por lo que, incluso si la velocidad de la luz haya sido superior en el comienzo del Universo como algunos físicos admiten, podemos concluir que la distancia recorrida por la radiación de fondo, descubierta en 1999, es una inmensidad inimaginable.

Y aún a propósito de la velocidad de la luz es también fascinante pensar que al mirar al cielo estamos muchas veces mirando a un pasado que ya no existe. Estrellas que ya murieron hace mucho, habían enviado luz que sólo ahora alcanzó la Tierra.

La luz ha desempeñado un papel determinante en el desarrollo de las sociedades. ¡Cuánta evolución en la comunicación desde las señales de humo a la comunicación en los días de hoy (radio, televisión, internet, satélite)! Pero la evolución ocurrió en una infinidad de otras áreas, desde la medicina a la exploración del espacio, por citar apenas dos ejemplos.

La luz precedió a la vida y le es indispensable. Ese hecho, sólo en sí, bastaría para evidenciar su inconmensurable importancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardo L.M. (2005), *Histórias da luz e das cores*, volumen 1, Editora da Universidade do Porto.

Bernardo L.M. (2007), *Histórias da luz e das cores*, volumen 2, Editora da Universidade do Porto.

Caeiro, A. (1946) *Obras Completas de Fernando Pessoa. Poemas de Alberto Caeiro* (Ática, Lisboa).

Gedeão, A. (1964), *Poesias Completas*, Portugália Editora, Lisboa.

Gibert, A. (1982), *Origens históricas da Física Moderna*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.